



**Забудский
Евгений Иванович**

**профессор,
доктор технических наук**

Специализируется в области
электрических машин
и компьютерных технологий.

Результаты научной работы
и учебно-методической работы
представлены на личном

Web-сайте <http://zabudsky.ru>



ISBN 978-5-6045620-9-3



9 785604 562093

Е. И. Забудский

Часть 1. Электрические машины

Е. И. Забудский

Электрические машины

Часть 1. Трансформаторы Теория, устройство, эксперимент



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Москва
2021

Е. И. ЗАБУДСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

**Учебное пособие для вузов
в четырёх частях**

Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ.
Теория, устройство, эксперимент

Часть 2. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Часть 3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

**Часть 4. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Москва
ООО «Мегаполис»
2021

Е. И. ЗАБУДСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

**Учебное пособие для вузов
в четырёх частях**

Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ.
Теория, устройство, эксперимент

*Рекомендовано
Федеральным учебно-методическим объединением
по сельскому, лесному и рыбному хозяйству
для использования в учебном процессе*

Москва
ООО «Мегаполис»
2021

УДК 621.314
ББК 31.261.8
3 12

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и электропривод» Кубанского государственного аграрного университета **С. В. Оськин**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и электротехнические системы» Российского государственного аграрного заочного университета **Л. П. Шичков**

Забудский Е. И.

3 12 Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4 частях.

Ч. 1. Трансформаторы. Теория, устройство, эксперимент /

Е. И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2021. – 540 с.

На обложке: общий вид трёхфазного трансформатора средней мощности.

ISBN 978-5-6045620-9-3

Книга является первой частью учебного пособия для вузов по курсу «Электрические машины». В соответствии с утверждённой программой в ней рассматриваются принципы устройства и основные вопросы теории трансформаторов; режимы работы, характеристики, эксплуатационные свойства трансформаторов и их экспериментальное исследование. Также изложены устройство, основы теории и области применения специальных трансформаторов, а именно – умножителей частоты, насыщающихся и управляемых реакторов и др.

Предназначено для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей вузов. Будет полезной для аспирантов и магистрантов соответствующих специальностей.

Заключение Федерального УМО по сельскому, лесному и рыбному хозяйству: *«Учебное пособие содержит сведения, необходимые для формирования профессиональных компетенций при подготовке бакалавров по направлению «Агроинженерия» и рекомендуется для использования в учебном процессе».*

УДК 621.314
ББК 31.261.8

ISBN 978-5-6045620-9-3

© Забудский Е. И., 2021
© ООО «Мегаполис», 2021

Оглавление

Предисловие	23
ВВЕДЕНИЕ	27
В.1. Значение трансформаторов и электрических машин для научно-технического прогресса	27
В.2. Основные этапы развития трансформаторо- и электромашиностроения	28
В.3. Принцип действия электрической машины и трансформатора	31
В.4. Основные понятия электротехники в применении к анализу процессов в трансформаторах и электрических машинах	35
В.4.1. Система единиц физических величин	35
В.4.2. Векторные и скалярные величины в электротехнике	35
В.4.3. Изображение периодически изменяющихся величин в электротехнике	38
В.5. Основные законы электротехники в применении к анализу процессов в трансформаторах и электрических машинах	42
В.5.1. Магнитный поток. Принцип непрерывности магнитного потока	42
В.5.2. Закон полного тока	44
В.5.3. Закон электромагнитной индукции	44
А. Формулировка Максвелла	46
Б. Формулировка Фарадея	47
В.5.4. Энергия магнитного поля и электромагнитная сила	48
В.5.5. Общая модель электромагнитного поля Максвелла	50
В.6. Основные электромагнитные схемы трансформаторов и электрических машин	53
А. Трансформатор	53
Б. Асинхронный двигатель	56
В. Синхронный генератор	60
Г. Коллекторные машины постоянного и переменного тока	62
Д. Индуктивные и ёмкостные машины	68
В.7. Основные конструктивные схемы трансформаторов и электрических машин	71
А. Трансформаторы	71
Б. Вращающиеся электрические машины	72

В.8.	Магнитные материалы. Термины и определения	77
	А. Общие понятия	77
	Б. Процессы и состояния	79
	В. Общие характеристики и параметры	80
В.9.	Элементы теории магнетизма	83
	В.9.1. Магнитная проницаемость	83
	В.9.2. Магнитные свойства в свободном пространстве	83
	В.9.3. Усиление магнитного поля	84
	В.9.4. Простейший трансформатор	87
	В.9.5. Магнитный сердечник (магнитопровод)	87
	В.9.6. Фундаментальные характеристики магнитного сердечника ..	89
	В.9.7. Зависимость $B(H)$ при повторном перемагничивании сердечника	90
	В.9.8. Виды магнитной проницаемости	91
	В.9.9. Магнитодвижущая сила (МДС) и напряжённость H	94
	В.9.10. Магнитное сопротивление	94
	В.9.11. Влияние воздушного зазора	96
В.10.	Магнитные материалы и их характеристики	98
	В.10.1. Классификация	98
	В.10.2. Насыщение магнитного материала	99
	В.10.3. Остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c	99
	В.10.4. Магнитная проницаемость материала	99
	В.10.5. Потери на гистерезис и на вихревые токи	100
	В.10.6. Электротехническая (кремниевая) сталь	100
	В.10.7. Теория насыщения магнитного материала	102
	В.10.8. Теория кривой намагничивания и петли гистерезиса	103
	В.10.9. Производство электротехнической стали в РФ	104
	А. ПАО «Северсталь», г. Череповец	104
	Б. Группа предприятий Новолипецкого Metallургиче- ского Комбината, г. г. Липецк, Екатеринбург	105
	В. Производство электротехнической анизотропной стали на НЛМК	108

В.11. Основные материалы, применяемые в трансформаторах и электрических машинах	110
А. Электротехническая сталь холоднокатаная анизотропная для трансформаторов. ГОСТ 32482-2013	110
Б. Электротехническая сталь холоднокатаная изотропная для электрических машин. ГОСТ 21427.2-83	113
В. Проводниковые материалы	113
Г. Электроизоляционные материалы	117
Д. Электрические щетки	121
В.12. ГОСТ 32482-2013. Холоднокатаная электротехническая анизотропная сталь для трансформаторов (выдержки).	123
В.13. Потери мощности и коэффициент полезного действия	128
А. Электрические потери	128
Б. Магнитные потери при пульсационном и вращательном перемагничивании	128
В. Механические потери	130
Г. Вентиляционные потери	131
Д. Добавочные потери	131
Д1. Поверхностные потери	131
Д2. Пульсационные потери	131
Е. Коэффициент полезного действия	131

ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Основные сведения о трансформаторах	133
2. Трансформаторы. Термины и определения	140
2.1. Общие понятия	140
2.2. Виды трансформаторов	140
2.3. Магнитная система трансформатора	141
2.4. Обмотки трансформатора	142
2.5. Изоляция трансформатора	143
2.6. Отдельные части трансформатора	143
2.7. Детали конструкции и параметры частей трансформатора	144
2.7.1. Магнитная система	144
2.8. Режимы и процессы	145
2.9. Параметры трансформатора	146
2.9.1. Общие параметры	146
2.9.2. Номинальные данные трансформатора	147

3.	Буквенные обозначения элементов в электрических схемах	148
4.	Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов	149
5.	Условное обозначение трансформаторов	151
6.	Соотношения из теории переменных токов	153
6.1.	Изображение синусоидальной функции в декартовой и полярной системах координат	153
6.2.	Напряжение, ток и мощность в активном сопротивлении	155
6.3.	Напряжение, ток и мощность в индуктивном сопротивлении ...	156
6.4.	Напряжение, ток и мощность в ёмкостном сопротивлении	157
6.5.	Напряжение, ток и мощность в цепи со смешанным сопротивлением	159
6.6.	Изображение векторов тока и напряжения на комплексной плоскости	160
7.	Назначение, области применения и номинальные данные трансформаторов	161
8.	Принцип действия и виды трансформаторов	165
	А. Принцип действия	165
	Б. Электрические соотношения в идеальном трансформаторе	166
	В. Виды трансформаторов	167
9.	Устройство магнитопроводов и обмоток трансформаторов	169
	А. Виды магнитопроводов силовых трансформаторов	169
	Б. Виды магнитопроводов трансформаторов малой мощности	173
	В. Магнитопровод трёхфазного трёхстержневого трансформатора ..	174
	Г. Способы уменьшения магнитных потерь в стали	178
	Д. Обмотки трансформаторов	182
	Е. Изоляция силовых трансформаторов	185
10.	Конструктивные части трансформатора	188
	А. Бак с охладителями	188
	А1. Тепловые процессы в трансформаторе	194
	Б. Тележка с катками	196
	В. Расширитель	196
	Г. Газовое реле	197
	Д. Выхлопная труба	199
	Е. Термосифонный фильтр	199

Ё. Термометр	199
Ж. Пробивной предохранитель	200
З. Заземление	201
И. Арматура для заливки, взятия пробы, спуска и фильтрации масла	201
Й. Отводы и вводы	201
К. Переключающие устройства	204
11. Метод изучения работы трансформатора	215
12. Режим холостого хода однофазного трансформатора	216
12.1. Уравнение напряжений и ЭДС при холостом ходе трансформатора	216
12.2. Векторная диаграмма напряжений и ЭДС холостого хода	217
А. ЭДС первичной обмотки	217
Б. Основной поток	217
В. Намагничивающий ток	219
Г. Ток холостого хода	220
Д. Векторная диаграмма	221
12.3. Потери холостого хода	222
12.4. Опыт холостого хода	223
13. Магнитные системы и способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов. Холостой ход трехфазного трансформатора	226
13.1. Магнитные системы трехфазных трансформаторов	226
13.2. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов и их обозначения	227
А. Соединение обмотки звездой (схема Y)	230
Б. Соединение обмотки треугольником (схема Δ)	231
В. Соединение обмотки зигзагом (схема Z)	233
Г. Группа соединений обмоток трансформатора	233
13.3. Холостой ход при соединении обмоток Y/Y	237
13.4. Холостой ход при соединении обмоток Δ/Y или Y/Δ	240
14. Короткое замыкание трансформатора	242
14.1. Режимы короткого замыкания	242
14.2. Напряжение короткого замыкания	242

14.3. Физические условия работы трансформатора при симметричном коротком замыкании	243
А. Уравнение напряжений и ЭДС первичной обмотки	245
Б. Уравнение напряжений и ЭДС вторичной обмотки	246
В. Уравнение магнитодвижущих сил	246
Г. Векторная диаграмма	247
14.4. Приведенный трансформатор	248
А. Приведенная вторичная ЭДС	249
Б. Приведенный вторичный ток	249
В. Приведенные сопротивления вторичной обмотки	250
14.5. Электрическая схема замещения трансформатора	250
14.6. Треугольник короткого замыкания	253
14.7. Опыт короткого замыкания трансформатора	255
15. Работа трансформатора под нагрузкой	258
15.1. Физические условия работы трансформатора под нагрузкой ..	258
А. Уравнение напряжений и ЭДС <i>первичной</i> обмотки	259
Б. Уравнение напряжений и ЭДС <i>вторичной</i> обмотки	259
В. Уравнение магнитодвижущих сил	259
15.2. Векторные диаграммы трансформатора при нагрузке	260
15.3. Изменение напряжения трансформатора	263
15.4. Внешняя характеристика трансформатора	266
15.5. Регулирование напряжения трансформатора	267
А. Трансформаторы с переключением числа витков в отключенном состоянии	268
Б. Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой	269
15.6. Коэффициент полезного действия трансформатора	272
15.7. Энергетические диаграммы трансформатора	276
15.8. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке	278
А. Применение метода симметричных составляющих	278
Б. Схемы замещения и сопротивления трансформатора для токов прямой и обратной последовательности	279
В. Токи и потоки нулевой последовательности в трансформаторах	280

Г. Однофазное короткое замыкание в группе Y/Y_n-0	282
Д. Однофазное короткое замыкание в системе Δ/Y_n	286
16. Параллельная работа трансформаторов	287
16.1. Условия параллельной работы трансформаторов	287
16.2. Условие равенства коэффициентов трансформации (равенство напряжений трансформаторов)	289
А. Трансформаторы в режиме холостого хода	289
Б. Холостой ход трансформаторов	290
В. Нагрузка трансформаторов	291
16.3. Условие принадлежности трансформаторов к одной группе ...	293
16.4. Условие равенства напряжений короткого замыкания	294
17. Переходные режимы трансформаторов	297
17.1. Характер переходных режимов	297
17.2. Короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки трансформатора	297
А. Короткое замыкание однофазного трансформатора	298
Б. Электромагнитные силы, действующие на обмотки трансформатора	302
В. Нагрев обмоток при коротком замыкании	305
17.3. Витковое короткое замыкание	306
17.4. Ток включения при холостом ходе трансформатора	308
17.5. Перенапряжения в трансформаторах	313
А. Переходный процесс в трансформаторе	315
Б. Защита трансформаторов от перенапряжений	317
18. Специальные типы трансформаторов	320
18.1. Автотрансформаторы	320
А. Режим холостого хода	320
Б. Режим короткого замыкания	321
В. Работа под нагрузкой	322
18.2. Многообмоточные трансформаторы	324
А. Трехобмоточный трансформатор с одной первичной обмоткой ВН и двумя вторичными обмотками НН и СН	324
Б. Трехобмоточный трансформатор с двумя первичными обмотками	328

18.3. Сварочные трансформаторы	330
18.4. Измерительные трансформаторы	331
А. Трансформаторы тока	331
Б. Трансформаторы напряжения	333
18.5. Трансформаторы с плавным регулированием напряжения под нагрузкой	334
А. Индукционный регулятор	334
Б. Трансформатор со скользящими контактами	335
В. Трансформатор с подвижными обмотками и сердечниками .	335
Г. Трансформатор с подмагничиванием постоянным током	336
Г1. Однофазный трансформатор с подмагничиваемым шунтом	336
Г2. Устройство с двумя однофазными трансформаторами с подмагничиванием	337
18.6. «Пик-трансформаторы»	339
18.7. Реакторы и реактивные катушки	340
А. Реакторы со стальным сердечником и воздушными зазорами	340
Б. Управляемые реакторы с вращающимся магнитным полем .	342
В. Управляемые реакторы и умножители частоты с пульсирующим магнитным полем	347
18.8. Трансформатор с вращающимся полем для преобразования числа фаз или частоты	348
А. Трансформатор для преобразования числа фаз	348
Б. Трансформаторы для преобразования частоты	348
18.9. Трансформаторы для специальных целей	350
А. Печные трансформаторы	350
Б. Испытательные трансформаторы	350
19. Номинальные данные и устройство трансформаторов, исследуемых в лабораторном цикле	351
20. Работа № 1. Трехфазный двухобмоточный трансформатор. Оглавление	353
21. Работа № 2. Параллельная работа трехфазных трансформаторов. Оглавление	372

22. Работа № 3. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов. Оглавление	398
23. Работа № 4. Исследование явлений, возникающих при намагничивании магнитопровода трансформатора. Оглавление	418
Литература	446
Приложение.	
П1. Pascal-программа «Расчет характеристик холостого хода трансформатора»	448
П2. Форма отчета по лабораторной работе (<i>образец оформления</i>)	451
П3. Основы проектирования трансформаторов	459
Введение	460
П3.1. Закон роста мощности и геометрических размеров трансформатора	462
П3.2. Расчет основных размеров трансформатора на ПК	465
П4. Трансформаторы специального назначения *	490
Введение	492
П4.1. Умножители частоты	495
П4.2. Насыщающиеся и управляемые реакторы	505
П5. Компьютерный видеофильм «Конструкция и технология электрических машин. В 5-ти частях. Ч. 1. Трансформаторы»	538
П6. Научный и учебно-методический комплекс / интернет-ресурс http://zabudsky.ru/ / (вместо заключения)	539
Оглавление перечней рисунков и таблиц	12

NB **Устройство трансформатора** представлено в разделах 2.7, 8, 9, 10, 13, а также в приложении П5.

NB **Теория трансформатора** изложена в разделах 1 – 18 и в части 3 разделов 20, 21, 22, 23, а также в приложениях П3 и П4.

NB **Экспериментальное исследование трансформатора** представлено в лабораторном цикле в разделах 20, 21, 22, 23.

* Тематика приложения П4 предлагается для УИРС и НИРС.

Оглавление
перечней рисунков и таблиц

Перечень рисунков в Предисловии, Введении, в разделах 1, 4, 6, 8, 9, 10, 12 – 18	13 – 21
Перечень рисунков в 20-м разделе (<i>Работа №1</i>)	354
Перечень рисунков в 21-м разделе (<i>Работа №2</i>)	373
Перечень рисунков в 22-м разделе (<i>Работа №3</i>)	399
Перечень рисунков в 23-м разделе (<i>Работа №4</i>)	419
Перечень рисунков в приложении П3	459
Перечень рисунков в приложении П4	491
Перечень таблиц в Введении, в 14 и 15-м разделах	22
Перечень таблиц в 19 и 20-м разделах	354
Перечень таблиц в 19 и 21-м разделах	373
Перечень таблиц в 19 и 22-м разделах	399
Перечень таблиц в 19 и 23-м разделах	419
Перечень таблиц в приложении П4	491

**Перечень рисунков в Предисловии, Введении,
в разделах 1, 4, 6, 8, 9, 10, 12 – 18**

Предисловие

Рис. П.1. Общий вид лаборатории Трансформаторов	25
Рис. П.2. Общий вид стенда «Трансформатор»	26
Рис. П.3. Приборная панель стенда «Трансформатор»	26

Введение

Рис. В.1. Наведение ЭДС в проводнике	32
Рис. В.2. Правило правой руки.....	33
Рис. В.3. Картины магнитных полей: a – совмещенные поля; b – результирующее поле	34
Рис. В.4. Правило левой руки	34
Рис. В.5. Линейные диаграммы изменения напряжения и тока	39
Рис. В.6. Представление синусоидальной функции тока в форме вектора: a – линейная диаграмма тока; b – изображение тока в форме вектора	40
Рис. В.7. Представление синусоидальной функции тока в форме комплексного числа ...	41
Рис. В.8. К определению направления линий поля, созданных током i – (a); поток вектора магнитной индукции сквозь поверхность S – (b)	43
Рис. В.9. К иллюстрации закона полного тока	45
Рис. В.10. Электромагнитная сила, действующая на отдельный элемент контура	50
Рис. В.11. Возникновение в машине электрического поля как результат изменения магнитного поля	54
Рис. В.12. Электромагнитная схема трансформатора: a – однофазный трансформатор; b – трехфазный трансформатор	55
Рис. В.13. Электромагнитная схема трёхфазного асинхронного двигателя	57
Рис. В.14. Объяснение принципа работы трёхфазной асинхронной машины	58
Рис. В.15. Электромагнитная схема трехфазной синхронной машины (режим генератора) a – ротор двухполюсный; b – ротор четырехполюсный ...	61
Рис. В.16. Электромагнитная схема ротора с коллектором и контактными щетками	63
Рис. В.17. Электромагнитная схема машины постоянного тока (режим генератора)	64
Рис. В.18. Использование электрической машины постоянного тока в качестве двигателя	65
Рис. В.19. Электромагнитная схема трехфазной коллекторной машины	67
Рис. В.20. Схема устройства однофазного трансформатора	71
Рис. В.21. Схема устройства электрической машины (асинхронной)	72
Рис. В.22. Схема устройства электрической машины (синхронной) с вертикальным валом	73

Продолжение перечня рисунков

Рис. В.23. Сердечники статора и ротора с обмотками асинхронного двигателя: $P_2 = 15$ кВт, $2p = 4$, радиальный воздушный зазор $\delta = 0,5$ мм	74
Рис. В.24. Явнополюсный ротор синхронной машины	75
Рис. В.25. Схема устройства обдуваемой (асинхронной) машины	76
Рис. В.26. Магнитное поле, созданное проводником с током	83
Рис. В.27. Магнитные поля, возникающие вокруг свободных токоведущих проводников (между проводниками большое расстояние)	84
Рис. В.28. Магнитные поля, возникающие вокруг близко расположенных проводников с током	85
Рис. В.29. Воздушная катушка с постоянным током обмотки	85
Рис. В.30. Характеристика намагничивания катушки постоянным током	86
Рис. В.31. Воздушная катушка с возбуждением от источника переменного напряжения	86
Рис. В.32. Характеристика намагничивания катушки переменным током	86
Рис. В.33. Простейшая схема трансформатора (режим холостого хода)	87
Рис. В.34. Магнитное поле воздушной катушки	88
Рис. В.35. Магнитное поле катушки с ферромагнитным сердечником	88
Рис. В.36. Катушка с насыщенным сердечником	89
Рис. В.37. Типичная кривая первоначального намагничивания ферромагнитного материала	89
Рис. В.38. Не возбуждённый магнитный сердечник	90
Рис. В.39. Слабо возбуждённый магнитный сердечник	90
Рис. В.40. Магнитный сердечник на грани насыщения	90
Рис. В.41. Типичная петля гистерезиса магнитного материала	91
Рис. В.42. Кривая первоначального намагничивания	92
Рис. В.43. Зависимость магнитной проницаемости от B и H	93
Рис. В.44. Максимальная магнитная проницаемость	93
Рис. В.45. Катушка с магнитным сердечником: определение средней силовой линии и площади поперечного сечения	95
Рис. В.46. Типичный магнитный сердечник с воздушным зазором	96
Рис. В.47. Сравнение характеристик $B(H)$ магнитного материала сердечника без зазора (a) и с зазором (b)	97
Рис. В.48. Типичная зависимость $B(H)$ магнитно-мягкого материала	99
Рис. В.49. Зависимость магнитной проницаемости от B и H	100
Рис. В.50. Беспорядочное расположение элементарных магнетиков	102
Рис. В.51. Элементарные магнетики ориентированы упорядоченно	102
Рис. В.52. Структура ферромагнетика в различных точках петли гистерезиса	103

Продолжение перечня рисунков

Рис. В.53, лист 1. Диаграммы магнитных свойств анизотропной холоднокатаной (трансформаторной) стали, марка проката Т145–35S: <i>a</i> – кривая намагничивания; <i>b</i> – петля гистерезиса	106
Рис. В.53, лист 2. Диаграммы магнитных свойств анизотропной холоднокатаной (трансформаторной) стали, марка проката Т145–35S: <i>a</i> – удельные магнитные потери; <i>b</i> – амплитудная магнитная проницаемость	107
Рис. В.54. Рулоны электротехнической стали в цехе НЛМК	108
Рис. В.55. Схема производства электротехнической стали на НЛМК	109
Рис. В.56. Микроструктура холоднокатаной электротехнической стали	111
Рис. В.57. Потери на гистерезис p_H при пульсационном (1) и вращательном (2) перемагничивании	132
Рис. В.58. Зависимость КПД от нагрузки	132

1. Основные сведения о трансформаторах

Рис. 1.1. Схема производства, передачи, распределения и потребления (преобразования) электроэнергии	134
Рис. 1.2. Однофазный броневой трансформатор с двумя concentрическими обмотками в режиме: <i>a</i> – холостого хода; <i>b</i> – нагрузки	136

4. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов

Рис. 4.1. Маркировка выводов и ответвлений силовых трёхфазных трансформаторов	150
--	-----

6. Соотношения из теории переменных токов

Рис. 6.1. Изображение синусоидальной функции: <i>a</i> – в прямоугольных координатах, <i>b</i> – векторное	153
Рис. 6.2. Цепь с активным сопротивлением: <i>a</i> – схема, <i>b</i> – изменение напряжения, тока и мощности во времени, <i>в</i> – векторная диаграмма	156
Рис. 6.3. Цепь с индуктивным сопротивлением: <i>a</i> – схема, <i>b</i> -- изменение напряжения, тока и мощности во времени, <i>в</i> – векторная диаграмма	157
Рис. 6.4. Цепь с емкостным сопротивлением: <i>a</i> – схема, <i>b</i> – изменение напряжения, тока и мощности во времени, <i>в</i> – векторная диаграмма	158
Рис. 6.5. Цепь со смешанным сопротивлением: <i>a</i> – схема, <i>b</i> – изменение напряжения, тока и мощности во времени, <i>в</i> – векторная диаграмма	159
Рис. 6.6. Изображение векторов на комплексной плоскости	160

8. Принцип действия и виды трансформаторов

Рис. 8.1. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора	165
---	-----

9. Устройство магнитопроводов и обмоток трансформаторов

Рис. 9.1. Устройство однофазных трансформаторов: <i>a</i> – стержневого, <i>b</i> – броневое	169
Рис. 9.2. Трёхфазная трансформаторная группа	170
Рис. 9.3. Устройство трёхфазного трёхстержневого трансформатора	171
Рис. 9.4. Устройство трёхфазного броневое трансформатора	172

Продолжение перечня рисунков

Рис. 9.5. Устройство бронестержневых трансформаторов	173
Рис. 9.6. Магнитопровод и обмотка трансформатора небольшой мощности	173
Рис. 9.7. Форма пластин (<i>a</i>) и шихтовка магнитопровода (<i>b</i>) трансформатора небольшой мощности	174
Рис. 9.8. Остов трёхфазного трансформатора, мощность 180 кВ·А, напряжение 6–10 кВ	175
Рис. 9.9. Формы сечений стержней трансформаторов	175
Рис. 9.10. Формы сечения ярм трансформаторов	176
Рис. 9.11. Стяжка стержней трансформаторов средней мощности	177
Рис. 9.12. Стяжка стержней трансформаторов большой мощности	177
Рис. 9.13. Вихревые токи в магнитопроводе трансформатора: <i>a</i> – сплошном, <i>b</i> – шихтованном	179
Рис. 9.14. Схемы стыковых трансформаторов: <i>a</i> – однофазных; <i>b</i> – трехфазных	180
Рис. 9.15. Укладка листов стали в слоях шихтованных магнитопроводов трансформаторов	180
Рис. 9.16. Вихревые токи в стыковом соединении стержней и ярм	181
Рис. 9.17. Вихревые токи в стыковом соединении стержней и ярм, обусловленные наличием заусенцев	181
Рис. 9.18. Концентрические (<i>a</i>) и дисковые чередующееся (<i>b</i>) обмотки	184
Рис. 9.19. Цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольного провода	184
Рис. 9.20. Обмотка трёхфазного трансформатора мощностью 1800 кВ·А, на напряжение $35000 \pm 5\% / 6300$ В	189
10. Конструктивные части трансформатора	
Рис. 10.1, лист 1. Трёхфазный двухобмоточный трансформатор мощностью 320 кВ·А, на напряжение 6/0,525 кВ (вид спереди)	190
Рис. 10.1, лист 2. Трёхфазный двухобмоточный трансформатор мощностью 320 кВ·А, на напряжение 6/0,525 кВ (вид сверху)	191
Рис. 10.2. Стенка бака трансформатора с охлаждающими масло: <i>a</i> – трубами; <i>b</i> – радиаторами	193
Рис. 10.3. Прямотрубный радиатор с обдувом вентиляторами	194
Рис. 10.4. Примерное изменение температуры по высоте трансформатора	195
Рис. 10.5. Примерное распределение температуры в горизонтальном сечении масляного трансформатора	195
Рис. 10.6. Арматура бака трансформатора – расширитель и выхлопная труба	197
Рис. 10.7. Схема устройства газового реле	198
Рис. 10.8. Стекланный ртутный выключатель	199

Продолжение перечня рисунков

Рис. 10.9. Ввод для наружной установки на напряжение 35 кВ при токе до 250 А с токоведущей шпилькой, присоединяемой к отводу	202
Рис. 10.10. Ввод на напряжение 230 – 525 В для наружной установки, номинальные токи 275, 400 или 600 А	203
Рис. 10.11. Трёхфазный переключатель ПБВ для регулирования напряжения при токе до 50 А класса напряжения 35 кВ	206
Рис. 10.12. Автоматическая линия резки рулонной электротехнической стали на пластины	207
Рис. 10.13. Шихтовка «в переплет» стержневого магнитопровода трансформатора (стыки – косые)	207
Рис. 10.14. Участок изготовления обмоток трансформатора	208
Рис. 10.15. Осевая опрессовка и сушка обмоток НН и ВН трансформатора	208
Рис. 10.16. Насадка обмотки на стержень магнитопровода трансформатора	209
Рис. 10.17. Зашихтовка верхнего ярма магнитопровода трансформатора (косые стыки) ..	209
Рис. 10.18. Распайка выводов обмоток трансформатора	210
Рис. 10.19. Сборка сухого трансформатора: обмотка ВН залита в эпоксидную смолу	210
Рис. 10.20. Активная часть (остов) сухого трансформатора: обмотка ВН залита в эпоксидную смолу	211
Рис. 10.21. Стержневой магнитопровод мощного трехфазного масляного трансформатора на сборочном стенде	211
Рис. 10.22. Навивка обмотки ВН (110 кВ) мощного трехфазного трансформатора	212
Рис. 10.23. Обмотка ВН (110 кВ) мощного трехфазного трансформатора	212
Рис. 10.24. Бронестержневой магнитопровод мощного трехфазного масляного трансформатора	213
Рис. 10.25. Трансформатор на специальной железнодорожной платформе	213
Рис. 10.26. Активная часть мощного трехфазного трансформатора с РПН, напряжение 110 кВ	214
Рис. 10.27. Открытая установка мощных трёхфазных трансформаторов на электростанции	214
<i>12. Режим холостого хода однофазного трансформатора</i>	
Рис. 12.1. Магнитный поток при холостом ходе трансформатора	217
Рис. 12.2. Холостой ход трансформатора: a – намагничивающий ток $i_{\text{хц}}$, b – ток холостого хода $i_{\text{х}}$, v – упрощенная векторная диаграмма, z – полная векторная диаграмма	218
Рис. 12.3. Схема для опыта холостого хода трансформатора	223

Продолжение перечня рисунков

Рис. 12.4. Зависимость тока и мощности от напряжения при холостом ходе трансформатора	224
--	-----

13. Магнитные системы и способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов. Холостой ход трехфазного трансформатора

Рис. 13.1. Соединение обмоток звездой: <i>a</i> – схема, <i>b</i> – векторы ЭДС \underline{E}_1 , <i>v</i> – векторы ЭДС \underline{E}_3 , <i>z</i> – векторы напряжений и токов	228
Рис. 13.2. Соединение обмоток треугольником: <i>a</i> – схема, <i>b</i> – векторы ЭДС \underline{E}_1 , <i>v</i> – векторы токов	228
Рис. 13.3. Соединение обмоток зигзагом: <i>a</i> – схема; <i>b</i> – звезды векторов ЭДС полуфаз; <i>v</i> – векторная диаграмма ЭДС схемы обмотки зигзаг	229
Рис. 13.4. Угол сдвига векторов ЭДС в зависимости от направления намотки и обозначения зажимов	234
Рис. 13.5. Диаграммы линейных и фазных ЭДС в группе соединений обмоток Y/Y-0	235
Рис. 13.6. Диаграммы линейных и фазных ЭДС в группе соединений обмоток Y/Y-6	235
Рис. 13.7. Диаграмма линейных и фазных ЭДС в группе соединений обмоток Y/Δ-11 ...	236
Рис. 13.8. Первая и третьи гармонические: <i>a</i> – тока холостого хода; <i>b</i> – магнитного потока; <i>v</i> – ЭДС	238
Рис. 13.9. Третьи гармонические Фз потока трёхстержневого трансформатора при соединении обмоток Y/Y	239
Рис. 13.10. Третья гармоническая магнитного потока и тока при соединении обмоток Δ/Y	240

14. Короткое замыкание трансформатора

Рис. 14.1. Потоки рассеяния в трансформаторе при коротком замыкании	244
Рис. 14.2. Векторная диаграмма для трансформатора при коротком замыкании	247
Рис. 14.3. Схемы замещения трансформатора	251
Рис. 14.4. Векторная диаграмма: <i>a</i> – для приведенного трансформатора при коротком замыкании, <i>b</i> – для схемы замещения трансформатора при коротком замыкании	253
Рис. 14.5. Треугольник короткого замыкания	254

15. Работа трансформатора под нагрузкой

Рис. 15.1. Принципиальная схема нагруженного трансформатора	258
Рис. 15.2. Векторная диаграмма для трансформатора при нагрузке: <i>a</i> – активно-индуктивной, <i>b</i> – активно-емкостной	261
Рис. 15.3. Векторная диаграмма для упрощенной схемы замещения трансформатора при нагрузке: <i>a</i> – активно-индуктивной, <i>b</i> – активно-емкостной	262

Продолжение перечня рисунков

Рис. 15.4. Графическое определение изменения вторичного напряжения	265
Рис. 15.5. Зависимость изменения падения напряжения от характера нагрузки ($I_2 = \text{const}$) ...	266
Рис. 15.6. Внешняя характеристика трансформатора ($\cos \varphi_2 = \text{const}$)	267
Рис. 15.7. Схемы обмоток с ответвлениями для регулирования напряжения	269
Рис. 15.8. Схемы переключателей для регулирования напряжения	270
Рис. 15.9. Переключение ответвлений обмотки для регулирования напряжения под нагрузкой с использованием токоограничивающего реактора	270
Рис. 15.10. Схема регулирования напряжения под нагрузкой с использованием активных токоограничивающих сопротивлений	272
Рис. 15.11. Зависимость КПД трёхфазного трансформатора от коэффициента нагрузки β	275
Рис. 15.12. Энергетическая диаграмма трансформатора: a – активной мощности, b – реактивной мощности	276
Рис. 15.13. Симметричные составляющие трехфазных токов	279
Рис. 15.14. Токи нулевой последовательности в обмотках, соединенных в звезду с нейтральным проводом (a) и в треугольник (b)	281
Рис. 15.15. Однофазное короткое замыкание в группе Y/Y_n-0 : a – схема, b – однофазный поток	283
Рис. 15.16. Действие однофазного потока при соединении обмоток $Y/Y_n - 0$ группового трансформатора	285
Рис. 15.17. Токи при коротком замыкании трансформатора группы Δ/Y_n	286
16. Параллельная работа трансформаторов	
Рис. 16.1. Схема параллельной работы двухобмоточных однофазных трансформаторов .	288
Рис. 16.2. Токи при параллельном включении трансформаторов в режиме холостого хода	290
Рис. 16.3. Токи при параллельном включении трансформаторов при нагрузке	291
Рис. 16.4. Уравнительные токи при параллельной работе трансформаторов $Y/\Delta-11$ и $Y/Y-0$	293
Рис. 16.5. Внешние характеристики трансформаторов при параллельном включении и неравенстве напряжений короткого замыкания	294
Рис. 16.6. Нагрузка трансформаторов при различных составляющих напряжений короткого замыкания трансформаторов	296
17. Переходные режимы трансформаторов	
Рис. 17.1. Различные случаи короткого замыкания трехфазного трансформатора	298

Продолжение перечня рисунков

Рис. 17.2. Короткое замыкание однофазного трансформатора: a – электромагнитная схема, b – схема замещения, v – фаза момента включения	299
Рис. 17.3. Токи внезапного короткого замыкания трансформатора при включении в момент времени $t = 0$: $a - u_1 = 0 (\psi = 0)$; $b - u_1 = U_{1m} (\psi = \pi/2)$	301
Рис. 17.4. Связь между магнитной индукцией B , током i в проводнике и силой F , действующей на проводник	303
Рис. 17.5. Поле рассеяния concentрической обмотки и направления вектора индукции в различных точках поля	304
Рис. 17.6. Диаграммы распределения продольных F_d и поперечных F_q сил, созданных взаимодействием поля рассеяния с током в проводниках	304
Рис. 17.7. Изменения силы F в процессе короткого замыкания	304
Рис. 17.8. Диаграммы распределения составляющих вектора индукции поля рассеяния	305
Рис. 17.9. Короткое замыкание части витков одной из обмоток	307
Рис. 17.10. Холостой ход однофазного трансформатора: a – электромагнитная схема, b – схема замещения	309
Рис. 17.11. Переходный процесс при включении трансформатора в холостую	311
Рис. 17.12. Графическое построение тока включения	312
Рис. 17.13. Осциллограмма тока включения насыщенного трансформатора	313
Рис. 17.14. Прямоугольная волна перенапряжения	314
Рис. 17.15. Емкостные связи трансформатора	314
Рис. 17.16. Перенапряжения в трансформаторе: a – с заземленной нейтралью, b – с изолированной нейтралью	316
Рис. 17.17. Экранное кольцо в начале обмотки	318
Рис. 17.18. Начальное распределение напряжения у обмотки без экранных колец (1), с экранным кольцом у начала обмотки (2) и вокруг первых катушек (3) и конечное распределение (4)	318
Рис. 17.19. Экранные кольца в начале и вокруг первых катушек обмотки	319

18. Специальные типы трансформаторов

Рис. 18.1. Схема автотрансформатора: a – понижающего, b – повышающего	320
Рис. 18.2. Схемы трёхфазных автотрансформаторов	323
Рис. 18.3. Схема трехобмоточного трансформатора: показан один стержень с обмотками ВН, НН и СН	325
Рис. 18.4. Векторная диаграмма трёхобмоточного трансформатора	327
Рис. 18.5. Схема трехобмоточного трансформатора, питаемого от двух генераторов	329
Рис. 18.6. Принципиальная схема и внешние характеристики сварочного трансформатора	331

Продолжение перечня рисунков

Рис. 18.7. Схемы включения измерительных трансформаторов: <i>a</i> – трансформатора тока; <i>b</i> – трансформатора напряжения	332
Рис. 18.8. Схема включения ваттметра: <i>a</i> – непосредственно; <i>b</i> – через трансформатор тока	333
Рис. 18-9. Трансформатор со скользящими контактами	335
Рис. 18-10. Трансформатор с подвижной вторичной обмоткой	336
Рис. 18-11. Однофазный трансформатор с подмагничиваемым шунтом	337
Рис. 18.12. Схема регулируемого трансформатора с подмагничиванием магнитопровода постоянным током	338
Рис. 18.13. «Пик-трансформатор»: <i>a</i> – схема, <i>b</i> – изменение тока i_1 , потока Φ и ЭДС e ...	339
Рис. 18.14. Устройство однофазного реактора со стальным сердечником и воздушными зазорами δ	341
Рис. 18.15. Поперечная магнитная цепь управляемого реактора с вращающимся магнитным полем	342
Рис. 18.16. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем: режим намагничивания – симметричный	345
Рис. 18.17. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем: предназначен для исследования пространственно-временного спектра поля	345
Рис. 18.18. Зависимость действующих значений 2 и 3-й гармоник ЭДС от 1-й гармоники ЭДС в режимах намагничивания: вынужденное (сплошные линии), симметричное (пунктирные)	346
Рис. 18.19. Вольт амперные характеристики реактора: <i>a</i> – подмагничивается внешнее ярмо ОП1, режим СН2 – пунктирные линии; <i>b</i> – подмагничиваются оба ярма ОП1 и ОП2, режим СН – пунктирные линии; режим ВН – сплошные линии	347
Рис. 18.20. Трансформатор с вращающимся полем	349

Перечень таблиц в Введении, в 14 и 15-м разделах

Введение

Табл. В.1. Векторные величины в электротехнике	36
Табл. В.2. Скалярные величины в электротехнике	37
Табл. В.3. Основные виды электрических машин	69
Табл. В.4. Некоторые свойства магнитно-мягких ферромагнитных материалов	98
Табл. В.5. Магнитные свойства холоднокатаной изотропной стали	114
Табл. В.6. Основные физические свойства обмоточных проводов из меди и алюминия ..	115
Табл. В.7. Технические характеристики электрических щеток	122
Табл. 2. (ГОСТ 32482-2013) Магнитные и технологические свойства тонколистового холоднокатаного проката из электротехнической анизотропной стали для трансформаторов	126
Табл. В.8. Значения удельных потерь в стали и коэффициента β	129

14. Короткое замыкание трансформатора

Табл. 14.1. Значение напряжения короткого замыкания трансформаторов	243
Табл. 14.2. Относительные значения потерь короткого замыкания при номинальной мощности трансформатора	256

15. Работа трансформатора под нагрузкой

Табл. 15.3. Последовательность изображения векторов на диаграммах рис. 15.2	261
---	-----

ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание курса «Электрические машины» излагается в последовательности: трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины, коллекторные машины постоянного и переменного тока и вентильные машины. В соответствии с этим, автором опубликованы четыре одноимённые книги [1, 2, 3]. Они предназначены для студентов вузов и могут быть полезны также инженерам-электрикам, работающим в области производства и эксплуатации электрических машин.

В каждой книге, согласно общим законам преобразования энергии, подробно рассматриваются устройство и вопросы теории нормальных типов электрических машин общепромышленного назначения, применяемых в качестве источников электрической энергии и приводов для различных машин и механизмов. Кроме того, излагаются принципы действия и устройство наиболее распространенных специальных типов электрических машин, в том числе микромашин, используемых в системах автоматического регулирования и управления. В книгах также приведено описание экспериментальных работ по всему лабораторному циклу.

Несколько особое положение занимает Введение, помещенное в начале настоящей книги, посвящённой трансформаторам.

В нём изложены: общие закономерности, лежащие в основе каждой электрической машины как преобразователя энергии; здесь же приводится основная классификация машин по их электромагнитным и конструктивным схемам; основные понятия и законы электротехники в применении к анализу процессов в электрических машинах; основные электромагнитные и конструктивные схемы трансформаторов и электрических машин и др.

Введение включает достаточно подробный материал по теории магнетизма, а также справочный материал по проводниковым, магнитным и изоляционным материалам, необходимый для изложения последующего материала.

Небольшой исторический очерк, помещенный в Введении, касается общих вопросов исторического развития электромашиностроения.

Для более полного представления устройства и понимания теории трансформаторов и электрических машин разработаны мультимедийные материалы (URL-адрес – <http://zabudsky.ru/index100.html>).

Для выполнения практических расчетов основных эксплуатационных характеристик трансформаторов и электрических машин разработаны компьютерные программы, приведенные в расположенном в интернете учебно-методическом комплексе по курсу «Электрические машины» (URL-адрес – <http://zabudsky.ru/index1.html>).

В Приложении рассмотрены вопросы, касающиеся расчёта основных размеров трансформатора. Реализация составленной программы на ПК позволяет осуществить рациональный выбор основных размеров трансформатора на основе вариантного расчета с оптимизацией по минимуму стоимости активной части трансформатора, с учетом ряда ограничений по нормированным параметрам. Этот материал лежит в основе курсового проектирования.

В Приложении также рассмотрены трансформаторы специального назначения, к которым относятся умножители частоты и управляемые и насыщающиеся реакторы с пульсирующим и вращающимся полем. Здесь кратко отражены результаты научной работы автора по направлению: регулируемые электромагнитные устройства для управления режимами электроэнергетических систем; математическое моделирование «анатомии» и «физиологии» устройств на основе теории поля Дж. К. Максвелла (J. C. Maxwell), теории нелинейных цепей и компьютерных технологий (<http://zabudsky.ru/1.html>). Тематика данного раздела предлагается для УИРС и НИРС.

В списке литературы, наряду с традиционными источниками, приведены URL-адреса ряда предприятий, производящих электрические машины и трансформаторы. Использование Интернет–технологий позволит студентам непосредственно ознакомиться с номенклатурой и описанием электротехнической продукции, выпускаемой предприятиями. Также приведена гиперссылка на заключительную видео-лекцию – дайджест курса «Электрические машины» [10, см. с. 446].

Автором книги разработаны и изготовлены стенды для экспериментального исследования трансформаторов (рис. П1, П2 и П3). Реализован фронтальный метод проведения работ. Фотографии и описание стендов, опубликованные книги и мультимедиа–материалы представлены на web–сайте <http://zabudsky.ru>.

Также разработаны и изготовлены стенды для исследования:

- асинхронных машин /см. в [1] с. 12, 181, 214, 248/,
- синхронных машин /см. в [2] с.11, 12/,
- машин постоянного тока /см. в [3] с. 15, 16, 164, 203/.

Автор



Рис. П1. Общий вид лаборатории «Трансформаторов»



Рис. П.2. Общий вид стенда «Трансформатор»

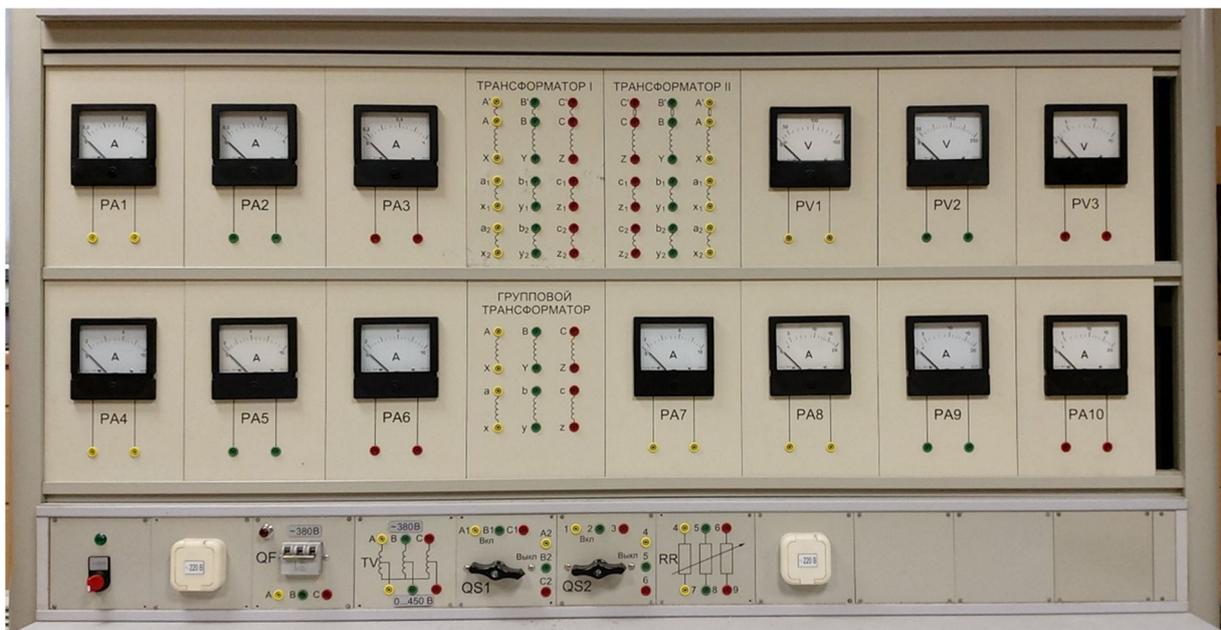


Рис. П.3. Приборная панель стенда «Трансформатор»

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Значение трансформаторов и электрических машин для научно-технического прогресса

Производство электрической энергии осуществляется на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях. Потребление электрической энергии в промышленности, сельском хозяйстве и быту непрерывно возрастает.

Электрическая энергия обладает большим преимуществом по сравнению с другими видами энергии: ее можно передавать на большие расстояния, удобно распределять между потребителями, сравнительно просто и с высоким КПД преобразовывать в другие виды энергии.

Одним из основных видов электротехнического оборудования являются трансформаторы и электрические машины.

Преобразование механической энергии в электрическую осуществляется с помощью электрических генераторов. Генераторы приводятся во вращение приводными двигателями, такими, как паровые, гидравлические и газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания и др. Как правило, электростанции удалены от места потребления электрической энергии на значительное расстояние и связываются с потребителями и между собой линиями электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения 500 – 800 кВ и более. Напряжение генераторов обычно составляет ~ 10 – 20 кВ. Поэтому между генераторами и линией передачи устанавливаются преобразователи энергии переменного тока – повышающие трансформаторы, называемые блочными. После передачи электрической энергии в район потребления производится распределение ее при напряжении, например, 10000, 6000, 3000, 500, 380 и 220 В. Понижение напряжения (чаще всего в несколько ступеней) производится также с помощью трансформаторов, называемых распределительными.

Трансформатор является электромагнитным устройством, не имеющим вращающихся частей. Преобразование энергии в трансформаторах и во вращающихся электрических машинах происходит по одним и тем же законам электротехники, поэтому рабочие процессы в тех и других имеют много общего.

Около 50 % всей электрической энергии на месте потребления преобразуется в механическую энергию с помощью электродвигателей, предназначенных для электропривода различных машин и механизмов [1].

Применение электрических машин и трансформаторов не ограничивается перечисленными областями производства электрической энергии, передачи ее и преобразования в механическую.

В автоматическом управлении и регулировании электрические машины часто используются для получения информации о состоянии системы или для преобразования сигнала управления. В качестве элементов схем автоматики применяются специальные электрические машины, называемые микромашинами: тахогенераторы – для получения электрической информации о скорости вращения вала, вращающиеся трансформаторы – для получения электрического сигнала, пропорционального углу поворота вала или тригонометрической функции этого угла, сельсины – для согласованного поворота (вращения) двух или нескольких валов, управляемые двигатели – для преобразования электрического сигнала в механическую энергию, шаговые двигатели – для преобразования сигнала в поворот вала на фиксированный угол и др. [1, с. 249 – 263; 2, с. 107 – 113, с. 242 – 275; 3, с. 129 – 131, с. 174 – 180].

В.2. Основные этапы развития трансформаторо- и электромашиностроения

Одним из законов, лежащих в основе работы электрических машин и трансформаторов, является закон электромагнитной индукции, открытый в 1831 г. М. Фарадеем. Вслед за этим открытием, уже в 1832 г., были выполнены первые модели электрических генераторов постоянного тока, а в 1834 г. член Петербургской Академии наук Б. С. Якоби построил первый электродвигатель для работы от гальванических элементов.

Первоначально развивались электрические машины постоянного тока сначала магнитоэлектрического типа, т. е. с возбуждением от постоянных магнитов, а затем, начиная с 1860 г., с электромагнитным возбуждением. Уже к середине 80-х годов XIX века машина приобрела все основные черты современной конструкции [3].

По мере увеличения потребления электроэнергии и расширения областей ее применения стала развиваться, наряду с системой постоянного тока, система переменного однофазного тока. В 1878 г. П. Н. Яблочков осуществил первую установку однофазного тока для электроснабжения изобретенных им «свечей Яблочкова». В этой установке он применил индукцион-

ную катушку с разомкнутой магнитной цепью и двумя электрически не связанными обмотками, которая представляла собой трансформатор. Свойства трансформаторов были быстро оценены и в 1885 г. инженеры Дери, Блати и Циперновский (фирма Ганц в Будапеште) получили патенты на ряд конструкций однофазных трансформаторов с замкнутым сердечником из изолированной стальной проволоки.

В 1887 г. Никола Тесла изобрёл двухфазный двигатель, работающий на переменном токе. В 1895 г. на Ниагарской электростанции на американском берегу Ниагарского водопада, высота которого составляла 53 метра, было установлено 10 двухфазных генераторов по 3,7 МВт каждый.

Эпоху в развитии всех областей электроэнергетики и, в частности, электромашиностроения, составила разработка М. О. Доливо-Добровольским системы трехфазного тока. Большой заслугой Доливо-Добровольского явилось изобретение им в 1889 г. трехфазного асинхронного двигателя, а также разработка ряда элементов передачи энергии трехфазного тока на большое расстояние. Это дало возможность уже в 1891 г. на Международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне осуществить первую установку трехфазного тока, состоящую из генератора мощностью 200 кВт на электростанции в Лауффене (на расстоянии 170 км от выставки), трехфазной линии передачи напряжением 15 кВ и двух понижающих подстанций на территории выставки, одна из которых подводит энергию к трехфазному асинхронному двигателю мощностью 75 кВт. С 1887 года М. О. Доливо-Добровольский работал в фирме AEG (Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft).

К началу XX столетия система трехфазного тока получила всеобщее признание и начала широко и быстро развиваться. С этого времени электроэнергетика развивается комплексно, тем не менее успехи электромашиностроения в значительной мере определяют дальнейший технический прогресс.

Важное значение для электромашиностроения в целом имело изобретение в 1901 г. электротехнической стали, содержащей кремний. Применение этой стали позволило значительно снизить массу и размеры машин и трансформаторов без ухудшения их эксплуатационных характеристик. Дальнейшее улучшение материалов для магнитопровода привело к созданию холоднокатаной текстурованной стали, которая имеет по сравнению с горячекатаной сталью лучшие характеристики в направлении проката.

В настоящее время холоднокатаная сталь широко применяется при изготовлении трансформаторов и крупных генераторов.

В области производства электроэнергии новая ступень развития связана с установкой на электростанциях в начале XX столетия синхронных генераторов, непосредственно соединенных с высокоскоростными паровыми турбинами. Основные звенья этого развития – повышение надежности работы турбоагрегатов, увеличение их мощности, совершенствование системы охлаждения. Важным этапом было применение водорода в качестве охлаждающего агента: с 1928 г. для синхронных компенсаторов и с 1937 г. для генераторов большой мощности. Такие машины выполнялись закрытыми с поверхностным охлаждением обмоток, а также сердечников статора и ротора водородом при небольшом избыточном давлении. В настоящее время для крупных двух- и четырехполюсных синхронных генераторов применяется непосредственное охлаждение проводников обмотки ротора водородом и обмотки статора водой при сохранении поверхностного охлаждения водородом сердечника ротора [2].

Параллельно шло развитие многополюсных синхронных генераторов, приводимых во вращение гидравлическими турбинами. Увеличение мощности генераторов достигалось совершенствованием конструкции и улучшением охлаждения. Современные наиболее мощные генераторы имеют непосредственное охлаждение обмотки статора водой [2].

Для развития трансформаторов наибольшее значение имели: устройство маслорасширителей примерно начиная с 10-х годов XX столетия и применение материалов с улучшенными свойствами. В связи с увеличением протяженности линий электропередачи были созданы грозоупорные трансформаторы, а расширение области применения электроэнергии привело к разработке специальных типов трансформаторов.

В области потребления электроэнергии главную роль играет электродвигатель. С начала 90-х годов XIX столетия в промышленности широко применяется изобретенный М. О. Доливо-Добровольским трехфазный асинхронный бесколлекторный двигатель [1], затем – в начале прошлого столетия – были разработаны асинхронные коллекторные двигатели [3] и, наконец, примерно с 1916 г. – синхронный двигатель [2].

В дальнейшем происходило увеличение верхнего предела и уменьшение нижнего предела мощности электродвигателей. В настоящее время построены электродвигатели, мощность которых измеряется десятками тысяч киловатт и микроваттами.

Внедрение электропривода в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в обслуживании быта привело к созданию разнообразных специализированных двигателей как по характеристикам, так и по конструктивному оформлению.

Научно-технический прогресс характеризуется широким применением специальных электрических машин малой мощности. Для этой цели были разработаны и изготавливаются как электродвигатели, так и различные электромашинные элементы автоматических устройств [1, с. 249 – 263; 2, с. 107 – 113, с. 242 – 275; 3, с. 129 – 131, с. 174 – 180].

В.3. Принцип действия электрической машины и трансформатора

Работа электрических машин базируется на физических законах электромагнитной индукции и электромагнитной силы. По закону электромагнитной индукции величина ЭДС, наведенная в замкнутом контуре, пропорциональна скорости изменения потока Φ , пронизывающего этот контур. Направление наведенной ЭДС определяется правилом Э.Х. Ленца, по которому ток, вызванный этой ЭДС, стремится воспрепятствовать изменению потока, пронизывающего контур.

Таким образом, величина наведенной в замкнутом контуре ЭДС

$$e = -d\Phi dt. \quad (B.1)$$

Приведенное выражение закона электромагнитной индукции принадлежит Дж. К. Максвеллу.

Для электрических машин часто удобнее пользоваться другой формулировкой закона электромагнитной индукции, предложенной М. Фарадеем. Рассматривая движение контура вправо в равномерном магнитном поле с постоянной индукцией B (рис. В.1), видим, что поток, охватываемый контуром, изменяется пропорционально уменьшению площади $l \cdot x$ и равен $B \cdot l \cdot x$. Наведенная в контуре ЭДС

$$e = -d\Phi dt = -d(B \cdot l \cdot x) dt = B \cdot l \cdot v. \quad (B.2)$$

Эту ЭДС можно рассматривать наведенной в проводнике длиной l , перемещающемся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B , одинаковой по всей длине l проводника. Направление наведенной в проводнике

ЭДС проще всего определяется *по правилу правой руки*, а именно: ладонь правой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии поля были направлены в ладонь, а большой палец, отогнутый в плоскости ладони на 90° , располагают в направлении движения проводника; тогда остальные пальцы руки, вытянутые в плоскости ладони, покажут направление наведенной в проводнике ЭДС (рис. В.2).

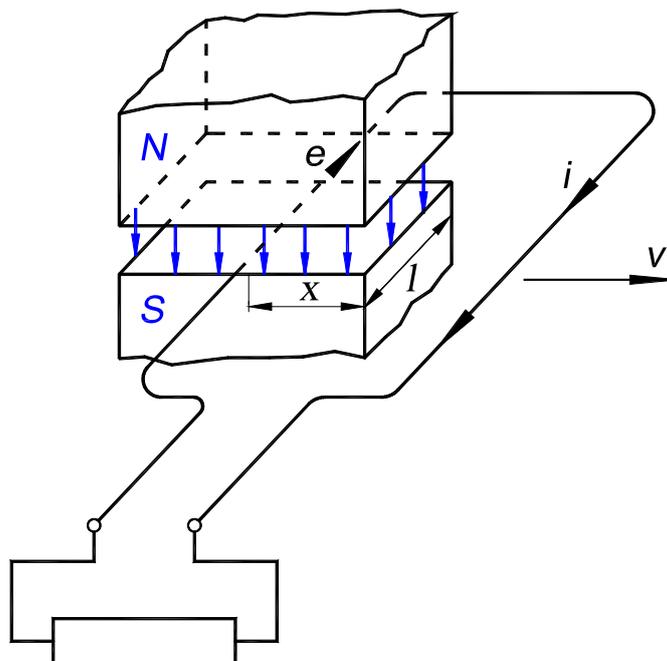


Рис. В.1. Наведение ЭДС в проводнике

Применяя это правило к проводнику на рис. В.1, можно установить, что ЭДС направлена за плоскость чертежа. Такое направление ЭДС и соответственно тока принято обозначать в сечении проводника знаком креста « \times », а противоположное направление их – знаком точки « \bullet ».

Обе приведенные выше формулировки закона электромагнитной индукции равноценны и приводят к одинаковым результатам, но каждая из них имеет свои преимущества в зависимости от того, в каких условиях применяется этот закон.

Электромагнитный механизм должен содержать, во-первых, часть, создающую магнитное поле, и, во-вторых, часть, представляющую собой в общем случае совокупность проводников, пересекающих линии магнитного поля, или контуров, в которых происходит изменение магнитного потока. Физически безразлично, как именно создается магнитное поле. Но в электрических машинах оно чаще всего создается электромагнитным путем с помощью стального сердечника с намотанной на него катушкой, по которой течет электрический ток. Это позволяет создавать поля большой интенсивности, регулировать их и таким образом

воздействовать на рабочие характеристики машины. Точно так же из соображений технической целесообразности проводники обычно делают из меди или из алюминия, так как эти металлы обладают хорошей электропроводностью.

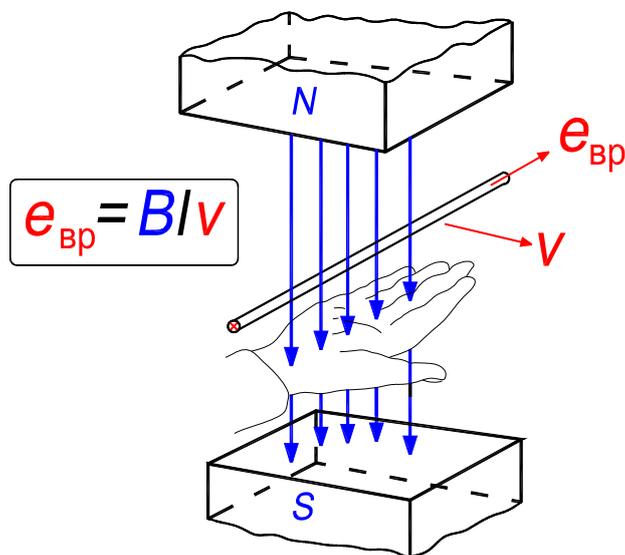


Рис. В.2. Правило правой руки

Наведение ЭДС осуществляется разными путями. Так, например, в машинах постоянного тока поле неподвижно, а проводники вращаются [3]; в синхронных машинах, наоборот, поле вращается, а проводники неподвижны [2]; в асинхронных машинах вращаются и поле и проводники ротора, причем их вращения возможны либо в одну и ту же сторону, либо в разные [1]. В трансформаторах поле и витки катушки неподвижны в пространстве, ЭДС в витках получается за счёт изменения интенсивности поля во времени, т. е. за счет изменения величины магнитного потока, сцепляющегося с витками. Вокруг проводника с током возникает магнитное поле, направление которого определяется по *правилу правого винта*. Если представить себе винт с правой нарезкой, ввинчиваемый в направлении тока, то вращение винта соответствует направлению магнитных линий, окружающих проводник с током.

На рис. В.3,а представлена картина магнитного поля двух полюсов и магнитного поля проводника с током, а на рис. В.3,б – картина результирующего поля. В результате искажения магнитного поля появляется электромагнитная сила $f_{эм}$, которая стремится переместить проводник справа налево.

Если в магнитном поле с индукцией B находится проводник длиной l , перпендикулярный линиям поля, по которому протекает ток i , то величина электромагнитной силы.

$$f_{эм} = B \cdot l \cdot i. \tag{В.3}$$

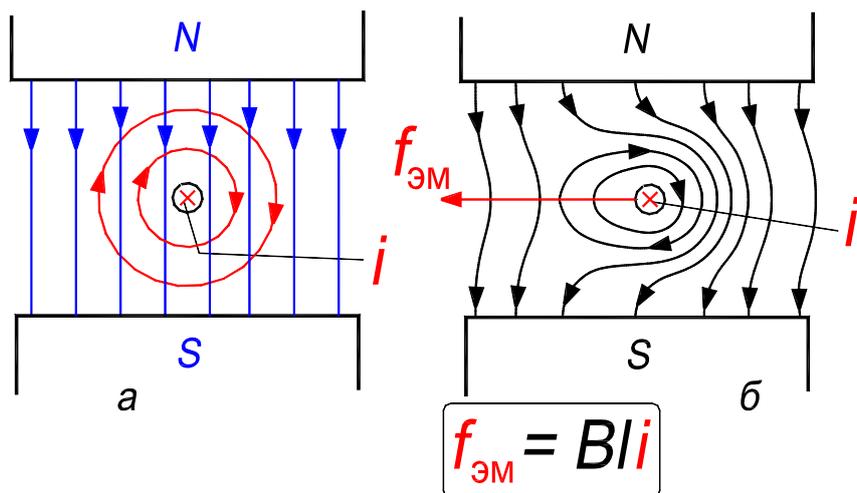


Рис. В.3. Картины магнитных полей:
a – совмещенные поля; *б* – результирующее поле

Направление действия электромагнитной силы определяется *правилом левой руки* (рис. В.4), а именно: ладонь левой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии поля были направлены в ладонь, а четыре пальца руки, вытянутые в плоскости ладони, располагаются в направлении тока; тогда большой палец, отогнутый в плоскости ладони на 90°, покажет направление электромагнитной силы.

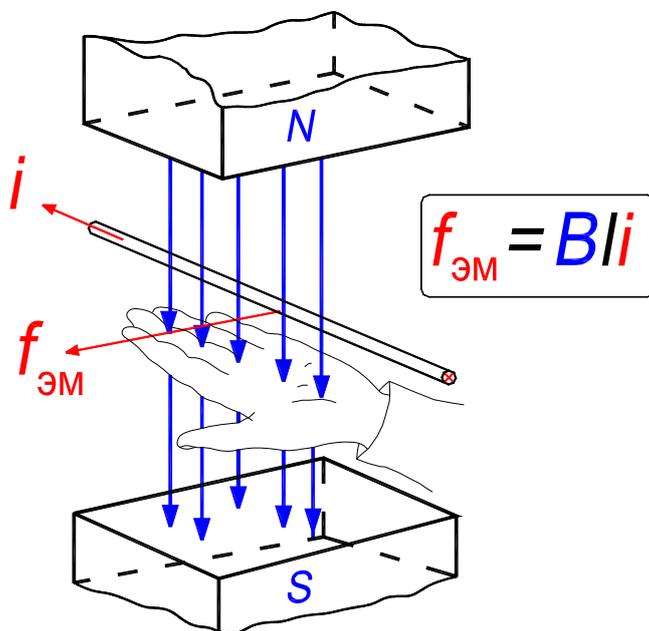


Рис. В.4. Правило левой руки

Электромагнитными силами создается в электродвигателе вращающий момент. В генераторе электромагнитные силы проявляются при нагрузке машины как противодействие вращающему моменту приводного двигателя.

В.4. Основные понятия электротехники в применении к анализу процессов в трансформаторах и электрических машинах

В.4.1. Система единиц физических величин

В книге используется Международная система единиц SI (метр – килограмм – секунда – ампер – градус Кельвина – свеча). В этой системе магнитная проницаемость вакуума – магнитная постоянная – составляет [20]

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; \quad (\text{В.4})$$

диэлектрическая проницаемость – электрическая постоянная –

$$\varepsilon_0 = 10^{-9}/36 \cdot \pi \text{ Ф/м}.$$

Значения величин μ_0 и ε_0 являются неизменными ($\mu_0 = \text{const}$, $\varepsilon_0 = \text{const}$) и связаны со скоростью света соотношением

$$c_0 = 1/\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0} = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

где c_0 – скорость света в вакууме.

Приведенные выше значения практически справедливы и для воздуха.

В системе единиц СГС (сантиметр-грамм-секунда) $\mu_0 = 1$, $\varepsilon_0 = 1$.

В системе SI (фр. *Système international d'unités*, SI) математические соотношения пишутся в рационализированной форме, при которой множитель $4 \cdot \pi$ устранён из часто встречающихся формул (например, из формул для МДС, закона Ома для магнитной цепи, коэффициента самоиндукции), но входит в выражения для μ_0 и ε_0 .

В.4.2. Векторные и скалярные величины в электротехнике

Векторной называется величина, значение которой определяется как размером (модулем), так и *направлением в пространстве*.

Буквенное обозначение вектора выделяется жирным прямым шрифтом, например «**A**»; та же буква, представленная «светлым» наклонным шрифтом, обозначает модуль вектора — «*A*».

Скалярной называется величина, значение которой определяется только положительным или отрицательным числом («скаляром»).

В таблицах В.1 и В.2 представлены соответственно векторные и скалярные величины в электротехнике.

Таблица В.1. Векторные величины в электротехнике

Векторная величина	Буквенное обозначение	Единица измерения
Напряженность электрического поля	E	В/м
Электрическая индукция (электрическое смещение)	D	Кл/м ²
Напряженность магнитного поля	H	А/м
Магнитная индукция (плотность магнитного потока)	B	Тл (Вб/м ²)
Плотность электрического тока	J	А/м ²
Векторный магнитный потенциал	A	Тл·м
Вектор силы	F	Н
Вектор скорости	v	м/с
Единичные векторы (орты) прямоугольной системы координат	i, j, k	–
Единичные векторы цилиндрической системы координат	i_r, i_θ, k	–
Вектор элемента длины	dl	м

Над векторами выполняются операции [5, 7]:

1. Скалярное произведение векторов, знак операции «•»;
2. Векторное произведение векторов, знак операции «×»;
3. Дифференцирование по пространственным координатам, операторы:
 - 3.1. Градиент, grad;
 - 3.2. Дивергенция, div;
 - 3.3. Ротор, rot;
 - 3.4. Оператор Гамильтона, $\nabla = \mathbf{i}\partial/\partial x + \mathbf{j}\partial/\partial y + \mathbf{k}\partial/\partial z$;
 - 3.5. Оператор Лапласа, Δ.

Таблица В.2. Скалярные величины в электротехнике

Скалярная величина	Буквенное обозначение	Единица измерения
Сила электрического тока	I	А
Электрическое напряжение, электродвижущая сила, электрический потенциал	U, E, φ	В
Электрический заряд	q	Кл
Объёмная плотность электрического заряда	ρ	Кл/м ³
Поток электрической индукции	Ψ	Кл
Электрическая ёмкость	C	Ф
Электрическое сопротивление	R, X, Z	Ом
Электрическая проводимость	G	См
Удельная электрическая проводимость	γ^*	См/м
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	ϵ_a^*	В/м
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon = \epsilon_a/\epsilon_0$	о. е.
Поток магнитной индукции, магнитный поток	Φ	Вб
Магнитодвижущая сила, магнитный скалярный потенциал	F, φ_m	А
Индуктивность, взаимная индуктивность	L, M	Гн
Магнитное сопротивление	R_m	1/Гн
Магнитная проводимость	G_m	Гн
Абсолютная магнитная проницаемость	μ_a^*	Гн/м

Скалярная величина	Буквенное обозначение	Единица измерения
Относительная магнитная проницаемость	$\mu = \mu_a/\mu_0$	д. е.
Мощность (активная)	P	Вт
Полная мощность**	S	В·А
Реактивная мощность**	Q	вар

* **Среда, в которой распределяется электромагнитное поле, называется:** 1) **неоднородной**, если ее электрофизические свойства ($\mu_a, \epsilon_a, \gamma$) изменяются от точки к точке, т. е. являются функциями пространственных координат; 2) **нелинейной**, если свойства среды зависят от изменения модулей векторов электромагнитного поля и (или) температуры; 3) **анизотропной**, если свойства среды имеют неодинаковые значения по различным осям в пространстве, т. е. зависят от направления векторов электромагнитного поля (см. разд. В.10.9 и В.11, с. 104, сл.).

** внесистемные единицы, допускаемые к применению в электротехнике.

В.4.3. Изображение периодически изменяющихся величин в электротехнике

В теории электрических машин и трансформаторов есть много физических величин, которые изменяются *периодически*, как функция времени t , по гармоническому закону, т. е. по закону синуса или закону косинуса (см. рис. В.5). К ним относятся, например, напряжение, ЭДС, электрические ток, мощность и др.

В промышленности основным генератором синусоидальных ЭДС являются синхронные генераторы [3], установленные на электростанциях мира.

Эти величины представляются в виде:

- мгновенных значений ЭДС e , напряжения u , тока i , мощности p , ...;
- амплитудных значений $E_m, U_m, I_m, P_m, \dots$;
- действующих значений E, U, I, P, \dots ;
- средних значений $E_{\text{ср}}, U_{\text{ср}}, I_{\text{ср}}, P_{\text{ср}}, \dots$

Например, выражение для мгновенного значения тока записывается так

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (\text{В.5})$$

где ω – угловая (или круговая) частота, рад/с; t – текущее значение времени, с; ψ_i – начальная фаза тока, рад, определяющая его значение при $t = 0$ с; $(\omega t + \psi_i)$ – текущее значение фазы тока или фазового угла, рад. (см. рис. В.5).

При этом угловая частота $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, где f – линейная частота, Гц; T – период изменения тока, с. Угловая частота ω характеризует скорость изменения фазы тока.

Действующее значение тока, изменяющегося по гармоническому закону, $I = I_m/\sqrt{2}$; среднее значение – $I_{cp} = 2I_m/\pi$.

Выражение для мгновенного значения напряжения записывается в виде (рис. В.5)

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (\text{В.6})$$

где ψ_u – начальная фаза напряжения, рад, определяющая его значение при $t = 0$ с.

Разность начальных фаз напряжения и тока называется углом сдвига фаз между ними

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (\text{В.7})$$

Большинство электроизмерительных приборов проградуированы в действующих значениях величин.

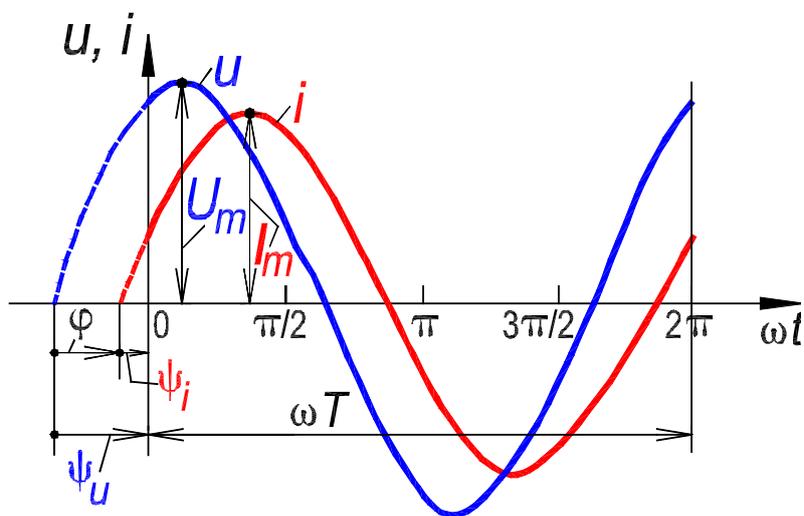


Рис. В.5. Волновые диаграммы изменения напряжения и тока

Гармонические функции времени представляются следующими формами:

- тригонометрической функцией [выражения (В.5) и (В.6)];
- волновыми диаграммами изменения синусоидальной величины во времени (рис. В.5);
- вращающимися («временными») «радиус-векторами» (рис. В.6);
- комплексными числами (рис. В.7).

На рис. В.5 приведены волновые диаграммы – график изменения напряжения и тока от времени t (от угла ωt).

Физические величины изменяющиеся во времени по гармоническому закону, например тока, изображаются в форме вращающихся «временных радиус-векторов» на том основании, что их длина равна амплитуде величины, а фаза это угол между вращающимся вектором и осью абсцисс X (см. рис. В.6, а, б). Проекция «временного радиуса-вектора» на ось ординат Y определяет мгновенное значение величины.

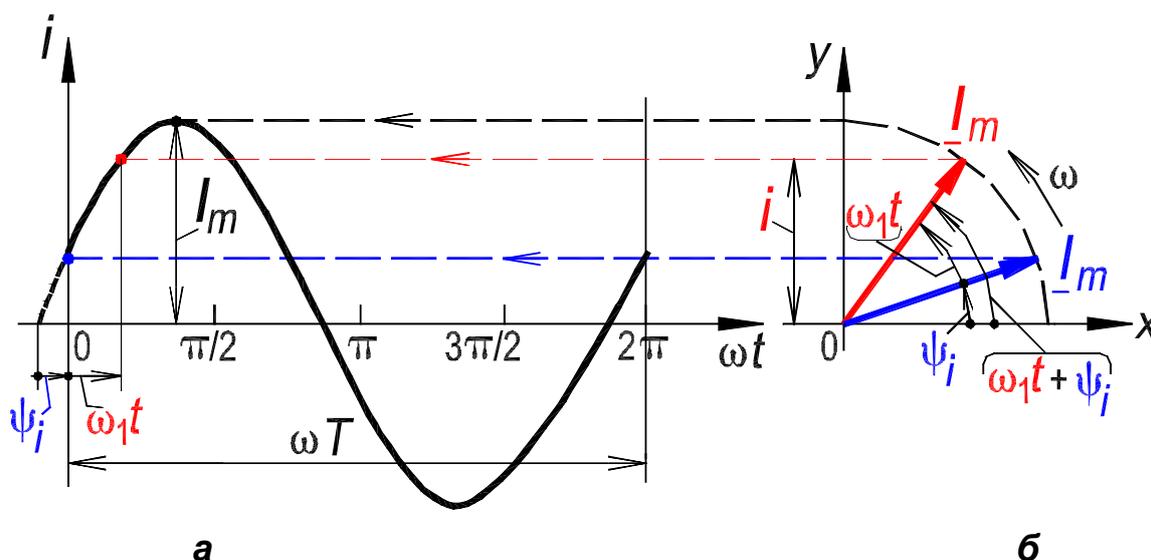


Рис. В.6. Представление синусоидальной функции тока в форме вектора:
 а – волновая диаграмма тока; б – изображение тока в форме вектора

За положительное направление вращения «временного радиуса-вектора» (с угловой частотой ω) принято направление против хода часовой стрелки.

Вращающиеся «временные радиус-векторы» не имеют ничего общего с физическими векторами, имеющими направление в пространстве (табл. В.1). Направление «радиус-векторов» указывает только фазу во времени. В дальнейшем «временные радиус-векторы» будем называть векторами, а кавычки опускать; эти векторы обозначаются соответствующими прописными буквами, подчёркнутыми снизу.

С помощью векторов напряжений, ЭДС, токов, вращающихся с одной и той же угловой частотой ω , изображаются в общей системе координат *векторные диаграммы* (см. рис. 15.2, с. 261). Они дают наглядное представление об амплитудах (действующих значениях), начальных фазах и углах сдвига фаз указанных величин и др.

Синусоидальные функции времени, например, тока [выражение (В.5)], изображаются также комплексными числами. При этом на плоскости комплексных чисел (рис. В.7) из начала координат под углом ψ_i к оси действительных чисел (вещественная ось +1) проводят вектор \underline{I}_m концу которого соответствует определенное комплексное число. Комплексная амплитуда синусоидальной величины тока определяется выражением $\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$ (это показательная форма записи комплексного числа). Для действующих значений тока это выражение преобразуется к виду: $\underline{I} = I e^{j\psi_i}$.

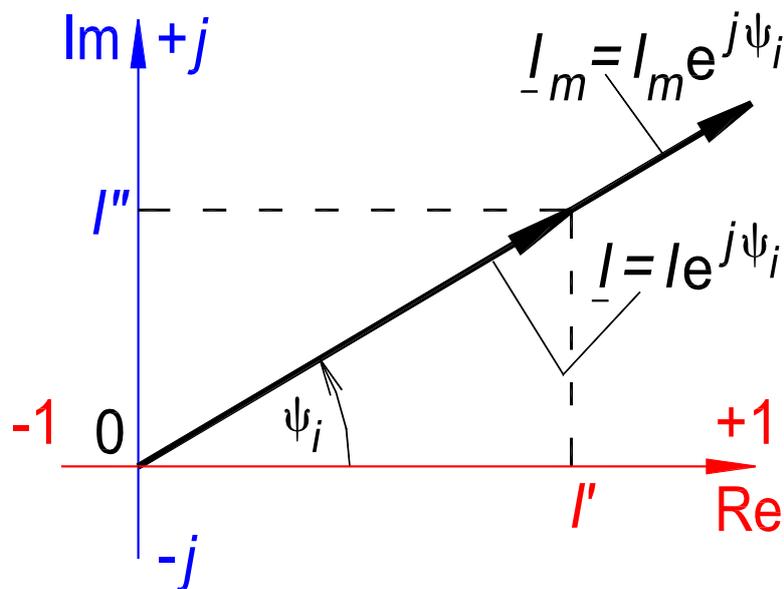


Рис. В.7. Представление синусоидальной функции тока в форме комплексного числа

С увеличением времени фаза $(\omega t + \psi_i)$ тока возрастает, при этом угол между радиусом-вектором и осью +1 действительных величин Re увеличивается, радиус-вектор поворачивается на соответствующий угол (против хода часовой стрелки, см. рис. В.6).

Комплексное число представляет собой сумму действительной и мнимой частей (это алгебраическая форма записи комплексного числа, рис. В.7):

$$\underline{I} = I' + jI'' = \text{Re } \underline{I} + j\text{Im } \underline{I},$$

где I' – вещественная (действительная) часть комплексного числа; jI'' – мнимая; Re и Im – символы, обозначающие действительную и мнимую части комплексного числа ($\text{Re } \underline{I} = I'$; $\text{Im } \underline{I} = I''$).

Тригонометрическая форма записи комплексного числа (рис. В.7)

$$\underline{I} = I(\cos \psi_i + j\sin \psi_i).$$

В формах записи комплексного числа фигурирует символ $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, с помощью которого из комплексного числа выделяется его мнимая составляющая. Умножение вектора \underline{I} на множитель j соответствует повороту его на угол, равный $\pi/2$ в положительном направлении (против хода часовой стрелки), а умножение на $-j$ – повороту в отрицательном направлении (по ходу часовой стрелки).

В.5. Основные законы электротехники в применении к анализу процессов в электрических машинах и трансформаторах

В.5.1. Магнитный поток. Принцип непрерывности магнитного потока

Изменяющееся электрическое и магнитное поля неразрывно связаны между собой, так как отражают две стороны единого электромагнитного поля. Выражением их связи являются закон полного тока (разд. В.5.2) и закон электромагнитной индукции (разд. В.5.3). Действие электрических машин и трансформаторов, является следствием *наличия магнитного поля и протекающего по проводникам тока*.

Магнитное поле есть часть пространства, в котором происходят физические явления, называемые магнитными явлениями (индукция, электромагнитная сила, etc.). Картина магнитного поля основана на взглядах М. Фарадея, представлявшего себе магнитное поле как пространство, в котором распределены «*физические силовые линии*», называемые *магнитными* линиями.

Изображение полей при помощи магнитных линий дает большую наглядность при изучении процессов в электрических машинах и трансформаторах. Направление линий связано с направлением тока *правилом правого винта*. На рис. В.8,*а* изображено нормальное сечение провода, причём ток i уходит от наблюдателя, что показано косым крестом « \times », изображающим хвост стрелки. В том случае, когда ток направлен на наблюдателя, ставят условную точку « \cdot », изображающую острие стрелки. Магнитные линии служат для определения направления вектора напряженности \mathbf{H} магнитного поля (вектор совпадает с касательной к линии), и для определения величины этой напряженности, если измерять ее числом линий на единицу площади S , взятой перпендикулярно направлению вектора напряженности.

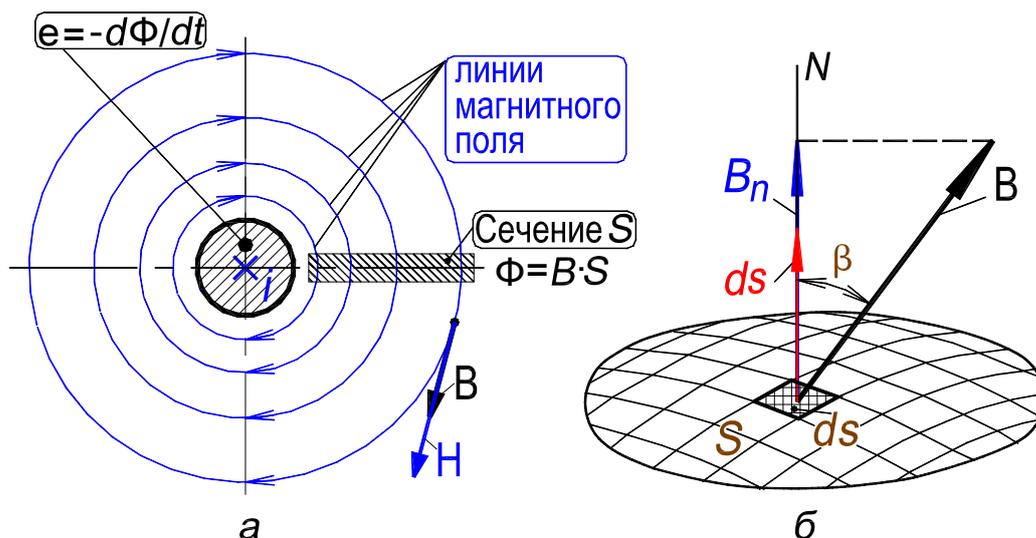


Рис. В.8. К определению направления линий поля, созданных током i – (а);
поток вектора магнитной индукции сквозь поверхность S – (б)

В изотропной среде (см. разд. В.10.9 и В.11, с. 104, сл.) направление вектора магнитной индукции \mathbf{B} совпадает с вектором магнитной напряженности \mathbf{H} . Если среда линейная, например, воздух, или ненасыщенная изотропная электротехническая сталь, то связь между векторами имеет вид:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad \text{или} \quad B = \mu_0 H,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная).

При нелинейной среде, например, насыщенной изотропной электротехнической стали

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} \quad \text{или} \quad B = \mu_r \mu_0 H,$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость, составляющая для насыщенной стали $\sim 10^3 - 10^4$; величина μ_r отражает тот факт, что магнитное поле в электротехнической стали существенно больше чем в воздухе. Именно в связи с этим магнитопроводы трансформаторов и электрических машин выполняются из электротехнической стали, являющейся ферромагнитным материалом.

Введем понятие о потоке вектора индукции магнитного поля сквозь некоторую поверхность.

Представим в магнитном поле поверхность S , ограниченную некоторым контуром (рис. В.8, б). Обозначим через β угол между вектором \mathbf{B} и условно выбранной положительной нормалью N к поверхности в некоторой ее точке. Составляющая вектора \mathbf{B} , нормальная к элементу поверхности

ds , равна $B_n = B \cos \beta$. Интеграл от произведений элементов поверхности на составляющие вектора индукции, нормальные к этим элементам, распространенный по всей поверхности S , носит название потока вектора индукции сквозь эту поверхность. Поток вектора индукции магнитного поля сквозь поверхность S , который обозначим через Φ_S , равен:

$$\Phi_S = B \cos \beta ds.$$

Магнитный поток Φ_S дает интегральную оценку магнитного поля.

Обозначив через $d\mathbf{s}$ вектор, длина которого численно равна поверхности элемента ds , а направление совпадает с направлением положительной нормали N к этому же элементу, напишем выражение потока сокращенно в векторной форме:

$$\Phi_S = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

где $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \cos \beta ds$ есть скалярное произведение векторов \mathbf{B} и $d\mathbf{s}$. Поток вектора индукции Φ_S есть величина скалярная.

Принцип непрерывности магнитного потока, имеющий в теории электромагнитных явлений фундаментальное значение, гласит, что магнитные линии нигде не имеют ни начала, ни конца. Каждая магнитная линия представляет собой замкнутый контур (рис. В.8,а). Магнитные линии не могут быть разрезаны или разорваны, и обнаружение концов их ни в каких процессах, происходящих в магнитном поле, невозможно.

Математически принцип непрерывности магнитного потока формулируется следующим образом:

$$\Phi_S = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0.$$

Таким образом, полный магнитный поток, пронизывающий данную замкнутую поверхность, равен нулю.

Если вектор магнитной индукции одинаков во всех точках поля ($\mathbf{B} = \text{const}$) и параллелен вектору $d\mathbf{s}$, то угол $\beta = 0$ и магнитный поток

$$\Phi_S = B \cos \beta ds = B ds = B \cdot S. \quad (\text{В.8})$$

В.5.2. Закон полного тока

Закон полного тока для магнитной цепи формулируется так: линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля вдоль замкнутого

контура [циркуляция вектора напряженности] (рис. В.9) равен алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром:

$$\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H \cos \beta dl = \sum i, \quad (\text{В.9})$$

где \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля в какой-либо точке произвольного контура интегрирования; $d\mathbf{l}$ – вектор элемента длины этого контура; $\sum i$ – величина полного тока, который охватывается контуром интегрирования; β – угол между направлением перемещения и направлением магнитной силовой линии.

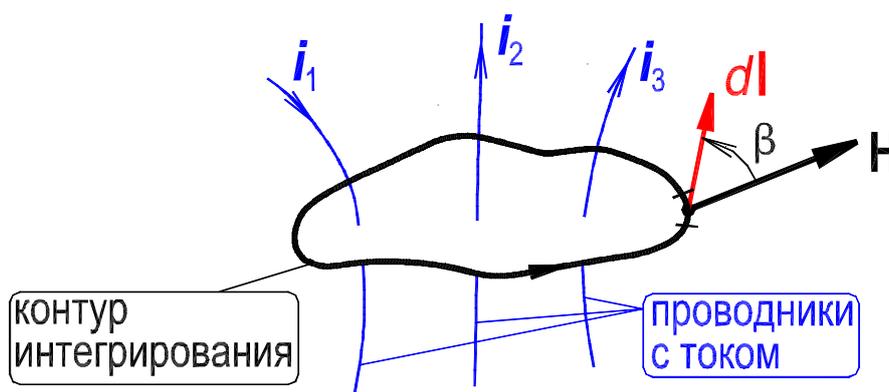


Рис. В.9. К иллюстрации закона полного тока

Часто за путь интегрирования выбирают самую магнитную силовую линию, тогда $\cos \beta = 1$ и уравнение (В.9) упрощается

$$H dl = \sum i. \quad (\text{В.10})$$

Кроме того, магнитопровод в большинстве случаев можно разбить на такие участки, вдоль каждого из которых напряженность поля $H \approx \text{const}$. В этом случае левая часть выражения (В.10) преобразуется в сумму $\sum H_k l_k$, где H_k – напряженность поля на k -м участке, а l_k – длина средней магнитной линии k -го участка. Если контур интегрирования охватывает не отдельные проводники с токами, как на рис. В.9, а катушку, имеющую w витков, то полный ток равен $i \cdot w$. Поэтому закон полного тока для магнитной цепи записывается так:

$$\sum H_k l_k = i \cdot w = F. \quad (\text{В.11})$$

Произведение тока на число витков, $i \cdot w = F$, называется магнитодвижущей силой (МДС), она действует по замкнутому контуру, является скалярной величиной, обозначаемой буквой F , и измеряется в амперах.

Для k -го участка, с учётом (В.11), справедлива запись

$$H_k l_k = (B_k / \mu_{a.k}) l_k = (\Phi / \mu_{a.k} \cdot S_k) l_k = \Phi \cdot l_k / \mu_{a.k} \cdot S_k = \Phi \cdot R_{M.k} = F_k, \quad (\text{B.12})$$

где $\mu_{a.k}$ – абсолютная магнитная проницаемость k -го участка магнитной цепи, Гн/м; $R_{M.k} = l_k / \mu_{a.k} \cdot S_k$ – магнитное сопротивление k -го участка магнитопровода, 1/Гн; F_k – МДС k -го участка магнитной цепи.

МДС для всей магнитной цепи запишется как сумма МДС участков

$$F = \sum F_k = \Phi \cdot R_M, \quad (\text{B.13})$$

где R_M – магнитное сопротивление всей цепи.

Выражение (B.13), $F = \Phi \cdot R_M$, носит название *закона магнитной цепи* аналогичного закону Ома для электрической цепи. Отличие заключается в том, что сопротивление электрической цепи трансформатора и электрической машины не зависит от электрического тока (если не принимать во внимание влияние нагрева), а магнитное сопротивление зависит от магнитного потока в связи с нелинейной зависимостью $B = f(H)$ ферромагнитного материала магнитопровода (см. разд. В.10.9 и В.11, с. 104, сл.).

В.5.3. Закон электромагнитной индукции

А. Формулировка Максвелла

Закон электромагнитной индукции в применении к электромагнитным устройствам, например, трансформаторам, обычно принимается в виде, данном Дж. К. Максвеллом (James Clerk Maxwell):

$$e = - d\Phi/dt, \quad (\text{B.14})$$

причем ЭДС e , индуцируемая в некотором контуре, зависит только от скорости изменения магнитного потока, проходящего сквозь контур. Эта ЭДС не зависит от вещества, формы и размеров проводников, из которых контур выполнен.

ЭДС есть причина, способная вызывать электрический ток в цепи. ЭДС, действующая вдоль какого-либо пути, равна линейному интегралу вектора напряженности электрического поля вдоль этого пути. Если контур, в котором происходит изменение магнитного потока, представляет собой сложную электрическую цепь, которую можно разбить на n простых контуров, и если в каждом простом контуре происходит изменение магнитных потоков $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$, то

$$e_1 = - d\Phi_1/dt, \quad e_2 = - d\Phi_2/dt, \quad \dots, \quad e_n = - d\Phi_n/dt.$$

Тогда

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = \sum_1^n \Phi_n = \Psi$$

и

$$e_1 + e_2 + \dots + e_n = \sum_1^n e_n = -d\Psi/dt, \quad (\text{В.14а})$$

где Ψ есть общее число потокосцеплений с контуром.

В большинстве случаев в электромагнитных устройствах оказывается возможным принимать $\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_n$ и $e = -w d\Phi/dt$, где w – число отдельных витков, охватывающих поток Φ , и, следовательно, $w \cdot \Phi = \Psi$.

Знак «минус» в выражении для индуцированной ЭДС (В.14) свидетельствует о том, что эта ЭДС стремится вызвать токи, направленные таким образом, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока (см. рис. В.8,а). Это положение выражает собой сформулированный Э.Х. Ленцем *принцип электромагнитной инерции*.

Б. Формулировка Фарадея

В ряде случаев при изучении электрических машин пользуются *законом электромагнитной индукции* в форме

$$e = Blv, \quad (\text{В.14б})$$

являющейся следствием формулировки М. Фарадея (Michael Faraday), согласно которой ЭДС, индуцируемая в некотором контуре, зависит исключительно от скорости перерезывания магнитных линий контуром и не зависит от вещества, формы и размеров поперечного сечения проводника, из которого контур состоит. В этой формуле: B – магнитная индукция в данной точке; l – активная длина прямого проводника в пределах однородного магнитного поля с индукцией B , расположенного в плоскости, перпендикулярной направлению магнитных линий; v – скорость движения проводника в плоскости, нормальной к B , в направлении, перпендикулярном к l .

Направление индуцированных в проводниках ЭДС, определяется по правилу правой руки, см. рис. В.2.

Из закона электромагнитной индукции в форме $e = -d\Phi/dt$ следует, что для получения ЭДС постоянного направления необходимо иметь изменение потока в одну сторону. Создать непрерывное изменение потока в одном направлении в течение длительного промежутка времени невозможно,

и, следовательно, невозможно получить без переключения контура постоянную ЭДС только путем чистой электромагнитной индукции. Из этого положения вытекает принципиальная невозможность построить машину постоянного тока без коллектора [3, с. 37, сл.].

В.5.4. Энергия магнитного поля и электромагнитная сила

Энергия магнитной системы распределена по всему пространству, в котором обнаруживается действие электромагнитных сил. Значение этой энергии можно найти, исходя из закона Ома, в общем виде

$$i = (e - d\Psi/dt)/R \text{ или } e = i \cdot R + d\Psi/dt.$$

Элементарная работа dA , совершаемая током в этом контуре,

$$dA = e \cdot i \cdot dt = i^2 \cdot R \cdot dt + i \cdot d\Psi.$$

Элементарная работа, затрачиваемая на изменение магнитного состояния среды, $dA_m = i \cdot d\Psi$ и запас энергии W_0 в единице объема

$$W_0 = \mu \int_0^H H dH = \mu H^2/2$$

при условии $\mu = \text{const}$.

Полная энергия во всем объеме, занятом магнитным потоком (при $\mu = \text{const}$),

$$W = \int (\mu H^2/2) dv = Li^2/2. \quad (\text{B.15})$$

Это выражение дает запас энергии, связанной с контуром, по которому протекает ток i . Здесь $L \cdot i = \Psi$ представляет собой полное потокосцепление с контуром тока i . Всякое изменение потокосцепления Ψ приводит к электромагнитной реакции в виде возникновения ЭДС самоиндукции e_s и вызванного ею тока i_s . Любая электромагнитная система в силу наличия своеобразной электромагнитной инерции стремится удерживать на определенном уровне сцепленный с контуром магнитный поток.

В большинстве электромагнитных устройств существуют два или более электромагнитно-связанных контура. Электромагнитная энергия двух контуров выражается следующим образом:

$$W_{12} = \int (\mu H^2/2) dv = L_1 i_1^2/2 + L_2 i_2^2/2 + M_{12} i_1 i_2. \quad (\text{B.15a})$$

Индуктивности L_1 и L_2 контуров могут не зависеть от их взаимного положения. Взаимоиндуктивность же M_{12} зависит от относительного расположения

контуров, поэтому всякое их взаимное перемещение при постоянстве токов в контурах приводят к изменению связанной с контурами энергии W_{12} и, следовательно, указывает на наличие сил механического взаимодействия.

Если x – геометрическая координата, от которой зависит взаимное расположение контуров, то электромагнитная сила

$$f = dW_{12}/dx = i_1 i_2 dM_{12}/dx. \quad (B.16)$$

Электромагнитные силы стремятся так изменить взаимное расположение контуров, чтобы увеличить поток взаимной индукции и тем самым при неизменных токах увеличить энергию системы.

В электрических машинах в ряде случаев бывает трудно вычислить приращение потока, связанного с данным контуром; поэтому удобнее пользоваться выражением, позволяющим определить электромагнитную силу, действующую на отдельный элемент контура.

Если элемент проводника dl (рис. B.10) какого-либо контура с током i находится в магнитном поле и перемещается на величину dx , то получающееся приращение потока $d\Phi$ будет

$$d\Phi = B \cos \alpha dl dx = B \sin \varphi dl dx.$$

Величина элементарной электромагнитной силы, действующей на участок dl , будет

$$df = i \cdot d\Phi/dx = B \cdot i \cdot \sin \varphi dl.$$

Сила, действующая на конечный участок проводника l ,

$$f = \int_0^l B \cdot i \sin \varphi dl \quad (B.17)$$

Если магнитное поле однородно и проводник прямолинеен, то

$$f = B \cdot l \cdot i \cdot \sin \varphi. \quad (B.17a)$$

Таким образом, в электродинамических системах возникают электромагнитные силы, стремящиеся создать такие движения контуров, при которых внешний поток, связанный с каждым из составляющих систему контуров, мог бы получить положительное приращение в случае постоянства всех токов.

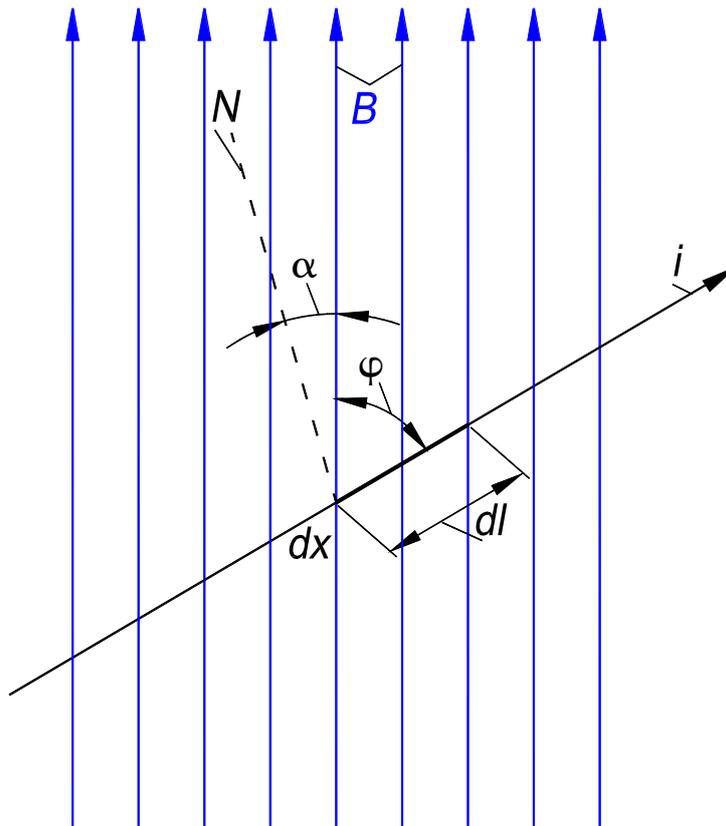


Рис. В.10. Электромагнитная сила, действующая на отдельный элемент контура

В.5.5. Общая модель электромагнитного поля Максвелла

Все электромагнитные явления, которые рассматриваются при анализе классических электротехнических устройств (к ним относятся трансформаторы и электрические машины), описываются четырьмя уравнениями Максвелла в частных производных, имеющими силу закона. Эти уравнения он сформулировал на основании эмпирических законов открытых Био и Саваром (1820 г.) и Фарадеем (1831 г.) и опубликовал в 1873 году в «Трактате об электричестве и магнетизме». Если пренебречь током смещения, что допустимо для трансформаторов и электрических машин общепромышленного назначения, то уравнения записываются в виде:

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} \quad \text{— электромагнитная связь,} \quad (\text{В.18})$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t \quad \text{— -, -,} \quad (\text{В.19})$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad \text{— уравнения непрерывности,} \quad (\text{В.20})$$

$$\text{div}\mathbf{D} = \rho \text{ или } = 0 \quad \text{— -, -,} \quad (\text{В.21})$$

Эти уравнения при использовании символического вектора-оператора набла ∇ (оператор Гамильтона) представляются в виде [5, 7]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J},$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \text{ или } = 0.$$

В уравнении (В.18) вектор плотности тока проводимости определяется суммой трех слагаемых:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{тр}} + \mathbf{J}_{\text{вр}} + \mathbf{J}_{\text{ст}} = \gamma \mathbf{E} + \gamma (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \gamma \mathbf{E}_{\text{ст}},$$

где 1-е слагаемое обусловлено изменением модуля вектора магнитной индукции во времени, это так называемая «трансформаторная» составляющая; 2-е слагаемое обусловлено движением среды со скоростью \mathbf{V} по отношению к магнитной индукции \mathbf{B} , это так называемая составляющая «вращения»; 3-е слагаемое это плотность стороннего тока, подводимого извне или обусловленного сторонними ЭДС неэлектромагнитного происхождения (ЭДС термоэлектрические, диффузионные, эффекта Холла и т. д.).

Уравнения (В.18 – В.21) дополняются материальными уравнениями

$$\mathbf{D} = \varepsilon_a \mathbf{E}, \tag{В.22}$$

$$\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}, \tag{В.23}$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}, \tag{В.24}$$

которые характеризуют макроскопические свойства среды посредством диэлектрической проницаемости ε_a , магнитной проницаемости μ_a и удельной электрической проводимости γ . Уравнения (В.22) – (В.24) записаны в предположении изотропной и линейной среды.

Если материалы изотропны и нелинейны, то ε_a , μ_a и γ – величины переменные. Величина μ_a является функцией напряженности магнитного поля, $\mu_a = f(\mathbf{H})$, что обусловлено нелинейными свойствами электротехнической стали. Величина ε_a может зависеть от напряженности электрического поля, $\varepsilon_a = f(\mathbf{E})$. Нелинейность электрических проводников обусловлена влиянием температуры T на удельную электрическую проводимость, $\gamma = f(T)$.

Наиболее важным вопросом является учет нелинейности кривой намагничивания электротехнической стали.

Первые два уравнения (В.18) и (В.19) в системе уравнений Максвелла определяют взаимосвязь изменений электрического и магнитного полей (электрической и магнитной сторон электромагнитного поля).

Из первого уравнения (В.18) следует, что электрический ток сопровождается вихревым магнитным полем. Это уравнение представляет собой закон полного тока в дифференциальной форме (см. разд. В.5.2).

Из второго уравнения (В.19) следует, что изменяющееся магнитное поле сопровождается электрическим. Это уравнение представляет собой дифференциальную форму закона электромагнитной индукции (см. разд. В.5.3).

Третье уравнение (В.20) выражает принцип непрерывности магнитного поля и отражает тот факт, что магнитных зарядов в изолированном виде в природе нет, то есть линии магнитного поля являются кольцевыми.

Четвертое уравнение (В.21), при принятом условии $\rho = 0$, свидетельствует, что в данной точке поля нет ни истоков, ни стоков линий электрической индукции, то есть в данной точке линии вектора \mathbf{D} не начинаются и не заканчиваются.

Уравнения Максвелла решаются различными численными методами, например, методом конечных элементов, рассмотрение которого выходит за рамки данной книги. Читатель может ознакомиться с этим методом и результатами расчёта магнитного поля в устройствах электроэнергетического назначения [5, 7].

Наиболее общий подход к решению задач электромеханики состоит в рассмотрении движения тела, несущего ток и заряд, в электрическом и магнитном полях. Это может быть сделано с помощью уравнений Максвелла, однако необходимость определения граничных условий при анализе этих уравнений делает этот подход излишне сложным для студентов.

В данной книге используется более практичный метод решения задач электромеханики. Трансформаторы и электрические машины рассматриваются как совокупность электрических и магнитных цепей с сосредоточенными параметрами, в том числе и с нелинейными.

В.6. Основные электромагнитные схемы трансформаторов и электрических машин

Преобразование энергии, осуществляемое при помощи электрической машины, основано на явлении электромагнитной индукции. Возможно создание электрической машины также на принципе электростатической индукции, однако такие машины широкого практического применения не получили (разд. В.6, Д, с. 68, сл.).

Электрическая машина имеет две основные части: 1) магнитную – обычно в виде магнитной системы из ферромагнитного материала и 2) электрическую – в виде двух или нескольких обмоток. Обмотки или взаимно неподвижны (трансформаторы), или могут перемещаться одна относительно другой совместно с частями сердечника, на которых они размещены (вращающиеся электрические машины).

В процессе работы электрической машины происходит непрерывное изменение магнитного потока в магнитной системе или отдельных ее частях, совершаемое обычно по гармоническому (или близкому к нему) закону. При этом в магнитной системе и вне её возникает переменное электрическое поле, интеграл напряженности которого по контуру l_B витков, размещенных на сердечнике, равен наводимой в них ЭДС e_B :

$$\oint E dl_B = e_B = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

В этом равенстве E – составляющая напряженности электрического поля по контуру обхода; Φ_B – магнитный поток, сцепленный с витком (рис. В.11). Электродвижущие силы витков используются в машине в процессе преобразования электрической энергии. Таким образом, электрическая машина представляет собой единую электромагнитную систему, в которой магнитное и электрическое поля взаимно связаны.

Процесс непрерывного изменения магнитного поля осуществляется в электрических машинах механическим или электрическим путем, в соответствии с чем возможны различные электромагнитные схемы машины.

А. Трансформатор. Простейшей является схема однофазного трансформатора (рис. В.12,а). Она состоит из двух неподвижных обмоток, размещаемых для лучшей их магнитной связи на замкнутой магнитной системе из ферромагнитного материала (электротехническая сталь). Если одну из обмоток, например

I (обмотка 2 разомкнута), присоединить к источнику синусоидального переменного тока частоты $f = \omega/2\pi$ с напряжением $u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t$, где U_1 – действующее значение напряжения и ω – угловая частота, то по обмотке потечет синусоидальный ток i_1 (магнитопровод предполагается ненасыщенным, см. разд. В.10.7, с. 102, сл. и разд. 12.2, с. 217, сл.), определяемый уравнением

$$u_1 = i_1 R_1 + L_{11} \cdot di/dt = i_1 R_1 - e_1,$$

где R_1 – активное сопротивление обмотки I ; L_{11} – ее индуктивность; $e_1 = -L_{11} \cdot di/dt$ – ЭДС самоиндукции.

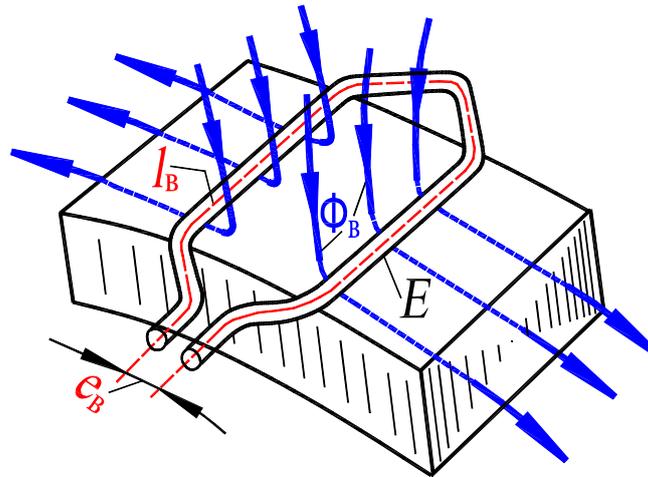


Рис. В.11. Возникновение в машине электрического поля как результат изменения магнитного поля

В обмотке 2 возникнет синусоидальная ЭДС взаимной индукции:

$$e_2 = -L_{12} \cdot di/dt.$$

ЭДС e_2 может быть использована как новый источник переменного тока той же частоты f , но другого напряжения, если обмотки имеют разные числа витков.

Отношение мгновенных (e) и действующих (E) значений ЭДС обмоток равно:

$$e_1 : e_2 = E_1 : E_2 = L_{11} : L_{12}.$$

С большой степенью точности можно считать, что

$$L_{11} : L_{12} = w_1 : w_2,$$

поэтому

$$E_1 : E_2 = w_1 : w_2 \tag{В.25}$$

или, приближенно полагая, что $U_1 = E_1$:

$$U_1 : U_2 \approx w_1 : w_2,$$

где U_1, U_2 – действующие значения напряжений обмоток.

Таким образом, подбирая при заданном напряжении U_1 числа витков обмоток в соответствии с равенством (В.25), можно получить на их зажимах желаемые напряжения U_2 .

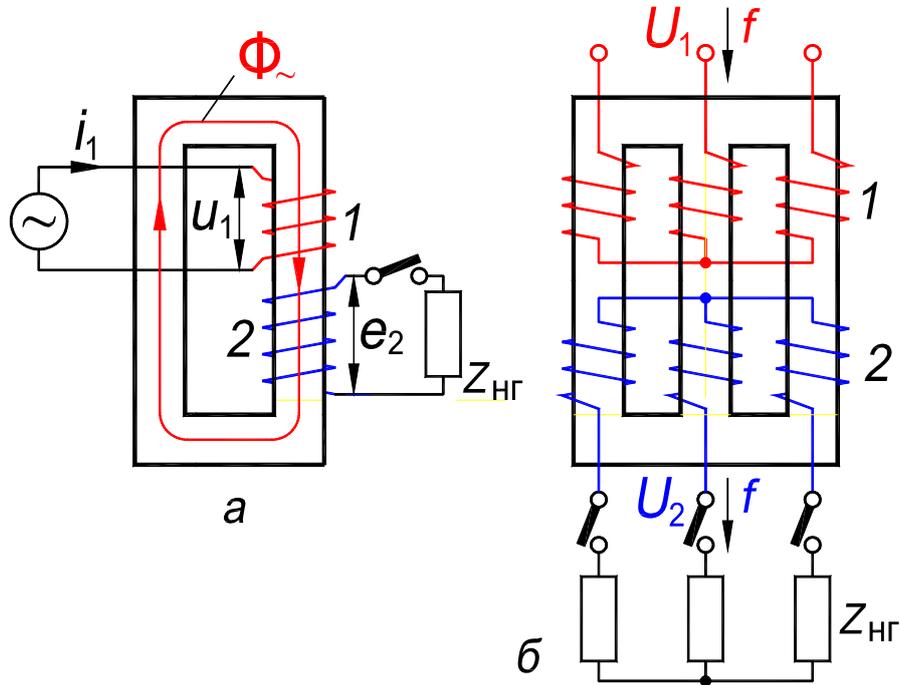


Рис. В.12. Электромагнитная схема трансформатора
a – однофазный трансформатор; *б* – трехфазный трансформатор

Если обмотку 2 использовать как источник тока и замкнуть на сопротивление нагрузки, то по обмоткам потекут переменные токи. Последние вызовут соответствующее изменение тока в обмотке 1, определяемое законом сохранения энергии: активная и реактивная мощности, развиваемые обмоткой 2 будут равны активной и реактивной мощностям, передаваемым обмотке 1 внешним источником тока дополнительно к той мощности, которая расходуется на намагничивание магнитной системы трансформатора и потери в обмотке 1.

Из равенства (В.25) следует, что ЭДС E_w одного витка во всех обмотках одинаковы.

$$E_1/w_1 = E_2/w_2 = E_w$$

Полная электромагнитная мощность обмоток

$$S_{1\partial} = E_1 I_1 = (E_1/w_1) I_1 w_1 = E_w I_1 w_1;$$

$$S_{2\partial} = E_2 I_2 = E_w I_2 w_2,$$

т. е. может быть определена или как произведение ЭДС обмотки на ее ток, или как произведение ЭДС одного витка E_w на полный ток всей обмотки $I \cdot w$.

Пренебрегая потерями мощности в процессе трансформации, имеем:

$$S_{1\varepsilon} \approx S_{2\varepsilon},$$

или

$$E_w I_1 w_1 \approx E_w I_2 w_2,$$

откуда

$$I_1 w_1 \approx I_2 w_2,$$

т. е. в двухобмоточном трансформаторе при нагрузке токи в обмотках примерно обратно пропорциональны числам витков этих обмоток.

При трансформировании трехфазных токов устанавливают: 1) в каждой фазе отдельный однофазный трансформатор (рис. В.12,*а*); 2) или все три трансформатора конструктивно объединяют в один трехфазный (рис. В.12,*б*). В последнем случае соотношения, установленные выше для однофазных трансформаторов, справедливы для каждой фазы трехфазного.

Развитием электромагнитной схемы трансформатора является электромагнитная схема асинхронной электрической машины, в которой для преобразования электрической энергии в механическую энергию вращения или для обратного преобразования используются силы механического взаимодействия между первичными и вторичными обмотками [1], возникающие также в трансформаторе при протекании по обмоткам токов (см. разд. 17.2, Б, с. 302, сл.).

Б. Асинхронный двигатель. Электромагнитная схема трехфазного (наиболее распространенного) асинхронного двигателя представлена на рис. В.13. Она отличается от схемы трансформатора тем, что ее магнитная система выполнена в виде двух концентрических цилиндров (из электротехнической стали), из которых внутренний (ротор), укрепляемый на валу в подшипниках, может свободно вращаться внутри неподвижного внешнего (статора).

Для упрощения чертежа на рис. В.13 обмотки фаз показаны условно сосредоточенными на небольших частях окружностей статора и ротора; фактически фазы обмоток являются пространственно-распределенными вдоль окружностей статора и ротора [1, разд. 8.2, с. 44, сл.].

Обмотка 1 размещается равномерно по окружности статора так, чтобы отдельные ее фазы были сдвинуты по отношению друг к другу на 120° . Обмотка 2 на роторе выполняется трехфазной или многофазной и в простейшем

случае замыкается накоротко. Для лучшей магнитной связи воздушный зазор δ между статором и ротором выбирается минимально возможным (радиальный размер δ). Если обмотку статора присоединить к источнику трехфазного тока, то ток, протекая по обмотке, создаст магнитное поле, ось которого непрерывно перемещается (вращается) в пространстве [1, разд. 8.4, с. 64, сл.]. Это вращающееся поле будет наводить токи в замкнутой обмотке ротора, которые, взаимодействуя с полем, создадут электромагнитные силы, стремящиеся двигать ротор в направлении вращения поля. Последнее легко уяснить себе из простейшей модели (рис. В.14).

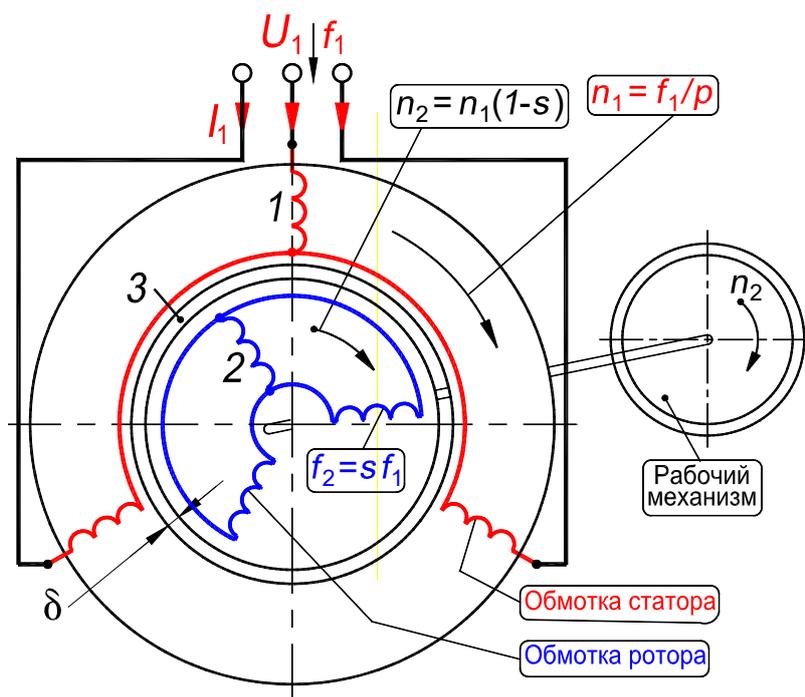


Рис. В.13. Электромагнитная схема трёхфазного асинхронного двигателя

При движении магнитного поля, например слева направо (рис. В.14,б), в проводнике обмотки ротора возникает ЭДС, направленная из-за плоскости чертежа (правило «правой руки», рис. В.2). Если ток в проводнике будет при этом совпадать по фазе с ЭДС, то действующая на проводник электромагнитная сила F будет стремиться двигать его в направлении вращения поля (правило «левой руки», рис. В.4).

Ротор двигателя, основанного на этом принципе, будет вращаться всегда медленнее поля (*асинхронно* по отношению к последнему), так как только при этих условиях в обмотке ротора наводятся ЭДС и протекают токи. Это отставание ротора от поля называют скольжением. Чем больше скольжение s , тем большие токи возникают в обмотке ротора (при заданном

неизменном магнитном поле) и тем большее механическое сопротивление способен преодолевать ротор, вращая рабочий механизм (рис. В.13). Таким образом, частота вращения асинхронного двигателя меняется с нагрузкой, постепенно уменьшаясь с ростом последней.

Условия возникновения и основные свойства вращающегося магнитного поля изложены в [1, разд. 8.4, с. 64, сл.].

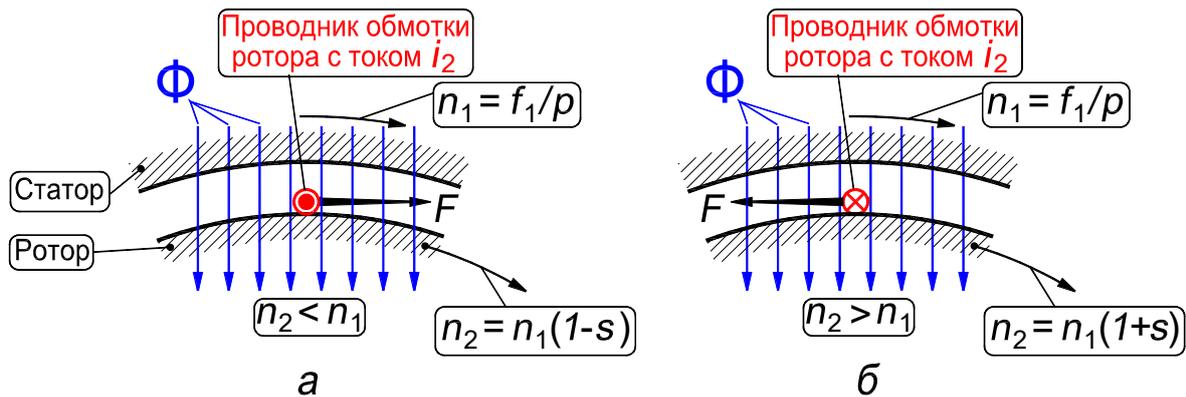


Рис. В.14. Объяснение принципа работы трёхфазной асинхронной машины

a – взаимодействие тока ротора i_2 с магнитным полем Φ при работе машины двигателем;
б – то же при работе машины генератором

Если вращающееся магнитное поле, создаваемое переменным током, образует на окружности статора одну пару полюсов N - S (северный и южный), то в этом простейшем случае одному периоду переменного тока соответствуют поворот оси поля на 360° и возвращение ее в исходное положение [1, рис. 8.21, с. 67]. Если обозначить число оборотов поля в минуту через n_1 то число его оборотов в секунду будет $n_1/60$ и, следовательно,

$$f_1 = n_1/60,$$

или

$$n_1 = 60 \cdot f_1,$$

где f_1 — частота тока статора, создающего поле.

Если обмотку статора выполнить так, что число пар полюсов магнитного поля вдоль окружности воздушного зазора будет p , то частота вращения магнитного поля, так называемая «синхронная частота вращения», при той же частоте будет в p раз меньше, так как ось магнитного поля повернется на 360° теперь за p периодов [1, рис. 8.22, с. 68]; поэтому в общем случае

$$n_1 = 60 \cdot f_1 / p, \tag{B.26}$$

или

$$f_1 = p \cdot n_1 / 60. \quad (\text{В.27})$$

Скольжение ротора асинхронного двигателя s в долях синхронной частоты вращения n_1 равно:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1, \quad (\text{В.28})$$

откуда

$$n_2 = n_1(1 - s) = 60 \cdot f_1 \cdot (1 - s) / p. \quad (\text{В.29})$$

Частота ЭДС и токов ротора может быть найдена из равенства, аналогичного (В.27), если вместо n_1 подставить частоту вращения поля относительно ротора, т. е. $n_1 - n_2 = s \cdot n_1$; тогда

$$f_{2s} = p \cdot s \cdot n_1 / 60 = s \cdot f_1. \quad (\text{В.30})$$

При работе асинхронного двигателя $s \ll 1$, поэтому, как следует из равенства (В.29), ее ротор вращается с частотой, близкой к синхронной, лишь незначительно снижая частоту вращения с нагрузкой.

Из-за своей простоты и надежности трехфазный асинхронный двигатель (АД) нашел широкое распространение в установках переменного тока. Асинхронные двигатели преобразуют в механическую мощность до 50 – 60 % электроэнергии производимой в России и «приводят в движение» промышленность и сельское хозяйство страны.

Как всякая электрическая машина, асинхронная машина обратима, т. е. она может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора, преобразуя механическую энергию переменного тока. В режиме генератора ротор машины надо вращать приводным двигателем быстрее поля ($n_2 > n_1$). При этом (рис. В.15,б) изменяются направления наведенных в обмотке ротора ЭДС и тока, а следовательно, и направление тока в статоре. При этих условиях машина уже не потребляет, а отдает в сеть активную мощность соответственно механической мощности, затрачиваемой приводным двигателем на вращение ротора (электромагнитная сила F , как видно из рис. В.15,б, в режиме генератора меняет свое направление и противодействует вращению ротора).

Асинхронная машина является по существу трансформатором, поэтому всякое изменение вторичного тока (ротора) вызывает соответствующее изменение первичного (статора)

Основной особенностью асинхронной машины является чисто магнитная трансформаторная связь между обмотками первичной и вторичной систем посредством вращающегося поля. Изменение тока в первичной системе связано с изменением тока во вторичной системе. Отметим, что в трансформаторе связь между первичной и вторичной обмотками осуществляется посредством неподвижного в пространстве, но пульсирующего во времени магнитного поля.

В. Синхронный генератор. Дальнейшим развитием электромагнитной схемы электрической машины является раздельное питание обмоток статора и ротора, отдельными источниками.

При постоянной частоте вращения ротора частота тока в его цепи (В.30) $f_2 = s \cdot f_1$. Если поэтому при $n_2 = \text{const}$ питать цепь ротора от дополнительного источника переменного тока частоты f_2 , то получится новая схема электрической машины. Наибольшее практическое применение получили машины, у которых $n_2 = n_1$ и $s = 0$. В этом случае ЭДС, наведенная в обмотке ротора вращающимся полем статора, равна нулю и ток в цепи ротора возникает только за счет дополнительного источника тока. Последний при $f_2 = 0$ является постоянным током (рис. В.15,а) [2].

Соединение вращающейся обмотки 2 ротора с источником тока осуществляется посредством контактных колец и наложенных на них неподвижных электрических щеток. На статоре располагается обмотка 1 переменного тока (трехфазная).

Допустим, что требуется использовать рассматриваемую электрическую машину в качестве генератора. При вращении ротора приводным двигателем магнитное поле обмотки 2, перемещающееся в пространстве вместе с ротором, будет наводить в обмотке 1 статора (якоря) переменную ЭДС. Если к обмотке 1 подключить какой-либо приемник электрической энергии, то по обмотке потечет переменный ток (в рассматриваемой схеме – трехфазный).

В рассмотренном генераторе (рис. В.15,а) один период переменной ЭДС в обмотке статора соответствует одному обороту ротора, поэтому частота ЭДС

$$f = n/60,$$

где n – число оборотов ротора в минуту, а $n/60$ – в секунду.

Если ротор имеет не одну пару полюсов ($N-S$), как показано на рис. В.15,а, а в общем случае p пар (на рис. В.15,б – $p = 2$), то при той же частоте вращения ротора частота тока будет в p раз больше:

$$f = p \cdot n / 60. \quad (B.31)$$

Как видно из этого равенства, генератор, выполненный по схеме рис. В.15, обладает тем свойством, что частота генерируемого тока зависит от частоты вращения ротора и пропорциональна последней. Такие генераторы получили название синхронных (СГ). Они нашли широкое применение в современных электрических установках. Синхронные генераторы могут быть выполнены с любым числом фаз на статоре. Наибольшее распространение получили трехфазные генераторы.

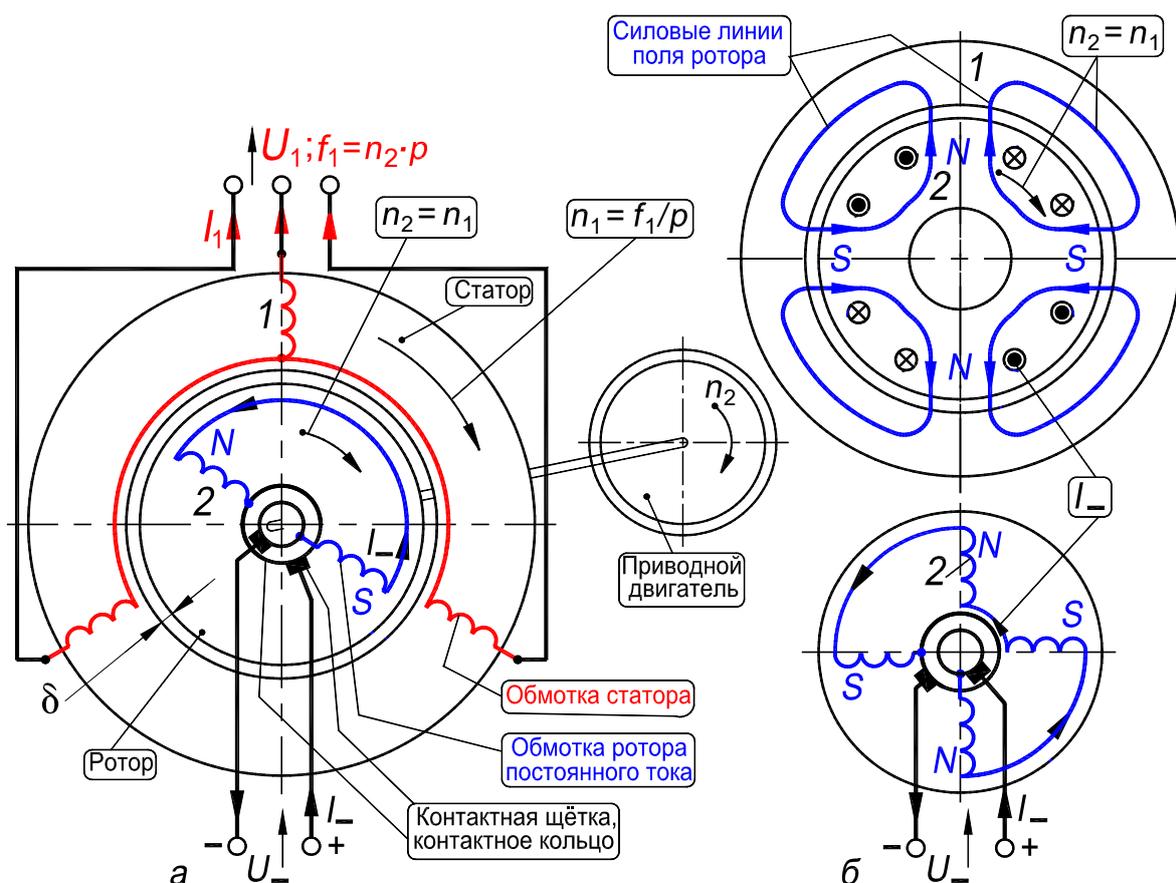


Рис. В.15. Электромагнитная схема трехфазной синхронной машины (режим генератора)
 а – ротор двухполюсный; б – ротор четырехполюсный

Мощные синхронные генераторы установлены на атомных, тепловых и гидроэлектростанциях и являются основными производителями электрической энергии во всём мире [2].

Как всякая электрическая машина, синхронная машина обратима, т. е. может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя.

Асинхронные генераторы, имеющие по сравнению с синхронными ряд существенных недостатков, применяются сравнительно редко [1, с. 266, сл.].

Рассмотренные выше электромагнитные схемы трансформаторов, асинхронных [1] и синхронных машин [2] охватывают основные виды (классы) машин переменного тока, применяемых в современных электрических установках. В ряде случаев, однако, к электрической машине предъявляются требования, которые не могут быть выполнены ни при помощи трансформаторов, ни при помощи асинхронных или синхронных машин, например: 1) генерирование постоянного тока ($f = 0$); 2) или плавное изменение в широких пределах частоты вращения двигателя при неизменной частоте питающего тока; 3) работа двигателя от сети постоянного тока и пр.

Г. Коллекторные машины постоянного и переменного тока.

В этих случаях для использования электрической машины ее электромагнитную схему приходится усложнять, вводя в нее преобразователь частоты.

Обычно последний вводится в цепь ротора. *Он позволяет автоматически менять частоту переменного тока в роторе при изменениях его частоты вращения и неизменной частоте источника тока, питающего обмотку ротора.* В электрических машинах используются механические преобразователи – коллекторы, конструктивно объединяемые с ротором электрической машины. Применяют также полупроводниковые преобразователи частоты.

Электрические машины, имеющие коллектор, образуют особый класс коллекторных машин [3]. Схема ротора с коллектором, являющаяся составной частью электромагнитной схемы каждой коллекторной машины, представлена на рис. В.16 [3, рис. 4.4 и 4.5, с. 46,сл.].

Преобразователь частоты – коллектор – состоит из ряда металлических (медных) пластин, изолированных друг от друга и уложенных по поверхности цилиндра параллельно его оси. Каждая пластина присоединяется к каждому витку (или через несколько витков) многофазной обмотки, соединенной многоугольником. На коллектор накладываются контактные щетки, посредством которых вращающаяся обмотка через коллекторные пластины соединяется с внешней цепью [3, разд. 4.3, с. 45,сл.].

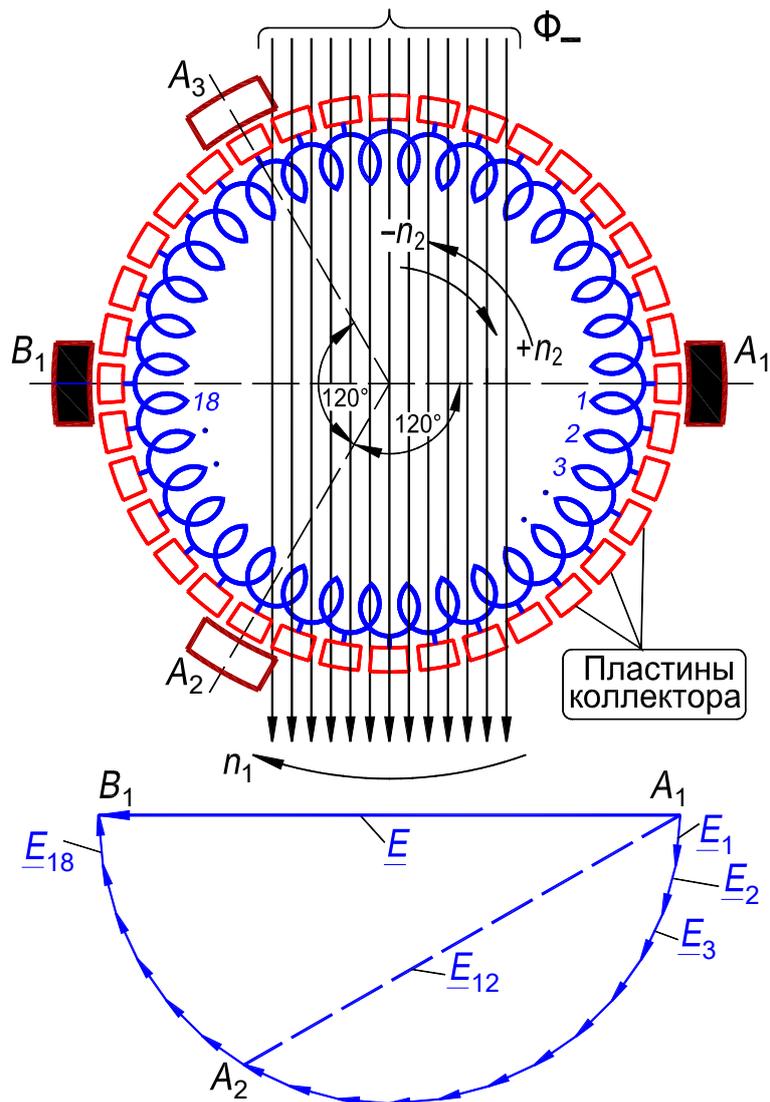


Рис. В.16. Электромагнитная схема ротора с коллектором и контактными щетками

Для понимания процесса преобразования частоты допустим сначала, что внешнее магнитное поле неподвижно ($n_1 = 0$) в пространстве и ротор вращается в нем с частотой n_2 . В витках его обмотки наводится переменная ЭДС частоты (В.30)

$$f_2 = p \cdot n_2 / 60.$$

Между неподвижными контактными щетками A_1 и B_1 действует при этом ЭДС, равная сумме мгновенных значений ЭДС $e_1, e_2, e_3, \dots, e_w$ последовательно соединенных витков $1, 2, 3, \dots, 18$. Эта сумма (\underline{E}), как видно из векторной диаграммы (рис. В.16), будет при $n_2 = \text{const}$ и достаточно большом числе витков практически неизменной во времени и равной диаметру окружности, описанной вокруг многоугольника ЭДС. Следовательно, при вращении ротора ЭДС

e_1, e_2, e_3, \dots витков обмотки частоты f_2 преобразовываются в ЭДС E частоты $f = 0$ между щетками A_1 и B_1 , которые, таким образом, могут являться полюсами источника практически постоянной ЭДС

Векторная диаграмма на рис. В.16 построена в предположении, что ЭДС витков синусоидальны и $p = 1$.

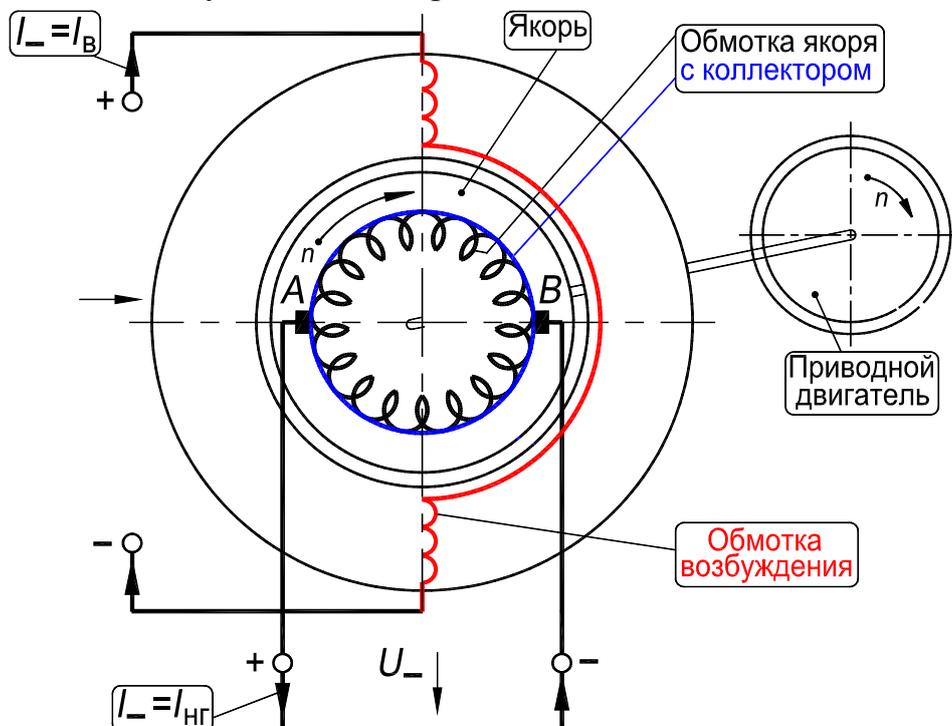


Рис. В.17. Электромагнитная схема машины постоянного тока (режим генератора)

Электродвижущая сила E между щетками пропорциональна частоте вращения ротора, так как последняя определяет амплитуду ЭДС каждого витка обмотки. На этом принципе основано устройство электромашинных генераторов постоянного тока [3]. Их электромагнитная схема представлена на рис. В.17. На статоре располагается обмотка, обтекаемая постоянным током и создающая неизменное во времени и пространстве магнитное поле. На роторе (якоре) расположена многофазная обмотка, присоединенная к коллектору (схематически он показан в виде окружности). Отметим, что генератор постоянного тока можно рассматривать как обращенный синхронный генератор (обмотка 2 на рис. В.15,а расположена на статоре, обмотка 1 – на роторе), у которого переменная ЭДС при помощи коллектора преобразуется в постоянную.

В генераторах постоянного тока часто применяют самовозбуждение, т. е. питание обмотки статора, создающей постоянное магнитное поле, от зажимов (щёток) A и B якоря самой машины.

При использовании машины постоянного тока (рис. В.18) в режиме двигателя обмотка ротора через щетки A и B присоединяется к источнику постоянного тока. Постоянный ток, протекая по обмотке ротора, взаимодействует с магнитным полем статора и создает момент, вращающий ротор. При вращении ротора в его обмотке наводится ЭДС, направленная в соответствии с правилом Ленца обратно приложенному к щеткам напряжению U , поэтому ток в цепи ротора

$$I = (U - E)/R, \quad (\text{В.32})$$

где R – сопротивление цепи.

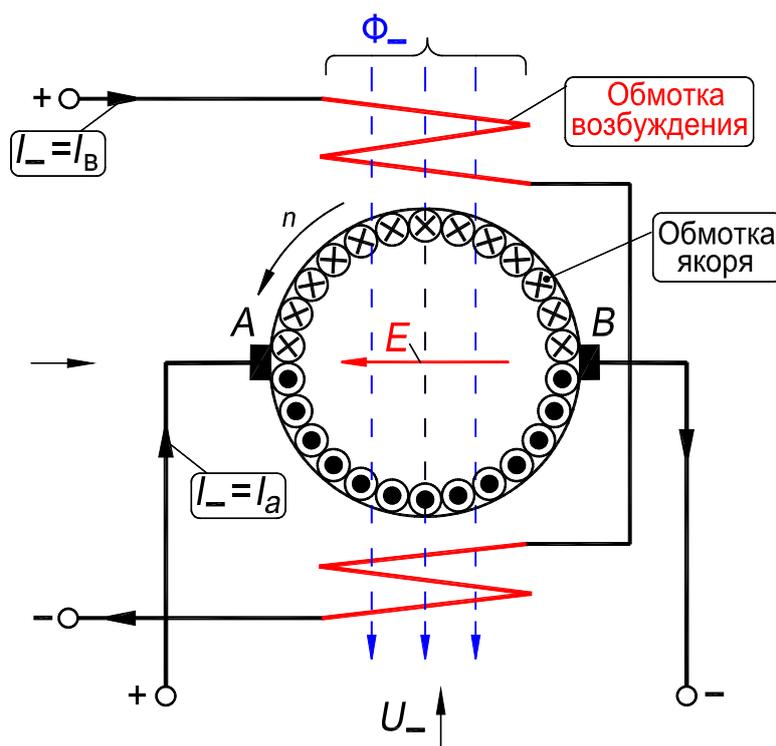


Рис. В.18. Использование электрической машины постоянного тока в качестве двигателя

Так как с другой стороны ЭДС между щетками пропорциональна магнитному потоку Φ полюса и частоте вращения n ротора:

$$E = k \cdot \Phi \cdot n, \quad (\text{В.33})$$

где k — коэффициент пропорциональности, то согласно (В.32) и (В.33)

$$n = (U - I \cdot R)/k \cdot \Phi \quad (\text{В.34})$$

поскольку обычно $U \gg I \cdot R$.

Равенство (В.34) показывает, что путем плавного изменения магнитного потока Φ или напряжения U может быть осуществлено плавное регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока (ДПТ) в широких пределах. Это является достоинством двигателя постоянного тока по срав-

нению с асинхронными и синхронными двигателями, что обусловило широкое использование ДПТ в электротранспорте.

Асинхронная машина, так же как и синхронная, может быть конструктивно объединена с преобразователем частоты – коллектором. Последний позволяет при переменном значении скольжения s электрически связать цепь ротора, в котором индуцируются ЭДС частоты $f_2 = s \cdot f_1$ (В.30), с цепью статора, имеющей частоту f_1 .

В этом случае ток во вторичной системе машины возникает не только трансформаторным путем за счет изменения тока первичной системы, но и за счет внешнего источника, присоединяемого через преобразователь частоты – коллектор. Это дает возможность регулировать ток в цепи ротора, и следовательно, момент и частоту вращения двигателя [3, с. 217, сл.].

Схема трехфазного ротора асинхронной машины с коллектором показана на рис. В.16. Обмотка ротора присоединяется к коллектору, как и в машине постоянного тока. На коллектор накладываются три контактных щетки A_1 , A_2 и A_3 с пространственным сдвигом на 120° (при $p = 1$).

В отличие от магнитного поля машины постоянного тока поле асинхронной машины вращается с частотой $(1 - s) \cdot n_1$. Сам ротор вращается с частотой $\pm n_2$. Относительная частота вращения ротора в магнитном поле, равная $n_1 - (\pm n_2) = n_1 \pm n_2$, определяет амплитуду и частоту ЭДС, наводимой в обмотке ротора.

Электродвижущая сила E_{12} между щетками A_1 и A_2 равна сумме мгновенных значений ЭДС, действующих в витках, расположенных в данный момент между ними. При неподвижном магнитном поле, как и в случае машины постоянного тока, ЭДС E_{12} постоянна во времени. При вращении поля с частотой n_1 его ориентировка относительно витков, заключенных между щетками, меняется, поэтому ЭДС между щетками будет изменяться с частотой, пропорциональной частоте вращения поля относительно щеток:

$$f_1 = p \cdot n_1 / 60.$$

Амплитуда этой ЭДС пропорциональна относительной частоте вращения $n_1 \pm n_2$ обмотки в магнитном поле, так как последняя определяет амплитуду ЭДС каждого витка обмотки.

Асинхронные машины, объединенные с механическим преобразователем частоты в виде коллектора, получили название коллекторных машин переменного тока [3].

Электромагнитная схема трехфазной коллекторной машины показана на рис. В.19. Обмотка статора аналогична обмотке статора асинхронной машины (рис. В.13); обмотка ротора соединена с трехфазным преобразователем частоты. Как видно из схемы, цепи статора и ротора имеют магнитную связь, независимое питание от источника тока частоты f_1 . Таким образом, электромагнитная схема трехфазной коллекторной машины является дальнейшим развитием схемы асинхронной бесколлекторной машины (рис. В.13).

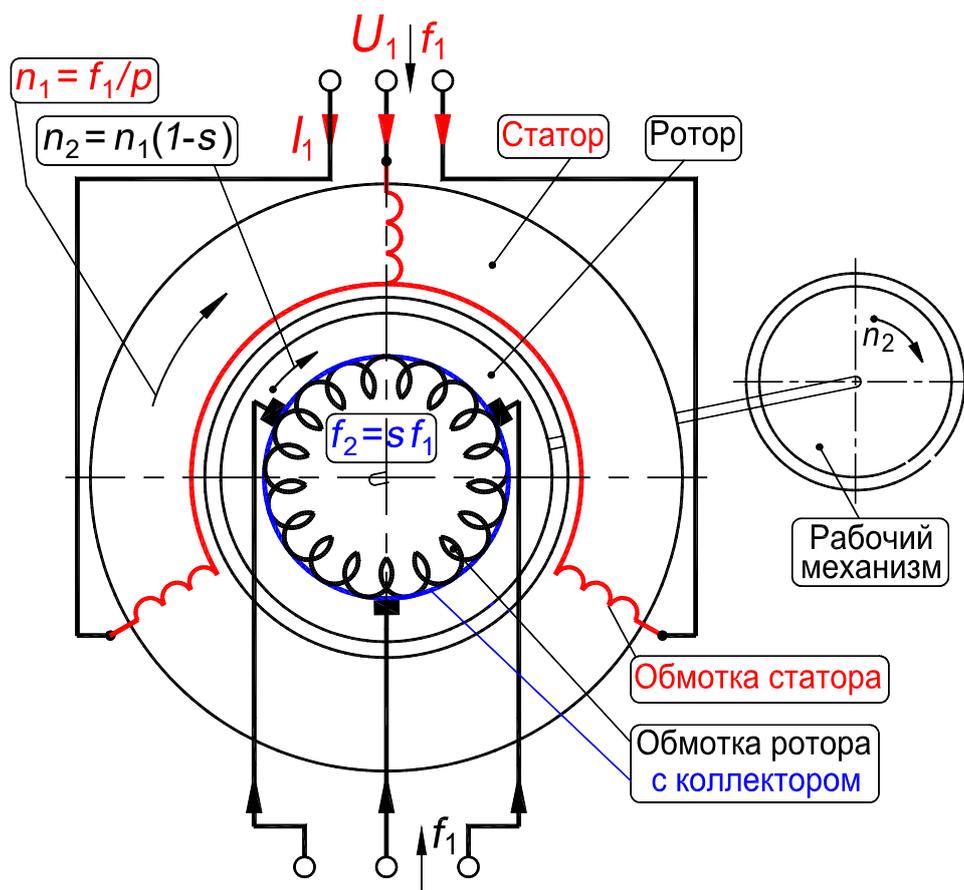


Рис. В.19. Электромагнитная схема трехфазной коллекторной машины

У трехфазных асинхронных машин большой мощности преобразователь частоты не объединяется конструктивно с ротором и выполняется в виде отдельного электромашинного агрегата, электрически соединенного с обмоткой ротора через контактные кольца. Такие соединения асинхронной машины с коллекторными преобразователями частоты получили название асинхронных коллекторных каскадов [3].

Электромагнитная схема однофазной коллекторной машины аналогична схеме машины постоянного тока (рис. В.17) с тем отличием, что по цепям статора и ротора в этом случае протекают переменные токи частоты f_1 .

Если эти токи совпадают по фазе, то одновременно с изменением направления тока в проводниках ротора (рис. В.18) будет менять свое направление и магнитное поле, а момент вращения, приложенный к ротору, будет все время сохранять свое направление [3, с. 244, сл.].

Коллекторные машины переменного тока ввиду их сложности и большей стоимости применяются на практике значительно реже бесколлекторных и главным образом для двигательного режима.

Коллектор как преобразователь частоты во всех коллекторных машинах обладает недостатком – склонностью щеточных контактов к искрению [3, с. 90–109].

В табл. В.3 приведены основные виды электрических машин.

Таблица наглядно показывает общность принципов, на основе которых выполняются современные электрические машины: трансформаторы, асинхронные и синхронные машины, коллекторные машины постоянного и переменного токов, коллекторные каскады. Электромагнитные схемы таблицы выявляют роль коллектора как преобразователя частоты, позволяющего *электрически* связывать вращающийся ротор с неподвижными элементами электромагнитной цепи машины, в которой действуют ЭДС другой частоты.

Несмотря на принципиальную общность электромагнитных схем каждая из машин имеет свои индивидуальные электромагнитные характеристики и конструктивные особенности. Эти вопросы рассмотрены подробно в книгах, посвященных асинхронным, синхронным машинам переменного тока, а также электрической машине постоянного тока [1, 2, 3].

Д. Индуктивные и ёмкостные машины. **Индуктивные машины** – электро-механические преобразователи энергии при взаимодействии токов обмоток и магнитного поля – широко используются на практике. Их конструкция включает обмотки, стальной сердечник и воздушный зазор δ для обеспечения вращения ротора. Эти машины рассмотрены в [1, 2, 3].

Поле всегда электромагнитное, но в индуктивных машинах электрическое поле пренебрежимо мало.

Ёмкостные (электростатические) машины – преобразователи энергии при взаимодействии зарядов в электрическом поле – используются ограниченно. Их конструкция – на базе конденсаторов – включает электроды, диэлектрик и воздушный зазор δ для обеспечения вращения ротора.

Причина преобладания индуктивных машин – свойства материалов, а именно электротехнической стали, имеющей доменную структуру. Последнее приводит к существенному увеличению результирующего поля токов обмоток и доменов (разд. В10, с 98, сл.). Сравним выражения для плотности энергии полей.

Плотность энергии магнитного поля $w_M = B \cdot H/2 = B^2/2\mu \cdot \mu_0$.

Энергия магнитного поля сосредоточена главным образом в зазоре между статором и ротором: $\mu = 1$, о. е.; $B_\delta \approx 1$ Тл.

Тогда, плотность энергии $w_M = 1^2/2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 400\,000$ Вт·с/м³.

Плотность энергии электрического поля $w_э = D \cdot E/2 = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 E^2/2$.

При наличии воздушного зазора ($\varepsilon = 1$) достижимая напряженность электрического поля в воздухе $E_\delta \approx 10^7$ В/м.

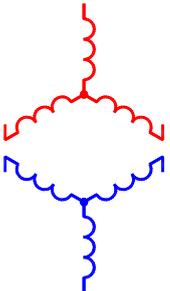
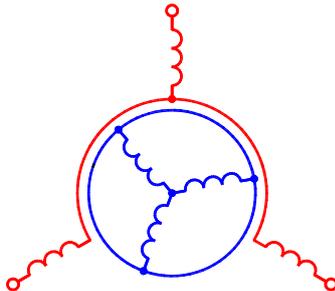
Тогда, плотность энергии $w_э = 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot (10^7)^2/2 \approx 450$ Вт·с/м³.

Главным препятствием на пути широкого применения ёмкостных (электростатических) машин является отсутствие материалов и конструкционных систем, которые позволили бы увеличить поток электростатической индукции D подобно тому, как это делают в случае потока магнитной индукции B , применяя сталь и увеличивая число витков. Это обстоятельство не позволяет также получить достаточно большую концентрацию энергии электрического поля.

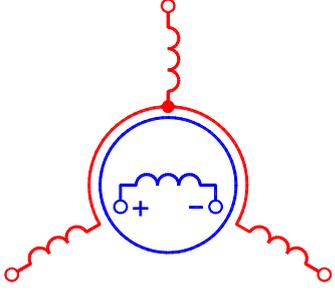
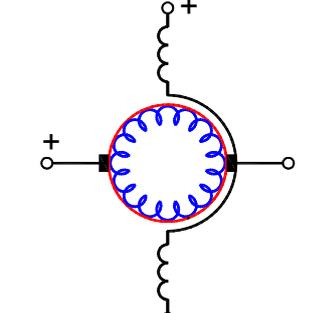
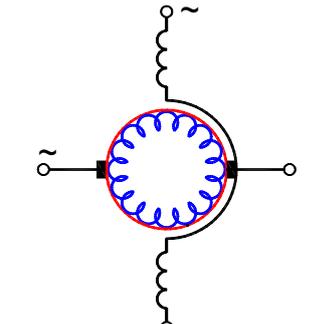
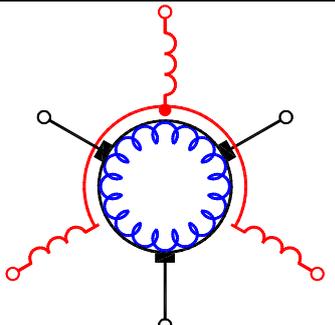
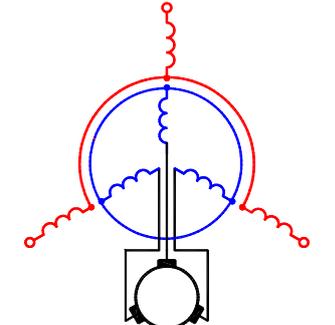
Если будут получены новые электротехнические материалы, допускающие высокие плотности запасенной энергии электрического поля, то несомненно, будет развиваться производство ёмкостных (электростатических) машин.

Одним из первых использований электростатических машин являются электрофорная машина и генератор Ван-де-Граафа. Они предназначены, например, для проведения демонстрационных опытов по электростатике, в том числе для демонстрации электризации тел при взаимном контакте и искрового газового разряда в воздухе.

Таблица В.3. Основные виды электрических машин

Электромагнитная схема	Наименование машины	Наиболее частый режим работы	Наиболее часто применяемое число фаз
1	2	3	4
	Трансформатор	Для повышения или понижения напряжения	3 или 1
	Асинхронная машина [1]	Двигатель	3

Продолжение табл. В.3

1	2	3	4
	<p>Синхронная машина [2]</p>	<p>Генератор, двигатель, компенсатор</p>	<p>3</p>
	<p>Коллекторная машина постоянного тока [3]</p>	<p>Генератор, двигатель</p>	<p>—</p>
	<p>Коллекторная машина однофазного тока [3]</p>	<p>Двигатель</p>	
	<p>Коллекторная машина трехфазного тока [3]</p>	<p>Двигатель</p>	
	<p>Трехфазный коллекторный каскад</p>	<p>Двигатель</p>	

В.7. Основные конструктивные схемы трансформаторов и электрических машин

Для трансформаторов и вращающихся электрических машин – асинхронных, синхронных и коллекторных – характерна общность их электромагнитных схем. Но в устройстве трансформаторов и вращающихся электрических машин – существенные отличия.

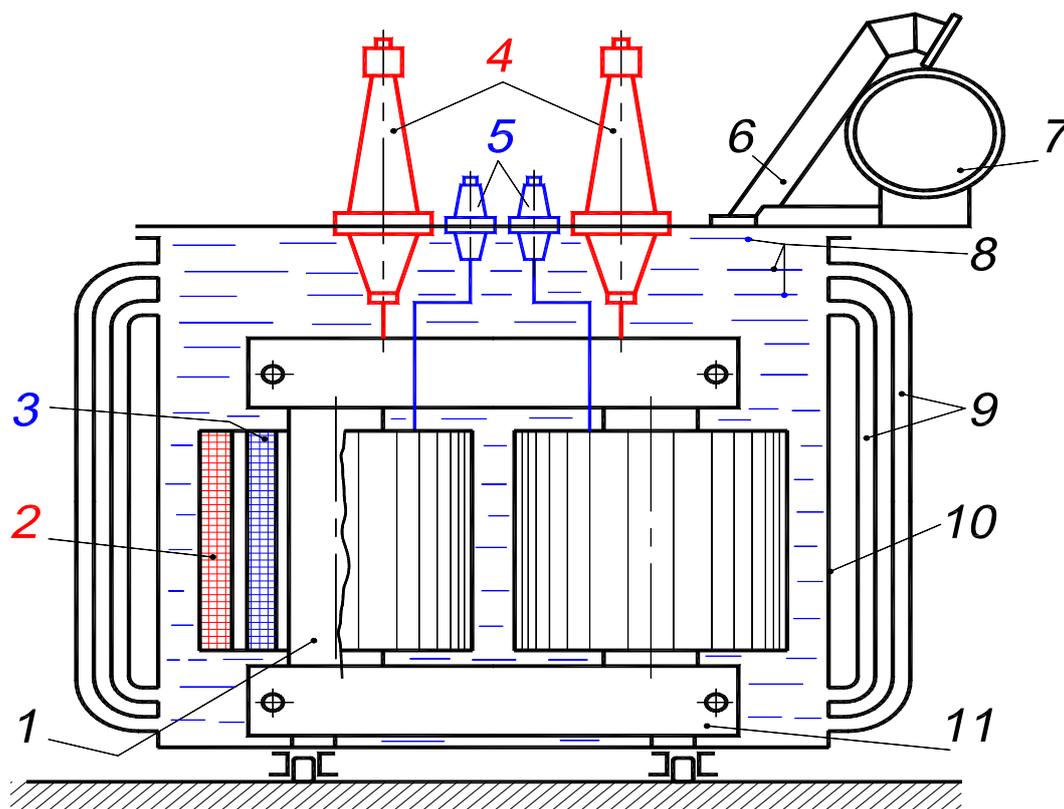


Рис. В.20. Схема устройства однофазного трансформатора:

1 – магнитная система, состоящая из двух вертикальных стержней и двух горизонтальных ярмов; 2 и 3 – обмотки высшего и низшего напряжений; 4 и 5 – выводные изоляторы высшего и низшего напряжений; 6 – выхлопная труба для аварийного выброса газов при повреждениях внутри трансформатора; 7 – бак-расширитель; 8 – масло; 9 – трубы для циркуляции масла и его охлаждения; 10 – масляный бак; 11 – ярмовая балка

А. Трансформаторы. Конструктивная схема трансформатора состоит из четырех элементов (рис. В.20): 1) замкнутой магнитной системы из листовой электротехнической стали; 2) электрической системы в виде двух или нескольких обмоток, охватывающих магнитную систему и изолированных относительно неё (концы обмоток присоединены к выводным изоляторам); 3) охлаждающей системы – воздушной, масляной, водяной или комбинированной, служащей для отведения тепла, возникающего вследствие потерь энергии в магнитной системе

и обмотках; 4) механической системы, обеспечивающей механическую прочность всей конструкции трансформатора, возможность его перемещения, подъема, транспортировки и пр.

В энергетических установках наибольшее распространение имеют трансформаторы с масляным охлаждением. У таких трансформаторов магнитная система с обмотками помещена в бак (рис. В.20), заполненный трансформаторным маслом. Масло облегчает условия охлаждения обмоток и магнитной системы и служит одновременно хорошей изоляцией обмоток. Недостаток масла – оно горюче и воспламеняется при температуре $\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Трансформаторы малой мощности выполняются, как правило, с воздушным охлаждением; в них обмотки и магнитная система непосредственно соприкасаются с окружающим воздухом, используемым для охлаждения трансформатора.

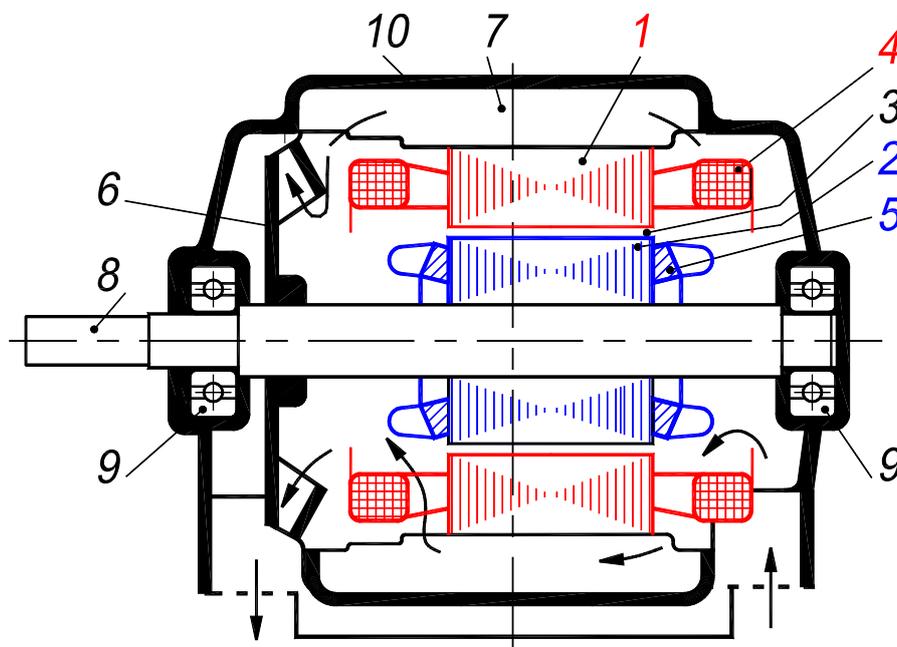


Рис. В.21. Схема устройства электрической машины (асинхронной):

1 – сердечник статора; 2 – сердечник ротора; 3 – воздушный зазор; 4 – обмотка статора; 5 – обмотка ротора; 6 – вентилятор; 7 – вентиляционные каналы, стрелками показано направление движения охлаждающего воздуха по вентиляционным каналам; 8 – вал; 9 – подшипники; 10 – станина

Б. Вращающиеся электрические машины. Конструктивная схема электрических машин, имеющих вращающиеся части, отлична от схемы трансформаторов. Она состоит из следующих основных элементов (рис. В.21): 1) магнитной системы в виде цилиндрических ферромагнитных сердечников, внутренний из которых (сердечник ротора) отделен от внешнего (сердечника статора) воздушным зазором и может вращаться; 2) электрической системы в виде обмоток (одной или

нескольких), размещаемых в пазах на статоре и роторе со стороны воздушного зазора; 3) охлаждающей системы в виде вентилятора (конструктивно объединенного с ротором) и системы вентиляционных каналов в статоре и роторе, через которые проходит охлаждающий машину воздух; 4) механической системы в виде вала, несущего ротор, подшипников, муфты для соединения с приводным двигателем или рабочим механизмом и станины, обеспечивающей механическую устойчивость всей конструкции машины и возможность ее перемещения, подъёма и пр.

Вал ротора машины размещается горизонтально (преимущественно) или вертикально (рис. В.22). В зависимости от мощности, быстроходности и назначения машины ее отдельные конструктивные узлы выполняются различно, однако все четыре элемента, указанные выше, как правило, имеются в каждой машине.

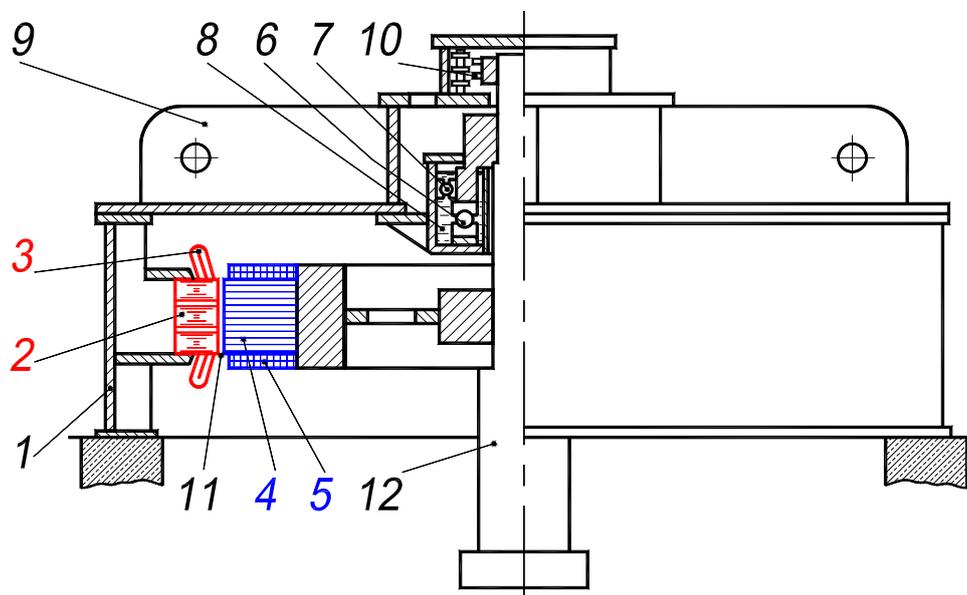


Рис. В.22. Схема устройства электрической машины (синхронной) с вертикальным валом:

1 – сварная станина; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора; 4 – ротор; 5 – обмотка ротора; 6 – несущий подпятник; 7 – направляющий подшипник; 8 – масляная ванна подпятника; 9 – крестовина, на которой укреплены подпятник и подшипник; 10 – контактные кольца для соединения обмотки вращающегося ротора с внешним источником постоянного тока; 11 – воздушный зазор; 12 – вал

В быстроходных мощных машинах потери на трение ротора о воздух могут быть значительны, поэтому воздух заменяют иногда водородом (например, в синхронных турбогенераторах), обеспечивая при помощи герметичного кожуха постоянную концентрацию водорода внутри машины. Из-за малой плотности водорода потери на трение ротора при этом резко уменьшаются.

Обмотки на статоре и роторе размещаются по окружности вдоль воздушного зазора или равномерно в относительно небольших пазах (рис. В.23) или группируются в более крупных пазах, число которых берется равным числу полюсов машины (рис. В.24). Первая конструкция носит название неявнополюсной, вторая – явнополюсной, поскольку полюсы такой машины имеют соответствующее конструктивное оформление [2, с. 32,сл.].

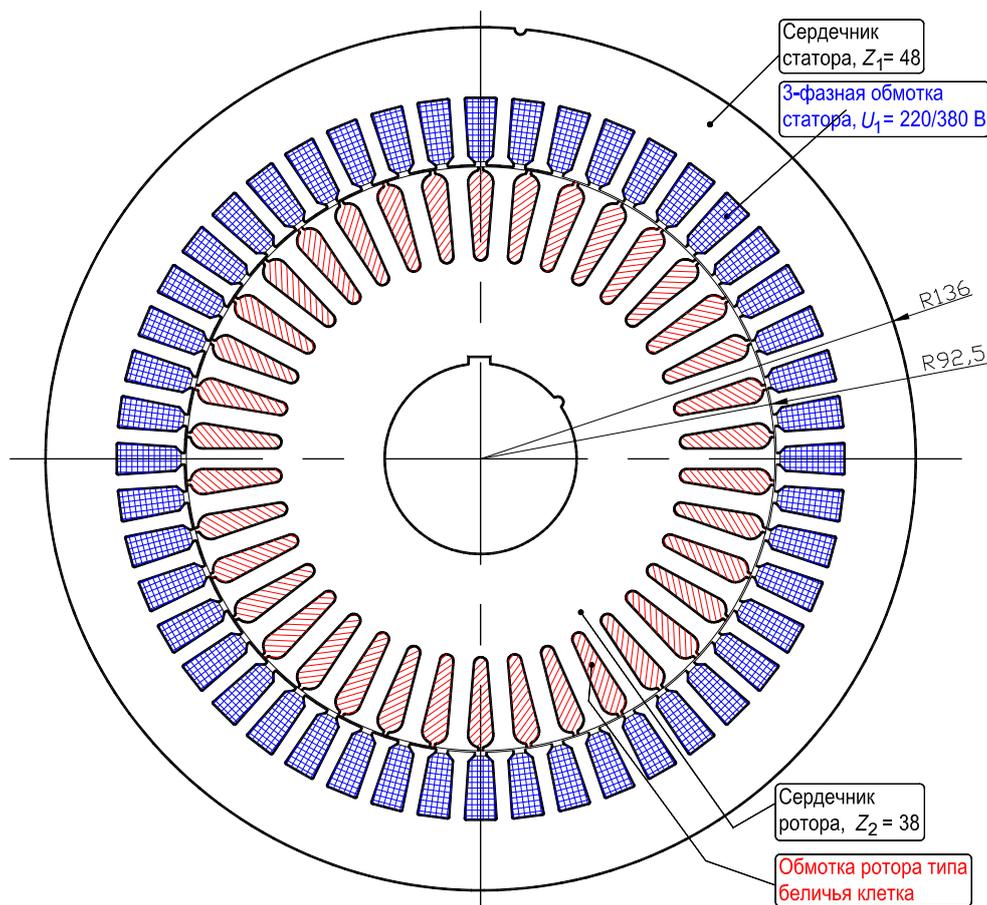


Рис. В.23. Сердечники статора и ротора с обмотками асинхронного двигателя:

$P_2 = 15 \text{ кВт}$, $2p = 4$, радиальный воздушный зазор $\delta = 0,5 \text{ мм}$

Механическая часть конструкции и система охлаждения электрической машины зависят в значительной мере от степени ее защиты от внешней среды. Различают: 1) открытые машины, у которых токоподводящие и вращающиеся части не имеют особых защитных приспособлений; 2) защищенные машины, имеющие специальные приспособления, предохраняющие машину от проникновения внутрь нее посторонних тел, капель или струй воды определенного направления; 3) закрытые машины — с полной изоляцией внутренних ее частей от внешней среды. Так как закрытие машины ухудшает условия ее охлаждения и, следовательно, снижает ее мощность, то они часто выполняются обдуваемыми. В этом случае на конце вала машины вне

ее кожуха размещается вентилятор, который обдувает внешнюю поверхность машины (рис. В.25). При такой системе охлаждения размеры закрытых (обдуваемых) машин мало отличаются от размеров защищенных машин той же мощности.

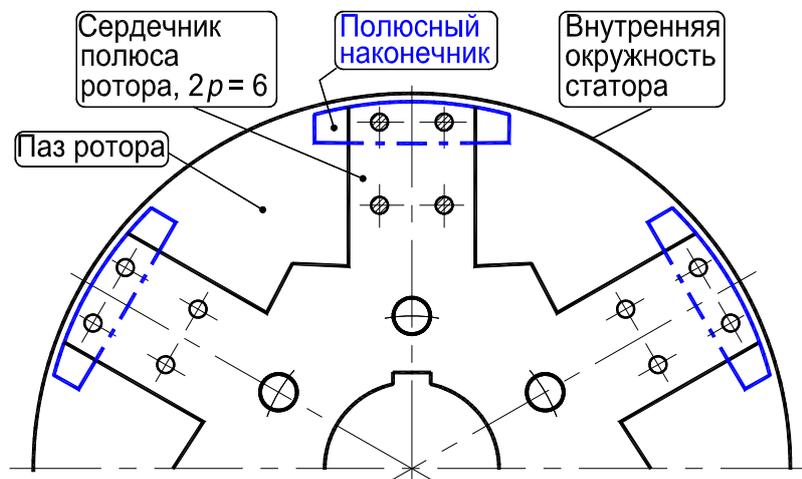


Рис. В.24. Явнупольсный ротор синхронной машины

Конструктивное оформление машины существенно зависит от ее мощности и быстроходности, однако строго определенной связи между конструкцией, мощностью и быстроходностью машины установить не представляется возможным. Машины мощностью до 0,5 кВт относят обычно по конструктивным признакам к классу микромашин, т. е. машин весьма малой мощности, машины 0,5 – 10 кВт – к классу машин малой мощности, машины 10 – 250 кВт – к классу машин средней мощности и остальные более мощные машины – к классу мощных машин. Эти границы между классами являются в значительной мере условными.

Такая же условность характерна и для шкалы быстроходности. Машины с частотами вращения до 250 – 300 об/мин относят обычно по конструктивным признакам к классу тихоходных машин. Машины с частотами вращения 300 – 1 500 об/мин — к классу машин средней быстроходности. Машины с частотами вращения 2 000 – 6 000 об/мин – к классу быстроходных машин и при более высоких частотах вращения – к классу сверхбыстроходных машин.

Быстроходность машин при переменном токе непосредственно связана с его частотой. В России для промышленных установок принята частота 50 Гц. При этой частоте, как следует из равенства (8.23) [1, с. 69], максимальная синхронная частота вращения вращающегося магнитного поля асинхронных и синхронных машин при двух полюсах ($p = 1$) получается

равной $60 \cdot 50 = 3\,000$ об/мин. Таким образом, 3 000 об/мин являются пределом быстроходности для бесколлекторных машин обычного исполнения. Увеличение быстроходности сверх 3 000 об/мин возможно или путем применения коллекторных машин, или при повышении частоты сверх 50 Гц. В быстроходном электроприводе находят применение частоты до 3 000 Гц.

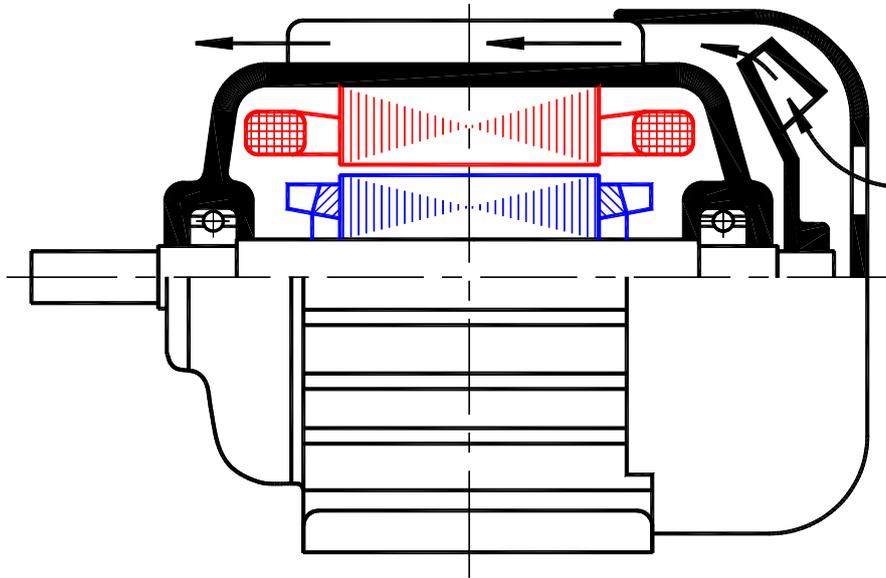


Рис. В.25. Схема устройства обдуваемой (асинхронной) машины (см. рис. В.21)

Назначение электрических машин в ряде случаев получает отражение в их наименовании. Так, быстроходные синхронные генераторы ($n = 1\,500 - 3\,000$ об/мин), вращаемые паровыми турбинами, получили название турбогенераторов; генераторы, вращаемые более тихоходными гидротурбинами, называют гидрогенераторами; трансформаторы, применяемые в энергетических установках для передачи и распределения электрической энергии, называют силовыми трансформаторами.

В.8. Магнитные материалы. Термины и определения

(ГОСТ 19693-74 Материалы магнитные.

Термины и определения)

Термин	Определение
А. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ	
1. Диамагнетик (1) *	<p>Вещество, атомы, ионы или молекулы которого не имеют результирующего магнитного момента при отсутствии внешнего магнитного поля.</p> <p>Примечание. Во внешнем постоянном магнитном поле магнитная восприимчивость такого вещества отрицательна.</p> <p>Магнитная восприимчивость (б. в) – это мера магнитных свойств материала, которая указывает, притягивается ли материал или отталкивается от внешнего магнитного поля</p>
2. Парамагнетик (2)	<p>Вещество, атомы, ионы или молекулы которого имеют результирующий магнитный момент при отсутствии внешнего магнитного поля.</p> <p>Примечание. Во внешнем постоянном магнитном поле магнитная восприимчивость такого вещества положительна, но много меньше единицы</p>
3. Ферромагнетик (3)	<p>Кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля</p>
4. Антиферромагнетик (4)	<p>Кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю</p>

* В скобках указаны номера согласно ГОСТ 19693-74.

Термин	Определение
5. Ферримагнетик (5)	Кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, магнитные моменты атомов или ионов которых находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля
6. Магнитный материал (6)	Материал, обладающий свойствами ферромагнетика или ферримагнетика
7. Домен (7)	Область в магнитном материале или антиферромагнетике, имеющая пространственно однородное упорядочение магнитных моментов атомов или ионов
8. Магнитная анизотропия (9)	Неодинаковость магнитных свойств в магнитном материале в различных направлениях
9. Ось легкого намагничивания (12)	Кристаллографическая ось, при намагничивании вдоль которой напряженность магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности технического насыщения, минимальна
10. Ось трудного намагничивания (13)	Кристаллографическая ось, при намагничивании вдоль которой напряженность магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности технического насыщения, максимальна
11. Точка Кюри (15)	Критическая температура, выше которой ферромагнетик (ферримагнетик) становится парамагнетиком
12. Магнитомягкий материал (18)	Магнитный материал с коэрцитивной силой по индукции не более 4 кА/м
13. Магнитотвердый материал (19)	Магнитный материал с коэрцитивной силой по индукции не менее 4 кА/м

Термин	Определение
Б. ПРОЦЕССЫ И СОСТОЯНИЯ	
13. Намагничивание (20)	Процесс, в результате которого под воздействием внешнего магнитного поля возрастает намагниченность магнитного материала
14. Размагничивание (21))	Процесс, в результате которого под воздействием внешнего магнитного поля уменьшается намагниченность магнитного материала
15. Перемагничивание (22)	Процесс, в результате которого под воздействием внешнего магнитного поля направление вектора намагниченности магнитного материала меняется на противоположное
16. Размагниченное состояние (23)	Состояние магнитного материала, при котором значение его намагниченности равно нулю
17. Динамически размагниченное состояние (24)	Размагниченное состояние, полученное при помощи внешнего знакопеременного периодического магнитного поля, амплитуда напряженности которого уменьшается от значения, соответствующего намагниченности технического насыщения, до нуля
18. Статически размагниченное состояние (25)	Размагниченное состояние, полученное при помощи внешнего равномерно меняющегося магнитного поля, которое приводит намагниченность магнитного материала к такому значению, что при удалении поля она становится равной нулю
19. Термически размагниченное состояние (26)	Размагниченное состояние, полученное повышением температуры материала выше точки Кюри и последующим охлаждением его при отсутствии внешнего магнитного поля

Термин	Определение
В. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ	
20. Магнитный гистерезис (27)	Неоднозначная зависимость магнитной индукции (намагниченности) магнитного материала от напряженности внешнего магнитного поля при его квазистатическом изменении
21. Петля магнитного гистерезиса по индукции (28)	Замкнутая кривая, выражающая зависимость магнитной индукции материала от амплитуды напряженности магнитного поля при периодическом достаточно медленном изменении последнего
22. Симметричная петля магнитного гистерезиса (31)	Петля магнитного гистерезиса, получаемая при циклическом изменении напряженности магнитного поля между равными по абсолютному значению максимальной и минимальной напряженностями и симметричная относительно начала координат
23. Предельная петля магнитного гистерезиса (33)	Симметричная петля магнитного гистерезиса, максимальное значение намагниченности которой соответствует намагниченности технического насыщения
24. Начальная кривая намагничивания по индукции (34)	Кривая, выражающая зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в процессе намагничивания предварительно термически размагниченного магнитного материала при последовательном возрастании напряженности магнитного поля
25. Основная кривая намагничивания (36)	Кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля
26. Самопроизвольная намагниченность (40)	Намагниченность домена при отсутствии внешнего магнитного поля

Термин	Определение
27. Намагниченность технического насыщения (41)	Намагниченность магнитного материала, подвергнутого воздействию такого внешнего магнитного поля, при увеличении напряженности которого намагниченность не может быть существенно повышена
28. Остаточная индукция B_r (45)	Индукция, сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до намагниченности технического насыщения и уменьшения напряженности магнитного поля в нем до нуля
29. Коэрцитивная сила по индукции H_c (46)	Величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения магнитной индукции от остаточной индукции до нуля
30. Начальная магнитная проницаемость μ_n (50)	Значение магнитной проницаемости на начальной или основной кривой намагничивания по индукции при стремлении напряженности магнитного поля к нулю, деленное на магнитную постоянную
31. Комплексная магнитная проницаемость (55)	<p>Отношение комплекса магнитной индукции к комплексу напряженности магнитного поля в материале, деленное на магнитную постоянную.</p> <p>Примечания:</p> <p>При этом напряженность магнитного поля изменяется во времени синусоидально, а для магнитной индукции берется составляющая, изменяющаяся во времени синусоидально с той же частотой, что и напряженность магнитного поля.</p> <p>Предполагается, что пространственные векторы, характеризующие напряженность магнитного поля и индукции, параллельны</p>

Термин	Определение
32. Амплитудная магнитная проницаемость $\mu_{ам}$ (56)	Проницаемость, равная модулю комплексной магнитной проницаемости
33. Максимальная магнитная проницаемость μ_{max} (58)	Максимальное значение магнитной проницаемости как функции напряженности магнитного поля на основной кривой намагничивания по индукции
34. Дифференциальная магнитная проницаемость μ_d (60)	Производная от магнитной индукции по напряженности магнитного поля в данной точке начальной кривой намагничивания по индукции (петли магнитного гистерезиса), деленная на магнитную постоянную
35. Продольная магнитострикция (63)	Относительное изменение линейного размера образца из магнитного материала в направлении намагничивания
36. Удельные магнитные потери (69)	Мощность, поглощаемая в единице массы магнитного материала и рассеиваемая в виде тепла при воздействии на материал меняющегося во времени магнитного поля
37. Удельные магнитные потери на гистерезис (71)	Часть удельных магнитных потерь, обусловленная явлением магнитного гистерезиса
38. Удельные магнитные потери на вихревые токи (72)	Часть удельных магнитных потерь, обусловленная вихревыми токами

В.9. Элементы теории магнетизма. Магнитные материалы

В.9.1. Магнитная проницаемость

В системе единиц СИ магнитная проницаемость вакуума – магнитная постоянная – составляет (практически также и воздуха) [20]

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = \text{const, Гн/м.} \quad (\text{В.35})$$

Абсолютная магнитная проницаемость вещества (среды), например, электротехнической стали, величина переменная, обозначается символом μ_a , Гн/м.

Относительная магнитная проницаемость вещества определяется так

$$\mu = \mu_a / \mu_0 = \text{var, o. e.}$$

Относительная магнитная проницаемость показывает во сколько раз магнитное поле в веществе больше, чем в вакууме. Для электротехнической стали $\mu \gg 1$ (несколько тысяч и более, см. табл. В.4, с.98). Из электротехнической стали изготавливаются магнитопроводы трансформаторов и электрических машин. Для вакуума (и воздуха) $\mu = \mu_0 / \mu_0 = 1$.

В.9.2. Магнитные свойства в свободном пространстве

Длинный провод с текущим по нему постоянным током генерирует круговое магнитное поле напряжённостью H и индукцией B , которое создаётся вокруг проводника (рис. В.26).

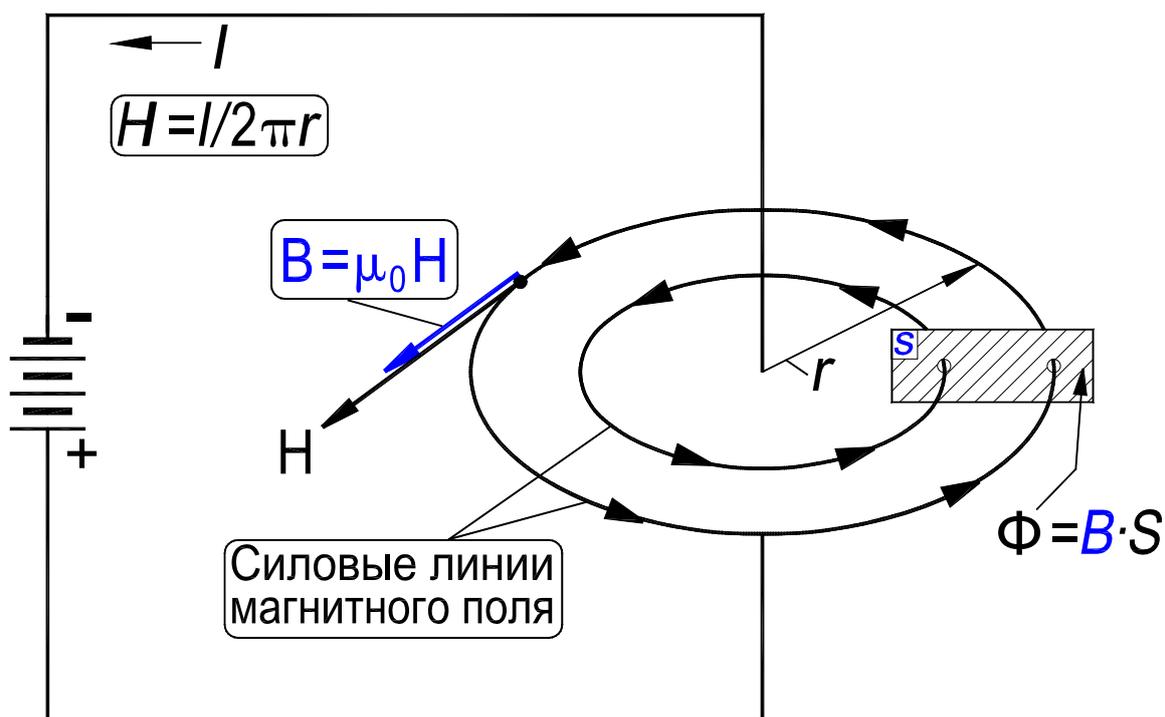


Рис. В.26. Магнитное поле, созданное проводником с током

Направление линий магнитного потока (поля) вокруг проводника может быть определено с помощью «правила буравчика» или с помощью «правила правой руки»: если проводник зажать кистью правой руки так, чтобы большой палец показывал направление тока, то пальцы покажут направление силовых линий магнитного поля. Здесь имеется в виду техническое направление тока (от «+» к «-»), а не потока электронов (от «-» к «+»).

Когда ток в проводнике течёт в одном направлении, то стрелка компаса отклоняется в одну сторону. Если изменить направление тока, стрелка будет отклоняться в другую сторону. Это доказывает, что магнитное поле полярно. Когда ток меняет направление, магнитодвижущая сила (МДС) тоже меняет направление.

В.9.3. Усиление магнитного поля

Когда ток течёт по проводнику, магнитное поле возникает вокруг провода. Если два проводника проводят ток в одном направлении, но они расположены относительно далеко друг от друга, как показано на рис. В.27, генерируемые ими магнитные поля не взаимодействуют.

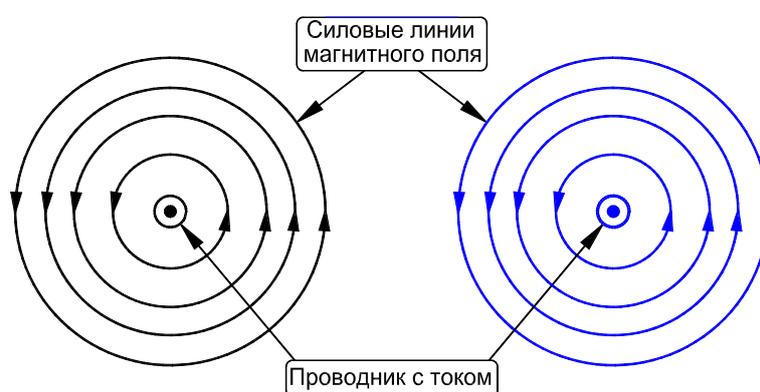


Рис. В.27. Магнитные поля, возникающие вокруг свободных токоведущих проводников
(между проводниками большое расстояние)

Если же проводники расположены рядом, как показано на рис. В.28, магнитные поля складываются и интенсивность поля удваивается.

Если провод намотан на каркас, то его магнитное поле значительно усиливается. Катушка фактически имеет такое же поле, как у стержневого магнита, как показано на рис. В.29. Как и стержневой магнит, катушка имеет северный и южный полюсы $N-S$ и нейтральную центральную область. Более того, полярность может быть изменена при реверсировании тока катушки I . Это также демонстрирует зависимость магнитного поля от направления тока.

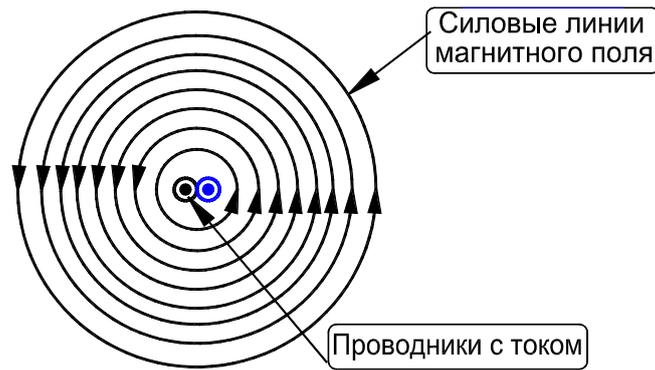


Рис. В.28. Магнитные поля, возникающие вокруг близко расположенных проводников с током

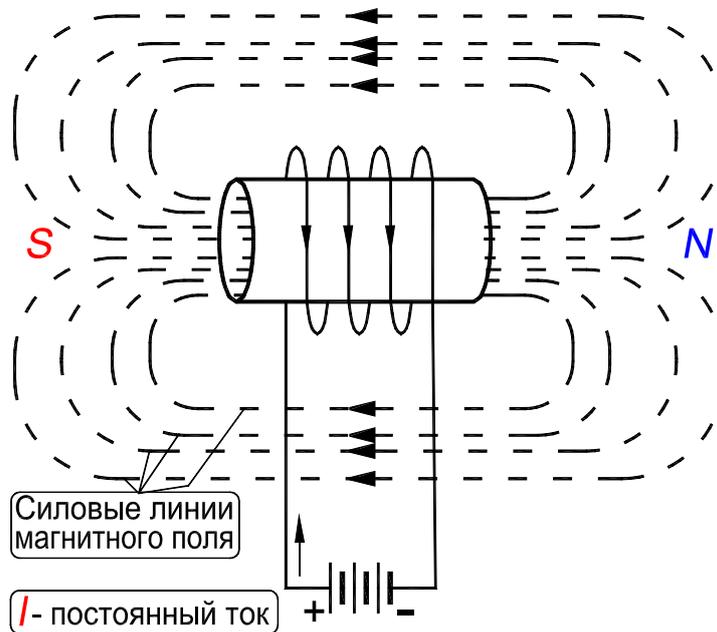


Рис. В.29. Воздушная катушка с постоянным током обмотки

Магнитной цепью является пространство, в котором замыкается магнитный поток вокруг катушки. Величина потока определяется величиной тока I и числом витков катушки. Произведение $w \cdot I$, где w – число витков катушки, называется магнитодвижущей силой (МДС). Связь между плотностью потока B [Вб/м²] {или, что тоже самое, магнитной индукцией B [Тл]} и напряжённостью магнитного поля H [А/м] для воздушной катушки дана на рис. В.30. Отношение B/H называется магнитной проницаемостью μ_0 . Для воздушной катушки $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = const в системе SI.

$$B = \mu_0 H. \tag{В.36}$$

Если батарею, изображённую на рис. В.29, заменить источником переменного напряжения, что проиллюстрировано на рис. В.31, то зависимость $B(H)$ будет иметь вид, показанный на рис. В.32. Линейность зависимости $B(H)$ – главное

достоинство воздушной катушки. Ввиду линейности этой зависимости, рост H приводит к возрастанию B , и поэтому очень сильные магнитные поля могут быть получены при больших токах. Очевидно, что предельная величина тока определяется сечением провода обмотки.

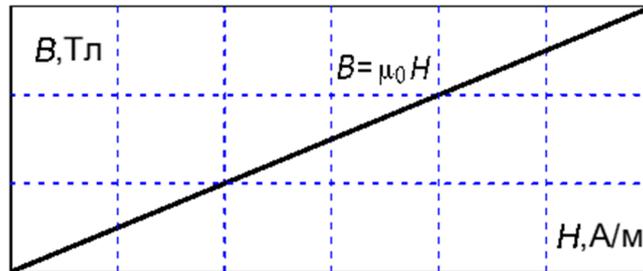


Рис. В.30. Характеристика намагничивания катушки постоянным током

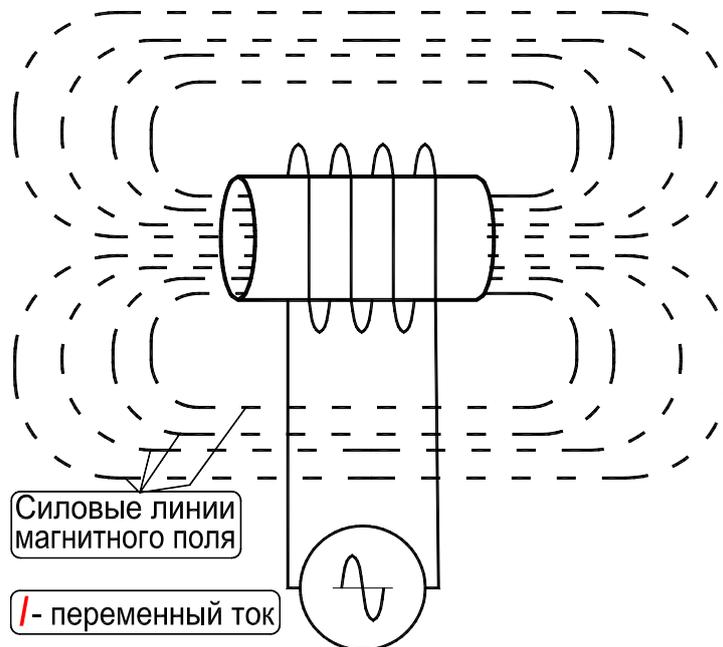


Рис. В.31. Воздушная катушка с возбуждением от источника переменного напряжения

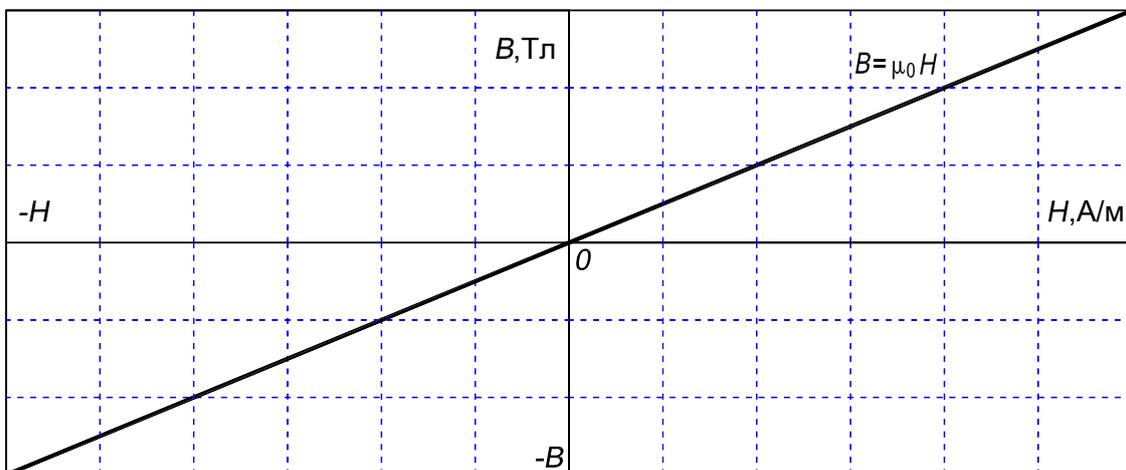


Рис. В.32. Характеристика намагничивания катушки переменным током

В.9.4. Простейший трансформатор

Схема простейшего трансформатора представлена на рис. В.33. Он состоит из двух воздушных катушек, охваченных общим магнитным потоком. Магнитный поток исходит из концов первичной катушки во все стороны. Обмотка первичной катушки соединена с источником переменного напряжения. Цепь обмотки вторичной катушки не замкнута. Отметим, что не все силовые линии магнитного поля являются общими для обеих катушек. Магнитный поток, не являющийся общим для *обеих катушек*, называется потоком рассеяния.

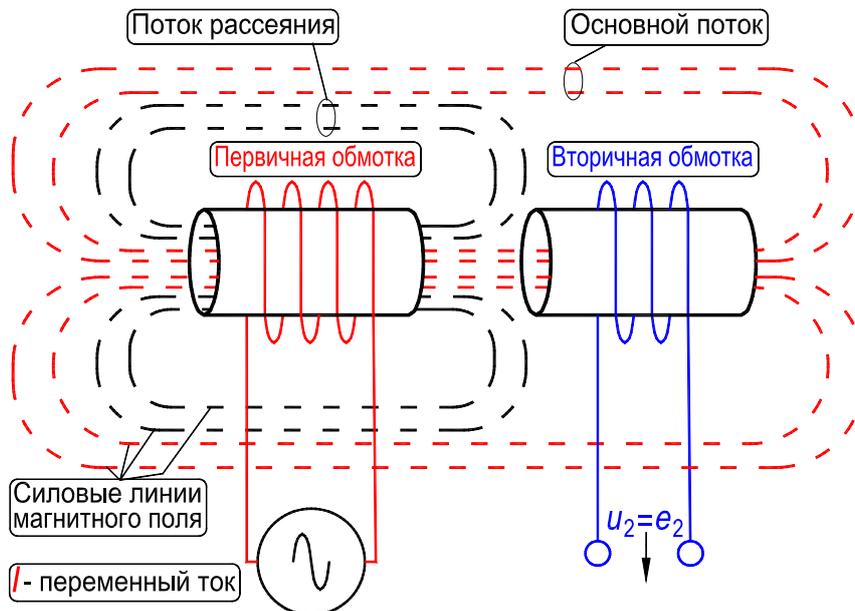


Рис. В.33. Простейшая схема трансформатора (режим холостого хода)

В.9.5. Магнитный сердечник (магнитопровод)

Большинство материалов — плохие проводники магнитного потока, потому что у них невысокая магнитная проницаемость. Вакуум имеет магнитную проницаемость равную, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (в системе СИ), и другие немагнитные материалы, такие как воздух, бумага и медь, характеризуются проницаемостью такого же порядка. Магнитные материалы, такие как железо, никель, кобальт и их сплавы, могут иметь магнитную проницаемость μ величиной до сотен тысяч.

Для достижения более высоких показателей по сравнению с воздушной катушкой, показанной на рис. В.34, следует ввести в катушку магнитный сердечник, как показано на рис. В.35. В этом случае магнитные силовые линии распространяются по пути с наименьшим магнитным сопротивлением и концентрируются внутри сердечника. Существует предельная возможная величина магнитного потока, который может быть создан в данном сердечнике. Эта величина определяется

насыщением сердечника (см. разд. В.10, с. 98). После насыщения сердечник теряет свои магнитные свойства, и катушка фактически превращается в воздушную (рис. В.36). В режиме насыщения магнитная проницаемость сердечника μ_a равна магнитной проницаемости воздуха μ_0 .

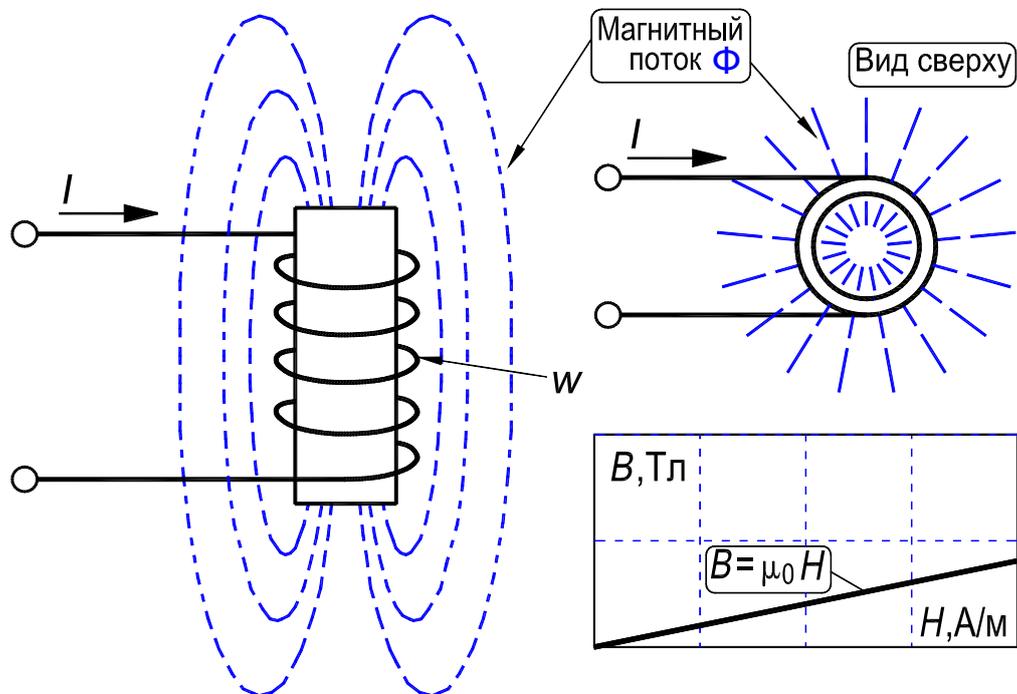


Рис. В.34. Магнитное поле воздушной катушки

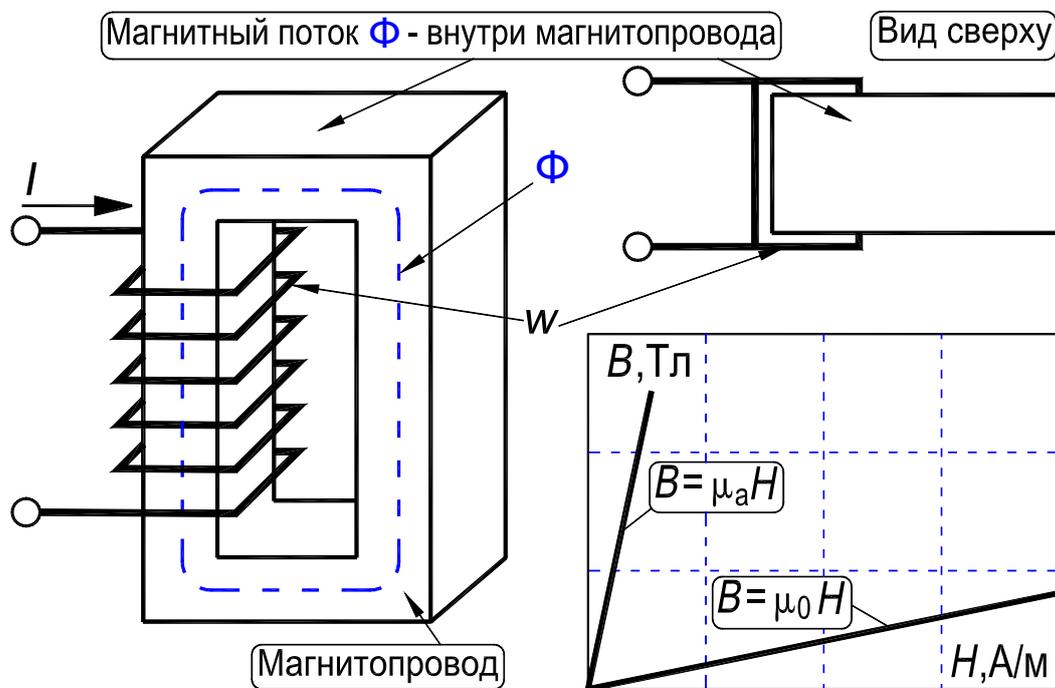


Рис. В.35. Магнитное поле катушки с ферромагнитным сердечником

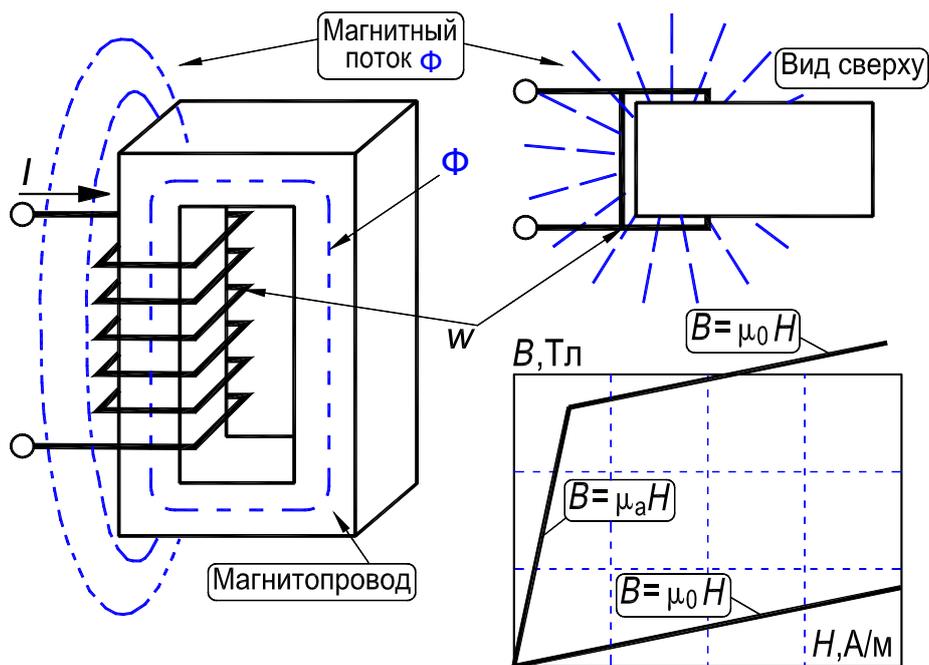


Рис. В.36. Катушка с насыщенным сердечником

В.9.6. Фундаментальные характеристики магнитного сердечника

На рис. В.37 представлена кривая первоначального намагничивания ферромагнитного материала. Заметно, что вначале магнитная индукция B растёт очень медленно до точки A , затем – очень быстро до точки B и затем почти перестаёт расти. Участок кривой после точки B называется «коленом» характеристики. В точке C наступает насыщение материала сердечника. В режиме насыщения справедливо соотношение (В.37).

$$\Delta B / \Delta H \approx 0. \tag{В.37}$$

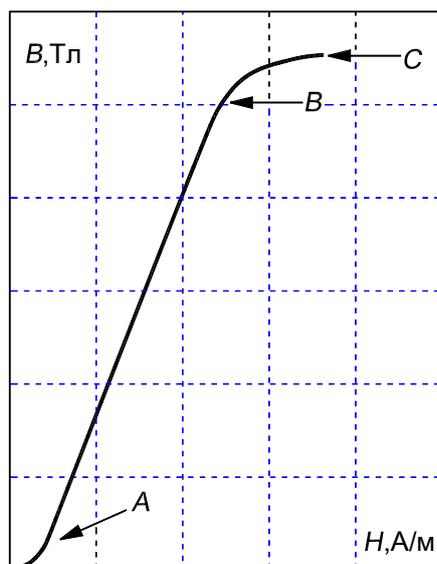


Рис. В.37. Типичная кривая первоначального намагничивания ферромагнитного материала (см. рис. В.42)

На рис. В.38, В.39 и В.40 показано, как распространяется магнитный поток в сердечнике от его внутренних областей к внешним.

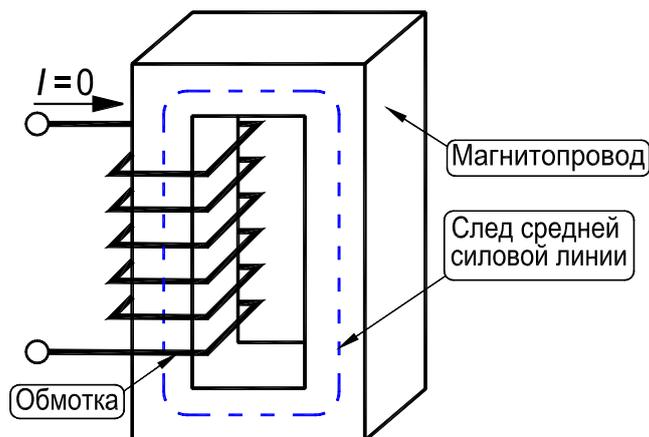


Рис. В.38. Не возбуждённый магнитный сердечник

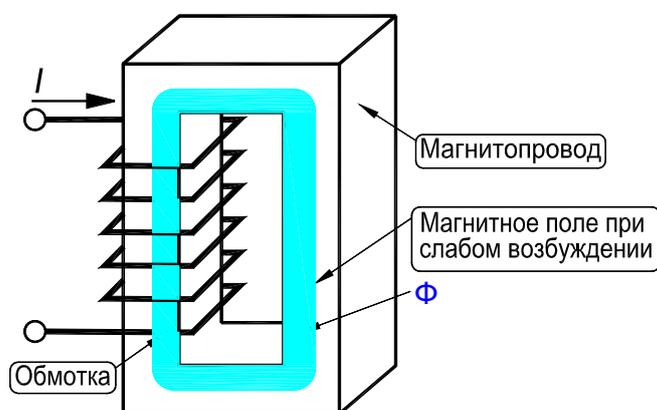


Рис. В.39. Слабо возбуждённый магнитный сердечник

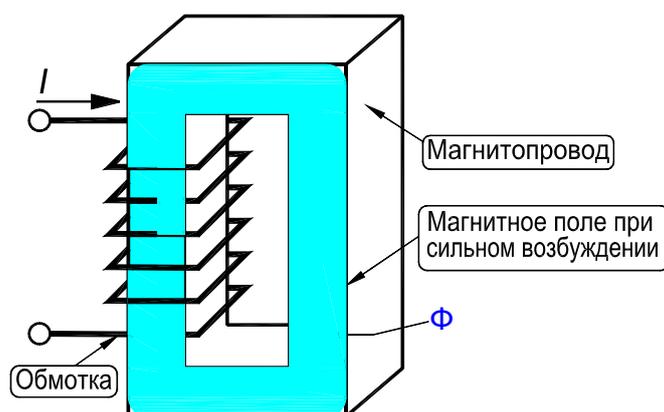


Рис. В.40. Магнитный сердечник на грани насыщения

В.9.7. Зависимость $B(H)$ при повторном перемагничивании сердечника

В соответствии с формой петли гистерезиса делают выводы о свойствах магнитного материала. Результат полного цикла перемагничивания магнитного материала представлен на рис. В.41. С ростом напряжённости H растёт индукция B в соответствии с линией синего цвета вплоть до индукции насыщения B_s .

При уменьшении H индукция уменьшается по другому пути до величины B_r , когда $H = 0$. Величина B_r называется остаточной индукцией. Напряжённость H_c при которой $B = 0$, называется коэрцитивной силой. Неоднозначность зависимости $B(H)$ обусловлена доменной структурой материала (см. разд. В.10.7, с. 102, сл.).

Сердечник трансформатора практически никогда не намагничивается в соответствии с кривой синего цвета на рис. В.41, потому что в нём всегда есть некоторая остаточная намагниченность.

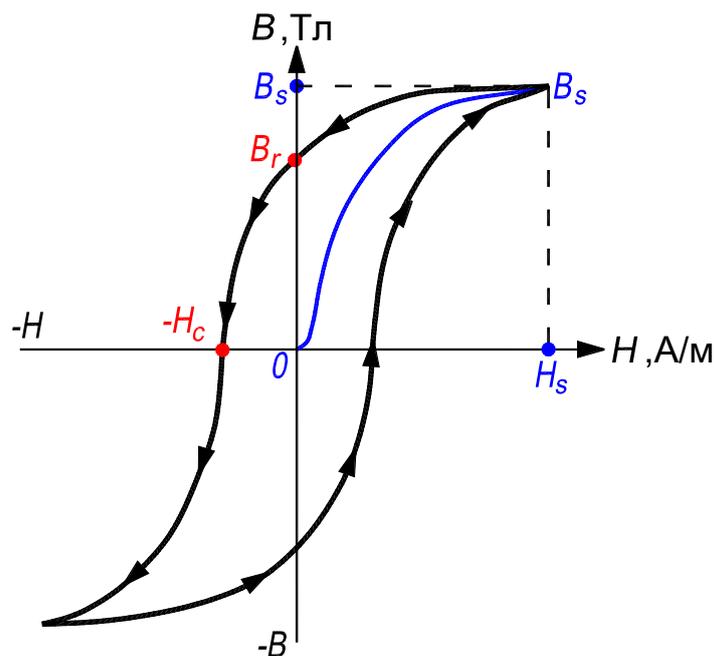


Рис. В.41. Типичная петля гистерезиса магнитного материала (см. рис. В.48)

Петля гистерезиса характеризует энергию, выделяющуюся в сердечнике. Измерение петли гистерезиса следует осуществлять на постоянном токе, так как при этом удаётся избежать появления вихревых токов. Площадь петли гистерезиса зависит от частоты перемагничивания. Чем выше частота, тем шире петля. Только статическая петля гистерезиса, измеряемая на постоянном токе, характеризует потери энергии на перемагничивание данного магнитного материала.

В.9.8. Виды магнитной проницаемости

Магнитная проницаемость характеризует способность материала проводить магнитный поток. Величина магнитной проницаемости при данной индукции есть мера лёгкости, с которой материал сердечника может быть намагничён до данной индукции. Она определяется как отношение индукции B к напряжённости H .

$$\text{Магнитная проницаемость} = B/H, \text{ Гн/м.} \quad (\text{В.38})$$

Магнитная проницаемость вакуума в системе единиц СИ составляет

$$\mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-8} = 4\pi \cdot 10^{-7} = \text{const}, \text{ Гн/м.}$$

На рис. В.42 представлены кривые первоначального намагничивания. Наклон кривой в каждой данной точке даёт значение магнитной проницаемости в данной точке. Магнитная проницаемость вещества $\mu_a = \text{var}$ – величина непостоянная. На рис. В.43 показана её зависимость от B и H .

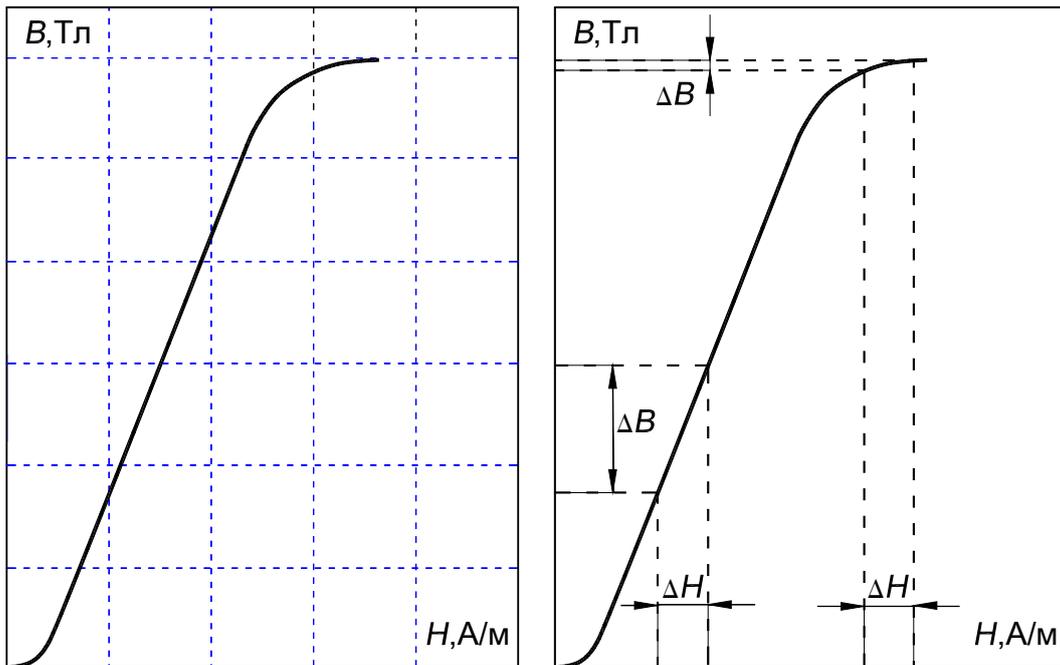


Рис. В.42. Кривая первоначального намагничивания

Существует много способов определения магнитной проницаемости, обозначенной буквой μ с соответствующим индексом:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = \text{const}, \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость вакуума.

$\mu = \mu_a / \mu_0$, о. е. – относительная магнитная проницаемость материала – это проницаемость материала (вещества) относительно свободного пространства.

$\mu_a = \mu \cdot \mu_0 = \text{var}$ – абсолютная магнитная проницаемость материала.

μ_n – начальная магнитная проницаемость. Определяется в начале кривой первоначального намагничивания. Измеряется при очень малой напряженности, 0,2 – 0,5 А/м.

μ_n – нормальная магнитная проницаемость. Это отношение B/H в любой точке кривой $B-H$.

$\mu_d = (1/\mu_0) dB/dH$ – дифференциальная магнитная проницаемость – характеризует крутизну отдельных участков кривой намагничивания.

μ_{\max} - максимальная магнитная проницаемость - это наклон касательной, проведённой из начала координат к колену кривой первоначального намагничивания (рис. В.44).

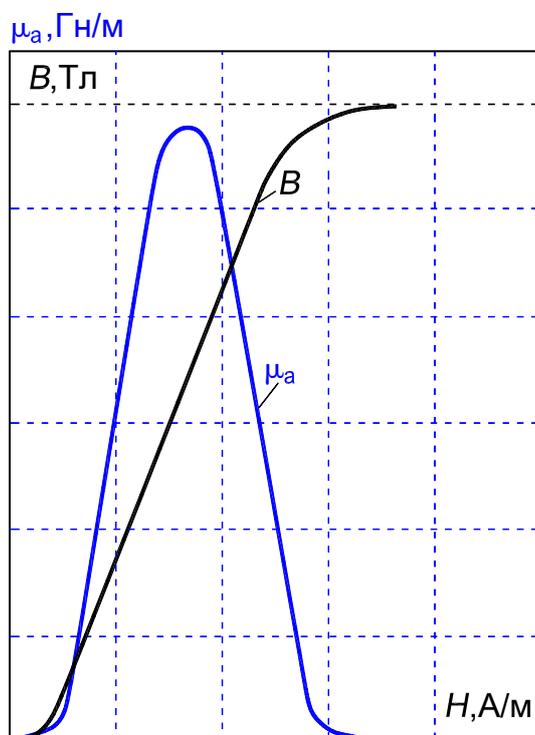


Рис. В.43. Зависимость магнитной проницаемости от B и H (см. рис. В.49)

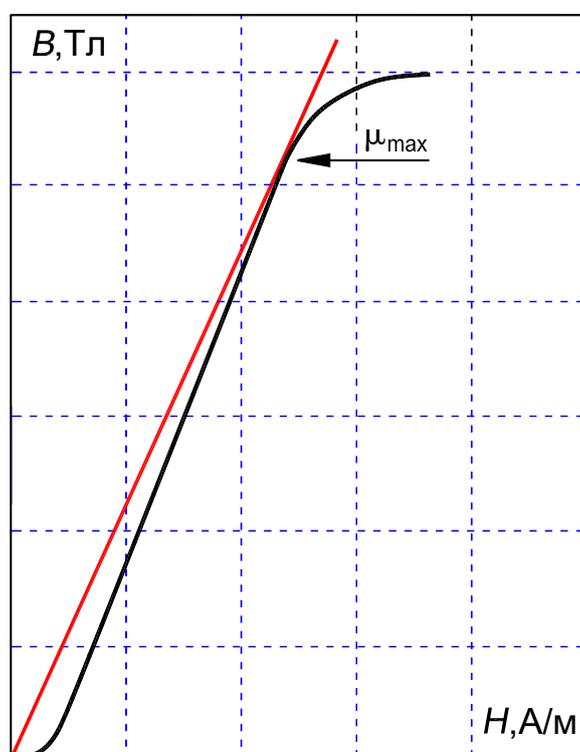


Рис. В.44. Максимальная магнитная проницаемость

В.9.9. Магнитодвижущая сила (МДС) и напряжённость H

Способность обмоток (катушек) возбуждать магнитное поле характеризуется магнитодвижущей силой (МДС), которая определяется уравнением (В.39)

$$\text{МДС} = w \cdot I, \text{ А}, \quad (\text{В.39})$$

где w – число витков обмотки, а I – ток в А.

Напряжённость магнитного поля – это МДС на единицу длины.

$$H = \text{МДС}/l_c, \text{ А/м}, \quad (\text{В.40})$$

где l_c – длина средней силовой линии, выраженная в [м].

$$H = w \cdot I/l_c, \text{ А/м}. \quad (\text{В.41})$$

Если магнитный поток Φ разделить на площадь поперечного сечения магнитопровода S_c , то результатом будет индукция B .

$$B = \Phi/S_c, \text{ Тл}. \quad (\text{В.42})$$

Плотность потока (индукция) B в магнитной среде при наличии напряжённости магнитного поля H зависит от магнитной проницаемости среды μ_a и интенсивности магнитного поля.

$$B = \mu_a \cdot H, \text{ Вб/м}^2 = \text{Тл}. \quad (\text{В.43})$$

Величина намагничивающего тока I_m для сердечника с обмоткой может быть найдена по следующему уравнению:

$$I_m = H_0 l_c / w, \text{ А}, \quad (\text{В.44})$$

где H_0 – значение напряжённости, определяемое по зависимости $B(H)$ соответственно значению индукции B_0 . Зависимость $B(H)$ приводится в справочной литературе.

В.9.10. Магнитное сопротивление

Магнитный поток, возникающий в данном материале посредством МДС, зависит от сопротивления материала потоку, которое называется магнитным сопротивлением R_m . Магнитное сопротивление сердечника зависит от материала сердечника и его размеров. Магнитное сопротивление аналогично электрическому сопротивлению. Соотношения между МДС, потоком и магнитным сопротивлением аналогичны соотношениям между ЭДС, током и сопротивлением.

$$\text{ЭДС}(E) = I \cdot R = \text{ток} \times \text{сопротивление}. \quad (\text{В.45})$$

Плохой проводник магнитного потока имеет большое магнитное сопротивление R_m . Чем больше магнитное сопротивление, тем большая МДС требуется для создания заданной величины магнитного поля (потока).

Электрическое сопротивление проводника зависит от его длины l , площади поперечного сечения S_w и удельного сопротивления ρ , которое определяет сопротивление единицы длины. Для нахождения сопротивления медного провода следует использовать следующее соотношение:

$$R = \rho l / S_w, \text{ Ом.} \quad (\text{В.46})$$

В случае магнитного материала величина $1/\mu$ является аналогом ρ и называется удельным магнитным сопротивлением.

$$R_m = l_c / \mu_0 \cdot \mu \cdot S_c, \quad (\text{В.47})$$

где l_c – длина средней силовой линии, м; S_c – площадь поперечного сечения сердечника, м²; μ – относительная магнитная проницаемость магнитного материала; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

Типичный магнитный сердечник показан на рис. В.45 для иллюстрации параметров l_c и S_c .

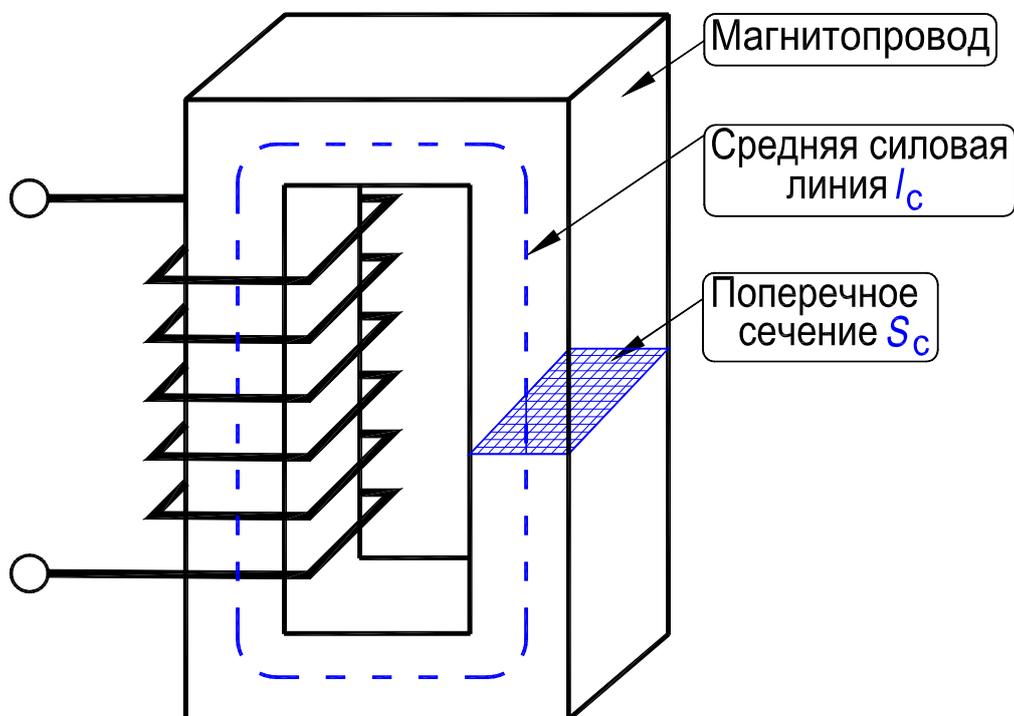


Рис. В.45. Катушка с магнитным сердечником:
определение средней силовой линии и площади поперечного сечения

В.9.11. Влияние воздушного зазора

Материал с большой магнитной проницаемостью имеет низкое магнитное сопротивление при данной длине средней силовой линии и данной площади поперечного сечения S_c . Если в магнитную цепь введён воздушный зазор l_δ , как показано на рис. В.46, то почти всё магнитное сопротивление цепи будет определяться этим зазором, потому что магнитное сопротивление воздуха много больше, чем у магнитного материала. Практически во всех случаях подбором ширины воздушного зазора можно регулировать величину магнитного сопротивления цепи.

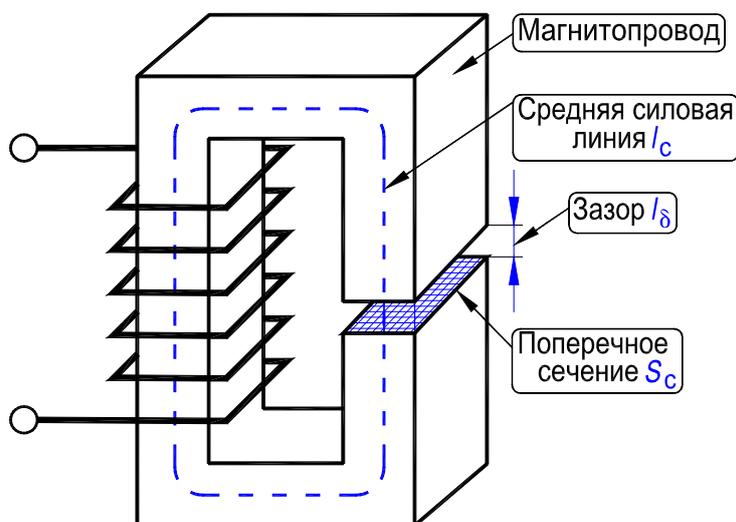


Рис. В.46. Типичный магнитный сердечник с воздушным зазором

Пример поможет наилучшим образом понять эту процедуру. Полное магнитное сопротивление сердечника есть сумма сопротивлений железа и воздушного зазора. Эти сопротивления суммируются так же, как в электрической цепи.

Уравнение для расчёта магнитного сопротивления R_δ воздушного зазора такое же, как и для расчёта магнитного сопротивления магнитного материала R_m . Разница лишь в том, что магнитная проницаемость воздуха равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, и нужно использовать длину зазора l_δ вместо длины средней силовой линии l_c .

$$R_\delta = l_\delta / \mu_0 S_c, \quad (\text{В.48})$$

где l_δ – длина зазора в [м]; S_c – площадь поперечного сечения сердечника в [м²].

Полное магнитное сопротивление сердечника представленного на рис. В.46

$$R_{m1} = R_m + R_\delta. \quad (\text{В.49})$$

$$R_{m1} = l_c/\mu_0 \cdot \mu \cdot S_c + l_\delta/\mu_0 S_c,$$

где μ – относительная магнитная проницаемость, присущая данному магнитному материалу.

$$\mu = \mu_a/\mu_0 = B/\mu_0 H, \text{ о. е.} \quad (\text{B.50})$$

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0. \quad (\text{B.51})$$

Магнитное сопротивление зазора будет больше, чем сопротивление железа, даже если длина зазора мала. Полное магнитное сопротивление цепи зависит главным образом от длины воздушного зазора.

Воздушный зазор в сердечнике создаёт очень сильный размагничивающий эффект. Он проявляется в нарушении прямоугольной структуры петли гистерезиса, то есть в резком уменьшении магнитной проницаемости материала (рис. В.47).

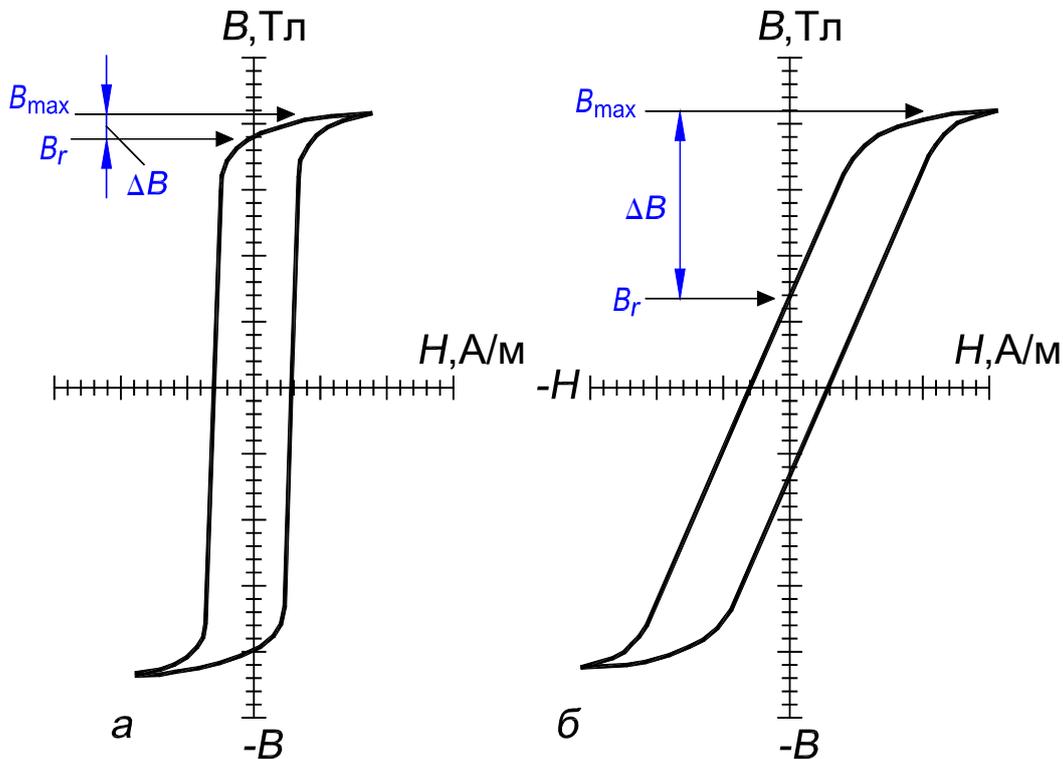


Рис. В.47. Сравнение характеристик $B(H)$ магнитного материала сердечника без зазора (а) и с зазором (б)

Подмагничивание постоянным током действует аналогично. Эффективность воздействия зависит от длины средней силовой линии и от характеристик материала. При той же длине зазора снижение магнитной проницаемости будет меньше, чем больше длина средней силовой линии. Но эффект более сильно выражен в случае материала с большой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой.

В.10. Магнитные материалы и их характеристики

В.10.1. Классификация

Магнитный материал – основной компонент при проектировании магнитного устройства. Общепринято выделение двух основных групп магнитных материалов – магнитно-мягкие и магнитно-твёрдые.

Характерными свойствами магнитно-мягких материалов являются их способность намагничиваться до насыщения даже в слабых полях (высокая магнитная проницаемость) и малые потери на перемагничивание.

Магнитно-твёрдые материалы предназначены для постоянных магнитов. Они характеризуются большой остаточной индукцией B_r и коэрцитивной силой H_c .

Магнитно-мягкие материалы – это электротехническая (кремниевая) сталь, железо-никелевый сплав (пермаллой), железо-кобальтовый сплав (перминдюр), аморфные металлические сплавы и ферриты. Основные характеристики: индукция насыщения B_s , магнитная проницаемость μ , удельное электрическое сопротивление ρ , характеризующее потери в сердечнике, остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c . В табл. В.4 приведены ориентировочные данные трёх групп магнитно-мягких материалов.

Таблица В.4. Некоторые свойства магнитно-мягких ферромагнитных материалов

Материал	Магнитная проницаемость		Коэрцитивная сила H_c , А/м	Индукция насыщения B_s , Тл	Удельное сопротивление, мкОм · м
	начальная μ_n	максимальная μ_{max}			
Технически чистое железо	250 – 400	3 500 – 4 500	50 – 100	2,18	0,1
Электротехническая сталь	200 – 600	3 000 – 8 000	10.,,65	1,95 – 2,02	0,25 – 0,6
Низконикелевый пермаллой	1 500 – 4 000	15 000 – 60000	5 – 32	1,0 – 1,6	0,45 – 0,9

Примечание. Значения μ_n и μ_{max} представлены в относительных единицах (в долях μ_0).

Из электротехнической стали изготавливаются магнитопроводы трансформаторов, электрических машин и др.

В.10.2. Насыщение магнитного материала

Типичная петля гистерезиса магнитно-мягкого материала представлена на рис. В.48. Максимальная напряжённость поля H_s соответствует величине, при которой достигается индукция насыщения B_s .

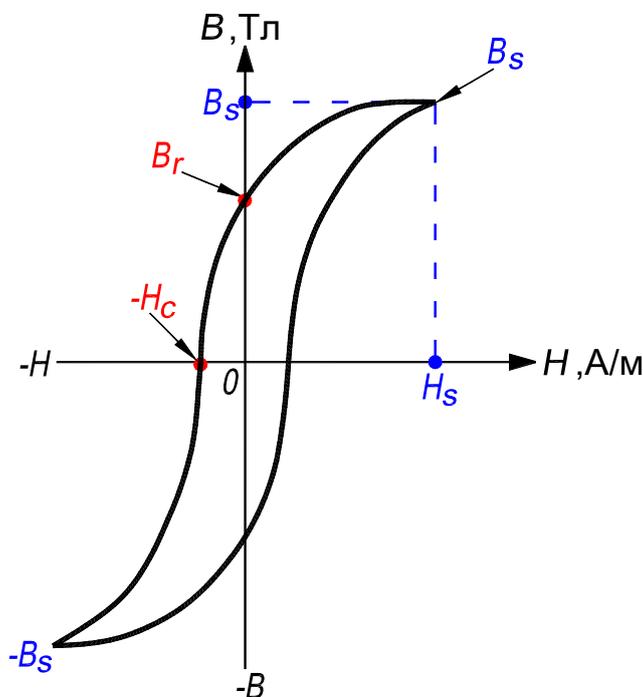


Рис. В.48. Типичная зависимость $B(H)$ магнитно-мягкого материала (см. рис. В.41)

В.10.3. Остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c

На рис. В.48 чётко указана остаточная индукция B_r . Остаточный магнитный поток – это поляризованный поток, оставшийся после снятия возбуждающего напряжения. Напряжённость H_c называется коэрцитивной силой. Это то количество напряжённости, которое необходимо для сведения к нулю остаточного магнитного потока B_r .

В.10.4. Магнитная проницаемость материала

Магнитная проницаемость магнитного материала – это мера лёгкости его намагничивания. Абсолютная магнитная проницаемость материала определяется формулой (В.52).

$$\mu_a = B/H = \text{var}, \text{ Гн/м.} \quad (\text{В.52})$$

Взаимосвязь между B и H нелинейна, что видно по рис. В.48. Поэтому их отношение не постоянно. Зависимость магнитной проницаемости от индукции B показана на рис. В.49. Здесь же можно найти B , при которой μ имеет максимум.

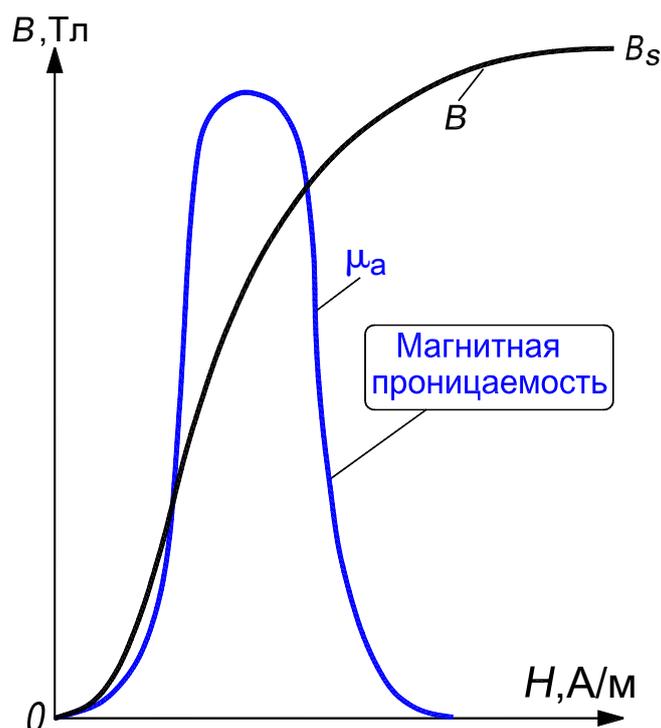


Рис. В.49. Зависимость магнитной проницаемости от B и H (см. рис. В.43)

В.10.5. Потери на гистерезис и на вихревые токи

Площадь петли гистерезиса (рис. В.48) – это мера энергии, теряемой в сердечнике при его перемагничивании. Эти потери определяются потерями на гистерезис и на вихревые токи. Если электрическое сопротивление сердечника велико, то вихревые токи малы. Поэтому материал с низкими потерями должен иметь большое удельное сопротивление. Потери в сердечнике контролируются правильным выбором марки стали и её толщиной. Они являются функцией структуры магнитного материала, толщины его, плотности магнитного потока B , частоты f и рабочей температуры. Выбрав правильно материал и организовав его работу в пределах допусков, можно предотвратить перегрев, вследствие чего могла бы быть повреждена изоляция провода и/или пропитка обмотки.

В.10.6. Электротехническая (кремниевая) сталь

Кремниевая сталь была одним из первых сплавов используемых в сердечниках трансформаторов и электрических машин. С добавлением кремния в сталь удалось увеличить её удельное электрическое сопротивление ρ , тем самым уменьшив потери от вихревых токов. Кремниевая сталь обеспечивает бóльшую индукцию насыщения, относительно большое значение магнитной проницаемости при большой плотности потока (индукции) и умеренные потери в диапазоне

звуковых частот (см. табл. В.4, с. 98). Одно из важных усовершенствований было внесено в процесс холодной прокатки, связанной с текстурой стали. Эта сталь имеет особо низкие потери и большую магнитную проницаемость.

Кремнистая электротехническая сталь (по ГОСТу – электротехническая тонколистовая) является основным магнитно-мягким материалом массового потребления. Она сочетает в себе достаточно высокие магнитные свойства с низкой стоимостью и удовлетворительной технологичностью. Введением в состав этой стали кремния достигается повышение удельного электрического сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи. Кроме того, легирование кремнием приводит к увеличению μ_n и μ_{max} , уменьшению H_c и снижению потерь на гистерезис. Промышленные марки электротехнической стали содержат не более 5 % Si. Это объясняется тем, что кремний ухудшает механические свойства стали, придает ей хрупкость и ломкость. Такая сталь непригодна для штамповки.

По технологии изготовления различают стали: горячекатаные изотропные, холоднокатаные изотропные и холоднокатаные анизотропные различных марок. Для изготовления магнитопроводов электрических машин используют преимущественно холоднокатаные изотропные стали. Магнитопроводы трансформаторов изготавливают из холоднокатаных анизотропных сталей. При совпадении направления магнитного потока с направлением прокатки наблюдаются существенно более высокая магнитная проницаемость и меньшие потери на гистерезис (разд. В11, А, с. 110, сл.).

Сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты. Она может быть без электроизоляционного покрытия. Толщина листов стали 0,05 – 1 мм. Сталь различных классов предназначена для изготовления магнитных систем электродвигателей и генераторов всех типов, сердечников дросселей и трансформаторов, деталей реле, измерительных приборов и других магнитных механизмов, работающих как на постоянном, так и переменном токе с частотой, как правило, не выше 1 кГц.

Магнитопроводы формируют либо путем набора из отдельных изолированных пластин, получаемых штамповкой или резкой, либо навивкой из длинных лент. Применение ленточных сердечников из текстурированной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20 – 25 %.

В.10.7. Теория насыщения магнитного материала

Доменная теория природы магнетизма базируется на представлении о том, что все магнитные материалы состоят из индивидуальных молекулярных магнитов спонтанной намагниченности (*domain* – область) /разд. В.8, с. 77, сл./ . Эти мельчайшие магниты способны «перемещаться» внутри материала. Когда магнитный материал находится в размагниченном состоянии, индивидуальные магниты (домены) ориентированы беспорядочно и эффективно нейтрализуют друг друга (рис. В.50). Северный полюс магнитных частиц представлен синим цветом. Когда материал намагничен, магнитные частицы ориентированы в определённом направлении, как показано на рис. В.51, при этом имеет место насыщение стали.

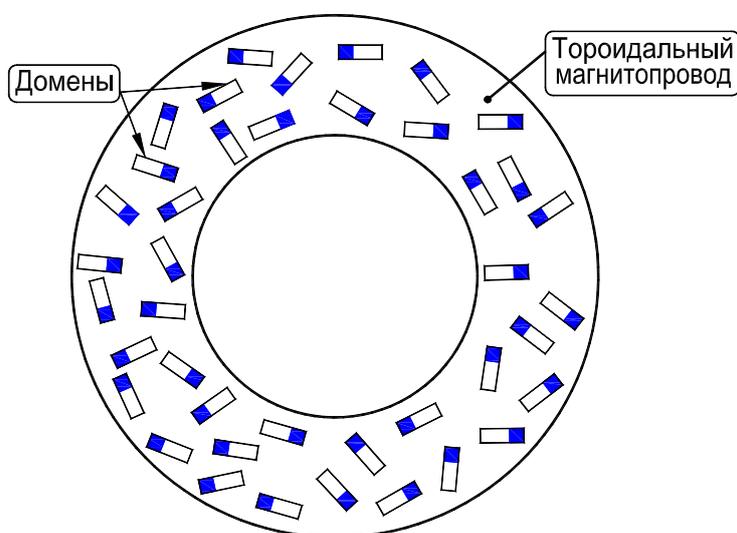


Рис. В.50. Беспорядочное расположение элементарных магнитиков

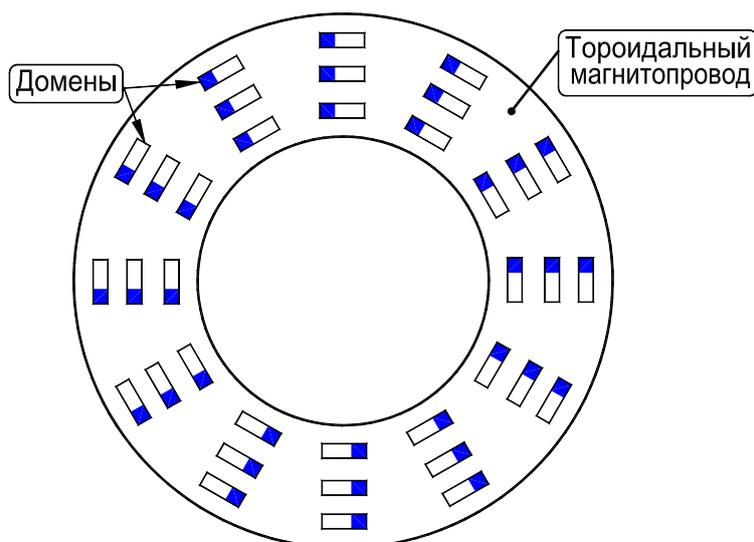


Рис. В.51. Элементарные магнитики ориентированы упорядоченно

Степень намагниченности материала зависит от степени выравнивания ориентации магнитных частиц. Внешняя магнитодвижущая сила влияет

на степень намагниченности до тех пор, пока все домены не будут ориентированы в одну сторону.

Если тороид был помещён в сильное магнитное поле (достаточное для насыщения), почти все домены будут ориентированы в одном направлении. Если поле внезапно было убрано при $B = B_s$, домены останутся в частично упорядоченном состоянии и материал сердечника будет характеризоваться остаточной индукцией B_r .

В.10.8. Теория кривой намагничивания и петли гистерезиса

Типичным ферромагнитным материалом является электротехническая сталь. Если относительная магнитная проницаемость немагнитных материалов остается величиной постоянной, близкой к единице, то для ферромагнетиков μ – величина переменная, достигающая несколько тысяч (см. табл. В.4, с.98). При этом зависимость $B = f(H)$ не только нелинейная, но и неоднозначная, т. е. зависит от направления протекающего тока. Это связано с доменной структурой ферромагнитных материалов.

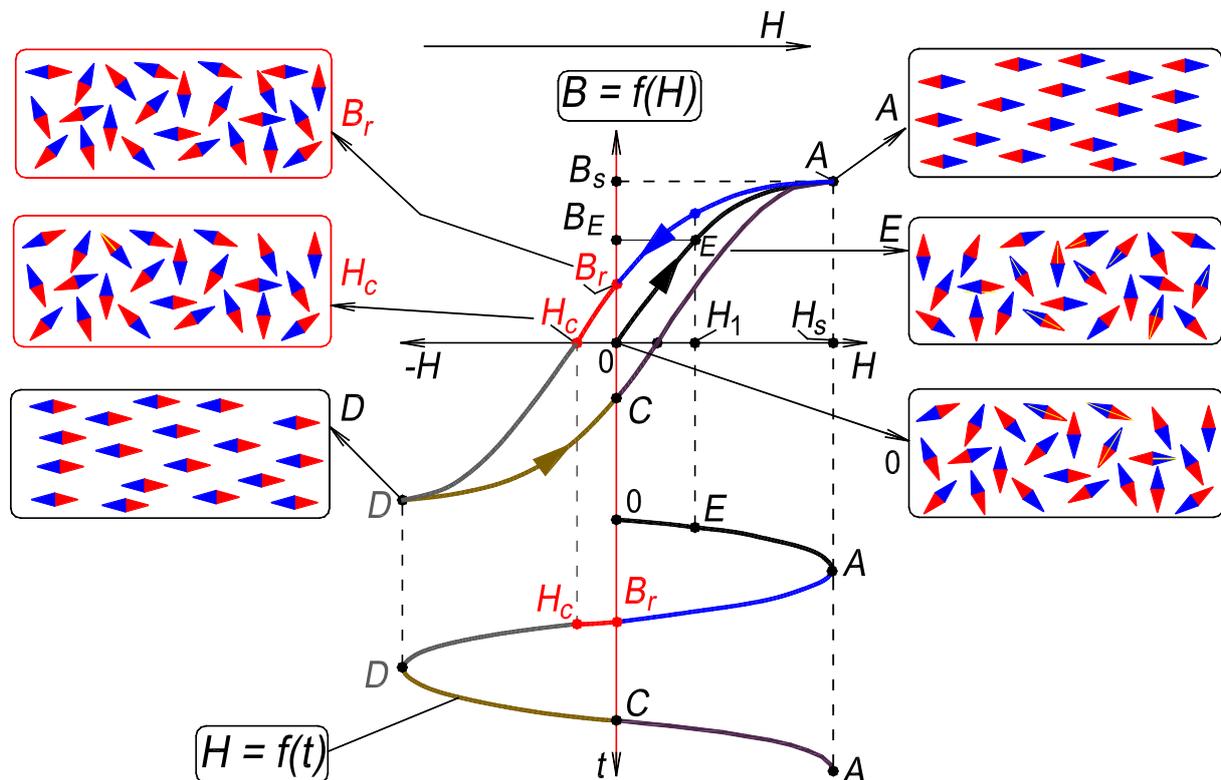


Рис. В.52. Структура ферромагнетика в различных точках петли гистерезиса

Любой ферромагнетик можно представить в виде отдельных микроскопических областей – доменов, обладающих собственным магнитным мо-

ментом $N_0 - S_0$ (на рис. В.52 домены условно показаны цветными стрелками). При отсутствии внешнего магнитного поля (точка 0 на рис. В.52) материал в целом не имеет магнитного момента, поскольку все домены ориентированы хаотично. Магнитная индукция B равна нулю.

При внесении ферромагнетика в магнитное поле напряженностью H домены начинают «поворачиваться» в соответствии с направлением поля. Чем сильнее поле (больше H), тем больше угол поворота доменов, а следовательно, выше значение индукции B (точка E , соответствующая напряженности H_1). В конце концов, все домены оказываются сориентированы по направлению поля и дальнейшее увеличение напряженности H не приводит к увеличению индукции ($B = B_s$), ферромагнетик насыщается (точка A). При уменьшении напряженности внешнего магнитного поля (напряженность H на рис. В.52 изменяется по синусоидальному закону) домены стремятся вернуться в исходное состояние, однако даже при $H = 0$ индукция не становится равной нулю, т. е. материал обладает остаточной намагниченностью (точка B_r).

Чтобы снять намагниченность ($B = 0$), необходимо приложить внешнее поле обратного знака. Требуемая для снятия намагниченности напряженность поля называется коэрцитивной силой (точка H_c). Дальнейшее увеличение напряженности поля обратного знака вплоть до максимального значения вновь ориентирует домены по направлению поля (точка D). Но теперь это направление обратно тому, которое имело место в точке A .

Приведенная на рис. В.52 петля $A - B_r - H_c - D - C - A$ называется петлей гистерезиса. Выполненный анализ хода кривых является упрощенным. Практически процесс происходит значительно сложнее.

В.10.9. Производство электротехнической стали в РФ

Основными производителями металла на российском рынке являются:

А. ПАО «Северсталь», г. Череповец, <https://www.severstal.com>.

На предприятии производится электротехническая сталь:

- нелегированная тонколистовая, ГОСТ 3836-83 Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты. Технические условия;
- изотропная тонколистовая, ГОСТ 21427.2-83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия.

Б. Группа предприятий Новолипецкого Metallургического Комбината. Группа НЛМК – один из мировых лидеров по выпуску трансформаторного и динамного проката:

Трансформаторный (анизотропный) прокат. Компания производит эту высокотехнологичную стальную продукцию на основной производственной площадке в Липецке (предприятие Новолипецкий металлургический комбинат <https://lipetsk.nlmc.com>) и в Екатеринбурге (предприятие ВИЗ-Сталь <https://viz-steel.nlmc.com>). Трансформаторный прокат применяется в электротехнической промышленности в производстве сердечников трансформаторов и неподвижных частей электрических машин.

Динамный (изотропный) прокат. Прокат изготавливается на основной производственной площадке в Липецке. Динамный прокат используется для производства электротехнического оборудования, например компонентов электрических машин, электродвигателей и генераторов.

Каталог продукции НЛМК «Электротехническая анизотропная сталь» – http://zabudsky.ru/katalog_nlmc_2017_v4_rus.pdf.

Далее приводятся экспериментальные диаграммы магнитных свойств стали, марка проката Т145–35S (ГОСТ 2482-2013 Прокат тонколистовой холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали для трансформаторов. Технические условия) производства НЛМК (корпоративный стандарт НЛМК СТО 05757665-008) (см. рис. В.53, листы 1 и 2).

Обозначение марки проката Т145–35S состоит из букв и цифр, расположенных в определённой последовательности, где:

- буква Т – прокат холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали;
- три цифры после Т – стократное нормированное максимальное значение удельных магнитных потерь на перемагничивание, Вт/кг;
- две цифры (через дефис) – стократное значение номинальной толщины проката, мм;
- S – буквенное обозначение класса стали, а именно, сталь обычного качества.

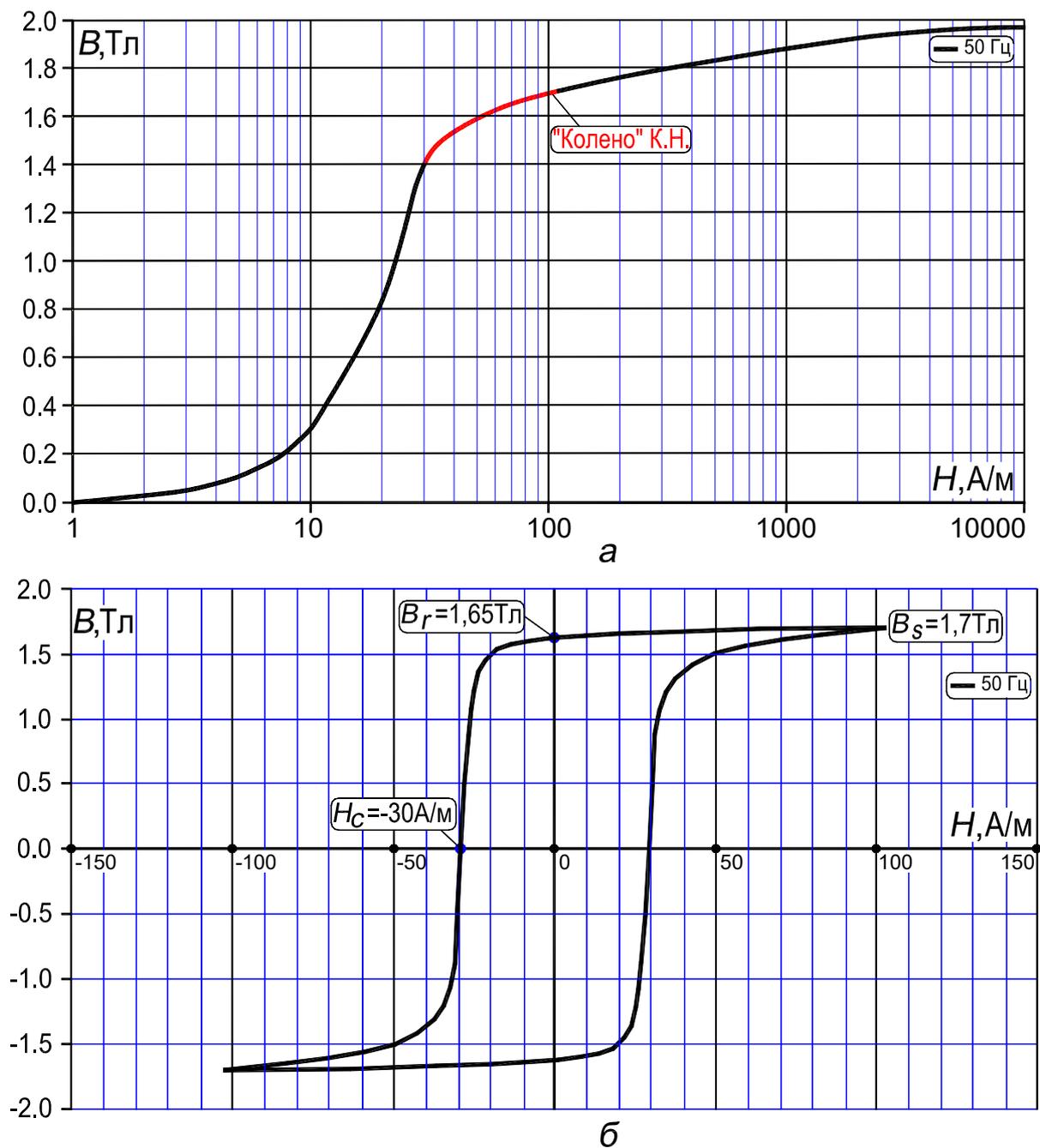


Рис. В.53, лист 1. Диаграммы магнитных свойств анизотропной холоднокатаной (трансформаторной) стали, марка проката Т145–35S:

a – кривая намагничивания – точка, соответствующая номинальному режиму силового трансформатора, расположена на «колене» кривой; b – петля гистерезиса

На рис. В.53, лист 1, b обозначены величины:

$B_s = 1,7 \text{ Тл}$ – индукция насыщения стали;

$B_r = 1,65 \text{ Тл}$ – остаточная индукция, имеющая место при $H = 0$; B_r – индукция остаточного магнетизма, обусловленная доменной структурой стали;

$H_c = -30 \text{ А/м}$ – коэрцитивная сила; H_c – значение напряжённости, которое необходимо приложить для того чтобы индукция стала равной нулю.

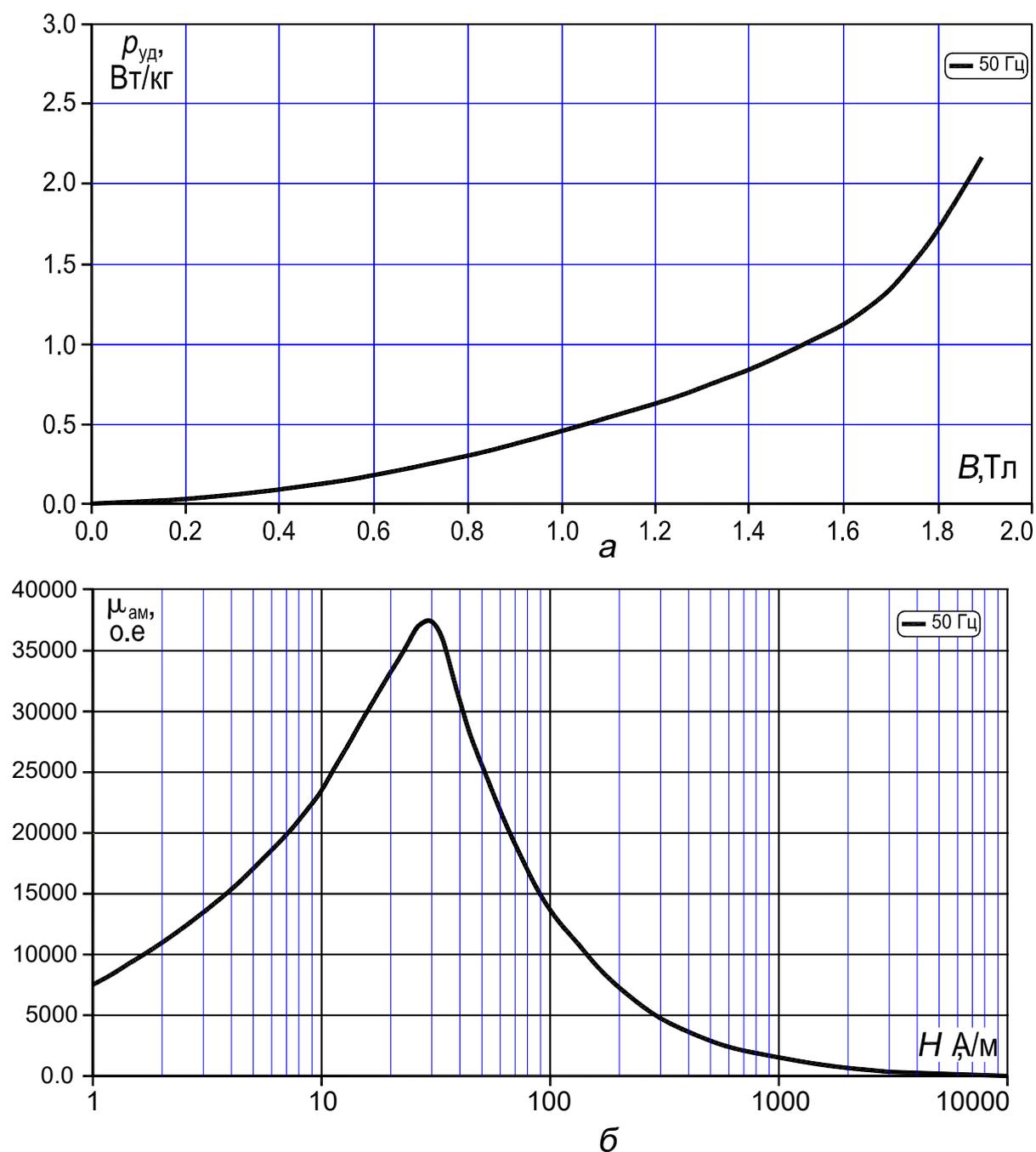


Рис. В.53, лист 2. Диаграммы магнитных свойств анизотропной холоднокатаной (трансформаторной) стали, марка проката Т145–35S:

a – удельные магнитные потери; b – амплитудная магнитная проницаемость

Магнитные потери в стали примерно пропорциональны квадрату магнитной индукции (рис. В.53, лист 2, a). Отметим, для сопоставления, что электрические потери в обмотках пропорциональны квадрату тока.

Значение максимальной магнитной проницаемости стали соответствует «колену» кривой намагничивания (рис. В.53, лист 1, a и рис. В.53, лист 2, b).

В. Производство электротехнической анизотропной стали на НЛМК

Процесс производства электротехнической анизотропной стали на предприятиях НЛМК включает выплавку стали в конвертере, непрерывную разливку, горячую прокатку слябов, травление, две стадии холодной прокатки с промежуточным обезуглероживающим отжигом, высокотемпературный отжиг, нанесение термозащитного и электроизоляционного покрытий, лазерную обработку для оптимизации доменной структуры, а также порезку и упаковку.

Использование лазерной обработки позволяет улучшить магнитные свойства электротехнической анизотропной стали (рис. В.54 и В.55).



Рис. В.54. Рулоны электротехнической стали в цехе НЛМК



Рис. В.55. Схема производства электротехнической стали на НЛМК

В.11. Основные материалы, применяемые в трансформаторах и электрических машинах

Развитие производства трансформаторов, так же как и любых других электрических машин и аппаратов, тесно связано с прогрессом в производстве магнитных, проводниковых и изоляционных материалов.

Поиски новых материалов чаще всего имеют целью улучшение параметров трансформатора – уменьшение потерь энергии в трансформаторе, уменьшение его массы и размеров, повышение надежности работы.

Материалы, применяемые для изготовления трансформатора, разделяются: 1) на *активные*, т. е. а) *магнитные* – сталь магнитной системы и б) *проводниковые* – металл обмоток и отводов; 2) *изоляционные*, применяемые для электрической изоляции обмоток и других частей трансформатора, например электроизоляционный картон, фарфор, дерево, трансформаторное масло и др.; 3) *конструкционные*, идущие на изготовление бака, различных крепежных частей и т. д., и прочие материалы, употребляемые в сравнительно небольших количествах. В качестве конструкционных материалов в электрических машинах используются сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, пластмассы для изготовления таких деталей и частей машины, главным назначением которых являются восприятие и передача механических нагрузок (валы, станины, подшипниковые щиты и стояки, и т. д.). К этим материалам предъявляются требования, общие в машиностроении.

А. Электротехническая сталь холоднокатаная анизотропная для трансформаторов. ГОСТ 32482-2013

Одним из основных активных материалов трансформатора является тонколистовая (0,35; 0,30 и 0,27 мм) рулонная анизотропная электротехническая сталь.

Характеристики и марки этой стали приведены в ГОСТ 32482–2013 Прокат тонколистовой холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали для трансформаторов. Технические условия (см. разд. В.12).

Сталь производится на предприятиях Новолипецкого металлургического комбината (см. разд. В.10.9. Производство электротехнической стали в РФ);

URL-адреса – <https://lipetsk.nlmk.com> <https://viz-steel.nlmk.com> .

Благодаря прокатке в холодном состоянии сталь получает определенное упорядоченное взаимное расположение и ориентировку микроструктур –

текстуру, вследствие чего создается анизотропия магнитных свойств стали, т. е. различие магнитных свойств в разных направлениях в листе.

В несколько идеализированном виде микроструктура холоднокатаной стали может быть представлена в виде совокупности элементарных кристаллов кубической формы, расположенных так, что их диагональные сечения располагаются в плоскости листа стали, а ребра куба в этих сечениях параллельны направлению прокатки стали, как это показано прямоугольником $ABCD$ на рис. В.56. Наименьшие удельные потери и наибольшую магнитную проницаемость при заданной магнитной индукции холоднокатаная сталь имеет в направлении, параллельном ребрам куба AB или CD , т. е. в направлении прокатки. Это направление называется *осью легкого намагничивания* – ось 1 на рис. В.56.

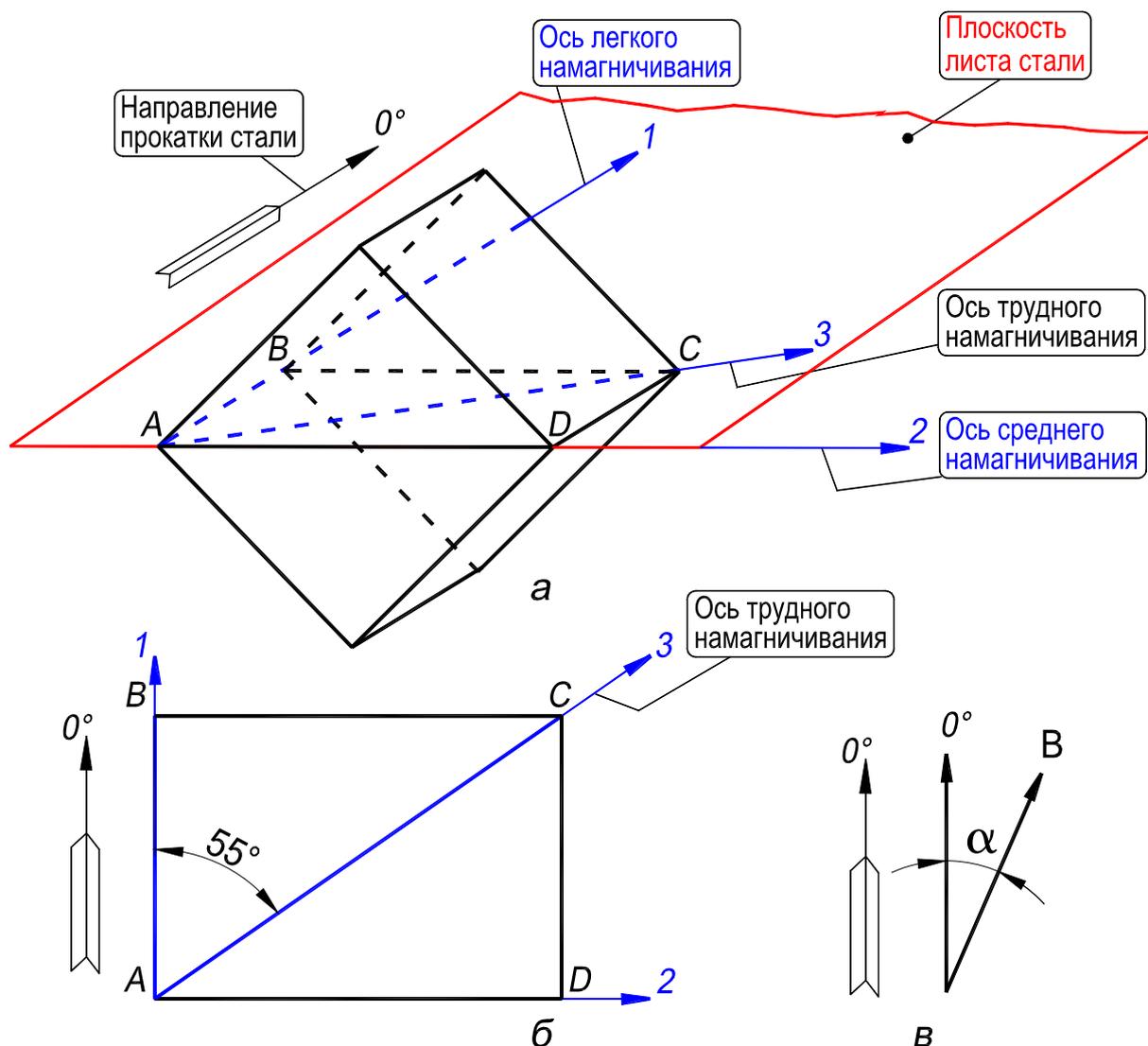


Рис. В.56. Микроструктура холоднокатаной электротехнической стали:

a – расположение элементарного кристалла в плоскости листа;

б – направления основных осей намагничивания;

в – угол α между направлением прокатки стали и вектором магнитной индукции

Существенно худшие магнитные свойства сталь имеет в направлении диагонали грани куба AD , т. е. в направлении, перпендикулярном направлению прокатки. Это направление называется *осью среднего намагничивания* – ось 2. Наихудшие магнитные свойства холоднокатаная сталь имеет в направлении диагонали диагонального сечения куба AC – *оси трудного намагничивания* – ось 3, направленной под углом 55° к направлению прокатки. При разработке конструкции магнитной системы и её расчете следует иметь в виду, что отклонение вектора магнитной индукции от направления прокатки стали даже на относительно небольшой угол α (рис. В.56, в) приводит к существенному увеличению удельных потерь и уменьшению магнитной проницаемости стали.

Для того чтобы исключить влияние анизотропии магнитных свойств холоднокатаной стали в основной массе стержней и ярм, пластины для шихтованной магнитной системы следует вырезать так, чтобы угол $\alpha = 0^\circ$, т. е. чтобы направление длинных сторон пластин совпадало с направлением прокатки. Это требование легко выполняется при использовании рулонной стали и нарезании пластин из рулона на современных линиях продольной и поперечной резки.

В углах плоских шихтованных магнитных систем происходит неизбежное изменение направления линий магнитной индукции. При прямом стыке пластин (см. рис. 9.15, а, б на с. 180) во всем объеме угла $\alpha \neq 0^\circ$ (область, заштрихованная на этом рисунке) и происходит увеличение удельных потерь (Вт/кг) и удельной намагничивающей мощности (В·А/кг), что может существенно отразиться на потерях и намагничивающей мощности всей магнитной системы. Замена прямого стыка в углах косым стыком (рис. 9.15, в, г) позволяет уменьшить объем, в котором $\alpha \neq 0^\circ$, и, следовательно, уменьшить потери и намагничивающую мощность для углов и всей магнитной системы.

Холоднокатаная сталь чувствительна к механическим воздействиям. В результате механической обработки при заготовке пластин магнитной системы – продольной и поперечной резки, закатки или срезания заусенцев – увеличиваются удельные потери и удельная намагничивающая мощность стали. Это ухудшение магнитных свойств стали может быть полностью или в значительной мере снято путем восстановительного отжига заготовленных пластин при $800 - 820^\circ\text{C}$. На современных заводах такой отжиг обязательно включается в технологический процесс изготовления пластин после их механической обработки

(см. рис. В.55). При отсутствии отжига возможно повышением потерь холостого хода на 8 – 10 % и тока холостого хода на 25 – 30 %.

Несмотря на указанные недостатки холоднокатаной стали, трансформаторы с рационально спроектированной магнитной системой из этой стали при надлежащей технологии ее изготовления имеют относительно малые потери и ток холостого хода, дают экономию в расходе активных и других материалов и являются экономичными в эксплуатации.

Б. Электротехническая сталь холоднокатаная изотропная для электрических машин. ГОСТ 21427.2-83

Основными производителем электротехнической холоднокатаной изотропной стали для электрических машин на российском рынке является ПАО «Северсталь», г. Череповец, <https://www.severstal.com>.

На предприятии производится электротехническая сталь изотропная тонколистовая, ГОСТ 21427.2-83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия.

Марки изотропной тонколистовой стали: 2011; 2012; 2111; 2112; 2211; 2212; 2214; 2215; 2216; 2312 и др. Магнитные свойства приведены в табл. В.5.

Условные обозначения в марке стали: первая цифра обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки, а именно: «2» – сталь холоднокатаная изотропная; вторая цифра – примерное содержание кремния в процентах; третья цифра – группа по основной нормируемой характеристике, а именно: «1» – удельные потери при магнитной индукции 1, 5 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1.0/50}$); четвёртая – порядковый номер типа стали.

Наряду с электротехнической сталью (это основной материал) для изготовления отдельных частей магнитопроводов электрических машин применяются листовая конструкционная сталь, литая сталь и чугун. Чугун вследствие невысоких магнитных свойств используется относительно редко.

В. Проводниковые материалы. Другой активный материал трансформатора – металл обмоток. Низкое удельное электрическое сопротивление, легкость обработки (намотки, пайки), удовлетворительная стойкость по отношению к коррозии и достаточная механическая прочность электролитической меди сделали ее единственным материалом для обмоток трансформаторов в течение ряда десятилетий. Несмотря на это, относительно малое мировое распространение природных запасов медных руд заставило искать пути замены меди

другим металлом, и в первую очередь алюминием, более широко распространенным в природе.

Один из недостатков алюминия – его удельное электрическое сопротивление существенно больше (примерно в 1,6 раза) удельного сопротивления меди.

Таблица В.5. Магнитные свойства холоднокатаной изотропной стали

Марка стали	Толщина, мм	Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более	Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м		
			1000	5000	10000
2421	0.27	$P_{0.75/400}$ 10.7	1.35	1,55	1.65
2414	0.50	$P_{1.0/50}$	1.35	1.60	1.70
		1.10			
2413	0,50	—	1.35	1,60	1.70
	0.35	—	1.35	1.60	1.70
2412	0,50	1,3	1.35	1.60	1.70
	0,35	1,15	1,35	1,60	1.70
2411	0,50	1.6	1,37	1,60	1.73
	0.35	1,3	1.37	1.60	1.70
2312	0,50	1,70	1.40	1,66	1,74
2216	0,50	1,75	1.43	1,68	1,76
2215	0,50	2.0	1.53	1.72	1,80
2214	0,50	2,2	1.50	1,70	1.78
2213	0,50	2.5	1.52	1,74	1,82
2212	0,50	2.2	1.42	1,68	1,77
2211	0,50	2,5	1,40	1.65	1.76
2112	0,50	2.6	1.44	1,70	1,77
2111	0,50	3.0	1.46	1,68	1,78
2013	0,50	2.8	1,54	1,72	1,82
2012	0.50	3,1	1.52	1,70	1,80
2011	0,50	3,5	1,49	1.68	1.78

Основные физические свойства меди и алюминия приведены в табл. В.6. Цена 1 кг прямоугольного обмоточного алюминиевого провода марки АПБ примерно на 10 – 15 % ниже цены медного провода марки ПБ.

Наиболее простой прямой вариант замены медного провода обмоток трансформатора алюминиевым, когда заменяется только металл провода, но сохраняются: все размеры самого провода и обеих обмоток, число витков обмоток, материал и размеры изоляционных промежутков, а также все данные и размеры магнитной системы и системы охлаждения трансформатора.

Таблица В.6. Основные физические свойства обмоточных проводов из меди и алюминия

Металл	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м		Плотность, кг/м ³	Предел прочности на разрыв, МПа	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)
	при 20°С	при 75°С			
Медь электролитическая	0,01724	0,02135	8900	240	390
Алюминий	0,0280	0,0344	2700	80 – 90	816

При такой замене трансформатор может быть включен в ту же сеть и будет иметь то же номинальное напряжение и те же параметры холостого хода, что и до замены металла обмоток. Электрическое активное сопротивление алюминиевых обмоток окажется выше сопротивления медных в отношении удельных электрических сопротивлений этих металлов, т. е. примерно в 1,6 раза, и во столько же раз возрастут потери короткого замыкания при прежнем номинальном токе. Для того чтобы сохранить прежние потери короткого замыкания и неизменные превышения температуры частей трансформатора над температурой охлаждающей среды, номинальный ток алюминиевого варианта обмоток $I_{НОМА}$ должен быть уменьшен по сравнению с током медного варианта $I_{НОММ}$

$$I_{НОМА} = I_{НОММ} \cdot \sqrt{\rho_M / \rho_A} = I_{НОММ} \cdot \sqrt{(0,01724 / 0,028)} = 0,785 I_{НОММ}.$$

При прямой замене медного провода алюминиевым номинальные токи обмоток, а следовательно, и номинальная мощность трансформатора должны быть снижены на 21,5 %. Прежняя сумма потерь холостого хода и короткого замыкания будет отнесена к пониженной номинальной мощно-

сти, что приведет к снижению КПД. Реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания не зависит от металла обмоток и останется неизменной. Его активная составляющая возрастет примерно в 1,6 раза, но полное сопротивление короткого замыкания, определяемое в основном реактивной составляющей, возрастет незначительно, и ток короткого замыкания и механические силы при коротком замыкании останутся практически неизменными, что вследствие малой механической прочности алюминия приведет к снижению динамической стойкости трансформатора.

Объем металла алюминиевых обмоток будет равен объему меди, а масса алюминия составит от массы меди

$$G_A = G_M \cdot \gamma_A / \gamma_M = G_M \cdot 2700 / 8900 = 0,303 \cdot G_M.$$

Поскольку цена алюминиевого провода несколько ниже цены медного, стоимость алюминиевого провода составит менее 1/3 стоимости медного провода, что, однако, не компенсирует уменьшения номинальной мощности и снижения КПД.

Рациональным условием замены меди в обмотках силовых трансформаторов алюминием является получение полностью эквивалентных трансформаторов, то есть: 1) с одинаковыми номинальными мощностями; 2) с одинаковыми напряжениями и токами; 3) с одинаковыми параметрами холостого хода (потери и ток х. х.) и короткого замыкания (потери и напряжение к. з.); 4) с одинаковой конструкцией, материалами и размерами изоляции; 5) с магнитными системами одинаковой конструкции, изготовленными из электротехнической стали одной марки и толщины, рассчитанными при одном значении индукции.

Из рассмотрения приведенного примера следует, что равенство потерь короткого замыкания при равенстве номинальных токов потребует увеличения сечения каждого витка и всей обмотки в целом и, следовательно, увеличения площади окна магнитной системы, в котором расположены обмотки. Равенство потерь и тока холостого хода при заданных условиях может быть достигнуто только при равенстве масс активной стали, что при увеличении площади окна магнитной системы может быть достигнуто за счет уменьшения сечений стержней и ярм и увеличения их длины. Магнитная система алюминиевого варианта должна быть уже и выше, чем система медного варианта.

Сохранение неизменности реактивной составляющей напряжения короткого замыкания потребует относительного увеличения радиального и осевого размеров алюминиевых обмоток, т. е. также увеличения ширины и высоты окна магнитной системы.

Рационально спроектированные трансформаторы с алюминиевыми обмотками существенно отличаются по соотношению основных размеров от эквивалентных им по мощности и параметрам короткого замыкания и холостого хода трансформаторов с медными обмотками. Отличительными особенностями магнитной системы трансформатора с алюминиевыми обмотками являются при этом меньший диаметр, большие высоты стержня и площадь окна магнитной системы. Алюминиевые обмотки имеют несколько большее число витков.

Увеличение чисел витков и сечений витков алюминиевых обмоток по сравнению с эквивалентными медными обмотками приводит к увеличению стоимости работы по намотке обмоток и значительному увеличению расхода некоторых изоляционных материалов – бумажно-бакелитовых цилиндров, электроизоляционного картона и пропиточного лака. При большей высоте магнитной системы увеличиваются также высота бака и масса масла. Увеличение стоимости работы и материалов компенсируется уменьшением массы и стоимости провода обмоток так, что общая стоимость рационально спроектированного трансформатора с алюминиевыми обмотками практически не отличается от стоимости эквивалентного трансформатора с медными обмотками.

При переходе на алюминиевые обмотки был решен также ряд задач технологического характера, связанных с технологией намотки алюминиевых обмоток, пайкой и сваркой алюминия.

Г. Электроизоляционные материалы. К электроизоляционным материалам, применяемым в электрических машинах и трансформаторах, предъявляются следующие требования: по возможности высокие электрическая прочность, механическая прочность, теплостойкость и теплопроводность, а также малая гигроскопичность. Важно, чтобы изоляция была по возможности тонкой, так как увеличение толщины изоляции ухудшает теплоотдачу и приводит к уменьшению коэффициента заполнения паза проводниковым материалом, что в свою очередь вызывает уменьшение номиналь-

ной мощности машины. В ряде случаев возникают также и другие требования, например устойчивость против различных микроорганизмов в условиях влажного тропического климата и т. д. На практике все эти требования могут быть удовлетворены в разной степени.

Изоляционные материалы могут быть твердые, жидкие и газообразные. Газообразными обычно являются воздух и водород, которые представляют собой по отношению к устройству окружающую или охлаждающую среду и одновременно в ряде случаев играют роль электрической изоляции. Жидкие диэлектрики находят применение главным образом в трансформаторостроении в виде специального сорта минерального масла, называемого трансформаторным маслом.

Наибольшее значение в электромашиностроении имеют твердые изоляционные материалы. Их можно разбить на следующие группы: 1) естественные органические волокнистые материалы – хлопчатая бумага, материалы на основе древесной целлюлозы и шелк; 2) неорганические материалы – слюда, стекловолокно, асбест; 3) различные синтетические материалы в виде смол, пленок из листового материала и т. д.; 4) различные эмали, лаки и компаунды на основе природных и синтетических материалов.

Эмали применяются для изоляции проводов и в качестве покровной изоляции обмоток. Лаки используются для склейки слоистой изоляции и для пропитки обмоток, а также для нанесения покровного защитного слоя на изоляцию. Дву- или трехкратной пропиткой обмоток лаками, чередуемой с просушками, достигается заполнение пор в изоляции, что повышает теплопроводность и электрическую прочность изоляции, уменьшает ее гигроскопичность и скрепляет элементы изоляции в механическом отношении.

Пропитка компаундами служит такой же цели, как и пропитка лаками. Разница заключается только в том, что компаунды не имеют летучих растворителей, а представляют собой весьма консистентную массу, которая при нагревании размягчается, сжижается и способна под давлением проникать в поры изоляции. Ввиду отсутствия растворителей заполнение пор при компаундировании получается более плотным.

Важнейшей характеристикой изоляционных материалов является их теплостойкость, которая решающим образом влияет на надежность работы и срок службы электрических машин. По теплостойкости электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах и аппаратах,

подразделяются, согласно ГОСТ 8865-95, на семь классов со следующими предельно допустимыми температурами θ_{\max} :

К классу **У** относятся не пропитанные жидкими диэлектриками и не погруженные в них волокнистые материалы из хлопчатой бумаги, целлюлозы и шелка, а также ряд синтетических полимеров (полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид и др.). Этот класс изоляции в электрических машинах применяется редко.

Класс изоляции	У	А	Е	В	Ф	Н	С
$\theta_{\max}, ^\circ\text{C}$	90	105	120	135	155	180	> 180

Класс **А** включает в себя волокнистые материалы из хлопчатой бумаги, целлюлозы и шелка, пропитанные жидкими электроизоляционными материалами или погруженные в них, изоляцию эмальпроводов на основе масляных и полиамиднорезольных лаков (капрон), полиамидные пленки, бутилкаучуковые и другие материалы, а также пропитанное дерево и древесные слоистые пластики. Пропитывающими веществами для данного класса изоляции являются трансформаторное масло, масляные и асфальтовые лаки и другие вещества с соответствующей теплостойкостью. К данному классу относятся различные лакоткани, ленты, электротехнический картон, гетинакс, текстолит и другие изоляционные изделия. *Изоляция класса А применяется в трансформаторостроении.*

К классу **Е** относится изоляция эмальпроводов и электрическая изоляция на основе поливинилацеталевых (винифлекс, металвин), полиуретановых, эпоксидных, полиэфирных (лавсан) смол и другие синтетические материалы с аналогичной теплостойкостью. Класс изоляции **Е** основан на синтетических материалах, которые применяются в машинах малой и средней мощности (до 100 кВт и выше).

Класс **В** объединяет изоляционные материалы на основе неорганических диэлектриков (слюда, асбест, стекловолокно) и клеящих, пропиточных и покровных лаков и смол повышенной теплостойкости органического происхождения, причем содержание органических веществ по весу не должно превышать 50 %. Сюда относятся прежде всего материалы на основе тонкой щипаной слюды (микалента, микафолей, миканит), ши-

роко применяемые в электромашиностроении. Также используются слюдинитовые материалы, в основе которых лежит непрерывная слюдяная лента из пластинок слюды размерами до нескольких миллиметров и толщиной в несколько микрон.

К классу В принадлежат также различные синтетические материалы: полиэфирные смолы на основе фталевого ангидрида, полихлортрифторэтилен (фторопласт-3), некоторые полиуретановые смолы, пластмассы с неорганическим наполнителем и др.

Изоляция *класса В* широко используется в электрических машинах средней и большой мощности.

Класс F включает в себя материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, но с применением органических лаков и смол модифицированных кремнийорганическими (полиорганосилоксановыми) и другими смолами с высокой теплостойкостью, или же с применением других синтетических смол соответствующей теплостойкости (полиэфирные смолы на основе изо- и терефталевой кислот и др.). Изоляция этого класса не должна содержать хлопчатой бумаги, целлюлозы и шёлка.

К классу H относится изоляция на основе слюды, стекловолокна и асбеста в сочетании с кремнийорганическими (полиорганосилоксановыми), полиорганометаллосилоксановыми и другими смолами. С применением таких смол изготавливаются миканиты и слюдиниты, а также стекломиканиты, стекломикафолы, стекломикаленты, стеклослюдиниты, стеклолакоткани и стеклотекстолита. К классу H относится и изоляция на основе политетрафторэтилена (фторопласт-4). Материалы *класса H* применяются в электрических машинах, работающих в весьма тяжелых условиях (горная и металлургическая промышленность, транспортные установки и пр.).

К классу изоляции С принадлежат слюда, кварц, стекловолокно, стекло, фарфор и другие керамические материалы, применяемые без органических связующих составов или с неорганическими связующими.

Под воздействием тепла, вибраций и других физико-химических факторов происходит старение изоляции, т. е. постепенная потеря ею механической прочности и изолирующих свойств. Опытным путем установлено, что срок службы

изоляции классов А и В снижается примерно в два раза при повышении температуры на каждые 8 – 10 °С сверх 100 °С. Аналогичным образом снижается при повышении температуры также срок службы изоляции других классов.

В большинстве масляных трансформаторов применяется обмоточный провод марки ПБ (АПБ для алюминия) с изоляцией из кабельной бумаги класса нагревостойкости А (предельно допустимая температура 105 °С). Применение провода более высоких классов нагревостойкости (Е, В, F и т. д.), допускающих более высокие предельные температуры, в масляных трансформаторах смысла не имеет, потому что допустимая температура обмоток определяется не только классом изоляции обмоток, но также и допустимой температурой масла, в котором находится обмотка.

Применение проводов с изоляцией, имеющей повышенную нагревостойкость, имеет смысл в сухих трансформаторах, в которых за счет повышения температуры обмоток возможно допустить более высокие плотности тока и получить компактную конструкцию трансформатора. Если при этом допускается существенное повышение эксплуатационной температуры обмоток, то потери короткого замыкания трансформатора неизбежно возрастают вследствие как увеличения плотности тока, так и повышения удельного сопротивления провода обмотки.

Главным изоляционным материалом в силовых трансформаторах является трансформаторное масло – жидкий диэлектрик, сочетающий высокие изоляционные свойства со свойствами активной охлаждающей среды и теплоносителя. Температура вспышки масла 140 °С, вязкость по Энглеру при 50 °С 1,8, минимальный пробивной градиент 22 кВ/мм. В отличие от других изоляционных материалов (твёрдых) один и тот же объем масла не может использоваться в течение всего срока службы трансформатора, т. е. не менее 25 лет.

Д. Электрические щетки подразделяются на две группы: 1) угольно-графитные, графитные и электрографитированные; 2) металлографитные. Для изготовления щеток первой группы используются сажа, измельченные природный графит и антрацит с каменноугольной смолой в качестве связующего. Заготовки щеток подвергаются обжигу, режим которого определяет структурную форму графита в изделии. При высоких температурах обжига достигается перевод углерода, находящегося в саже и антраците, в форму

графита, вследствие чего такой процесс обжига называется графитированием. Щетки второй группы содержат также металлы (медь, бронза, серебро). Наиболее распространены щетки первой группы.

В табл. В.7 приводятся характеристики ряда марок щеток.

Таблица В.7. Технические характеристики электрических щеток

Класс щеток	Марка	Номинальная плотность тока, А/см ²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, Г/см ²	Переходное падение напряжения на пару щеток, В	Коэффициент трения	Характер коммутации, при котором рекомендуется применение щеток [3, с. 90.]
Угольно-графитные	УГ4	7	12	200–250	1,6–2,6	0,25	Несколько затрудненная
Графитные	Г8	11	25	200–300	1,5–2,3	0,25	Нормальная
Электрографитированные	ЭГ4	12	40	150–200	1,6–2,4	0,20	Нормальная
То же	ЭГ8	10	40	200–400	1,9–2,9	0,25	Самая затрудненная
» »	ЭГ12	10-11	40	200–300	2,5–3,5	0,25	Затрудненная
» »	ЭГ84	9	45	200–300	2,5–3,5	0,25	Самая затрудненная
Меднографитные	МГ2	20	20	180–230	0,3–0,7	0,20	Самая легкая

В.12. ГОСТ 32482-2013. Холоднокатаная электротехническая анизотропная сталь для трансформаторов (выдержки)

(Прокат тонколистовой холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали для трансформаторов.
Технические условия)

1. Область применения *

Настоящий стандарт распространяется на тонколистовой холоднокатаный прокат поминальной толщиной 0,23; 0,27; 0,30; 0,35 и 0,50 мм из электротехнической анизотропной стали предназначенный для изготовления магнитопроводов (сердечников) различного рода электротехнических устройств.

...

3. Термины и определения

3.1. Магнитная индукция B , Тл. Величина, характеризующая намагниченность ферромагнитного образца, помещенного во внешнее магнитное поле с напряженностью H (А/м).

Магнитная индукция и напряженность поля связаны между собой соотношением:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (1)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость, о. е; μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

3.2. Магнитные потери P , Вт. Часть мощности магнитного поля, поглощаемая образцом магнитного вещества и рассеиваемая в виде тепла при воздействии на материал меняющегося во времени электромагнитного поля.

3.3. Удельные магнитный потери $P_{уд}$, Вт/кг. Магнитные потерн, отнесенные к единице массы магнитного материала.

Потери определяют при заданных значениях частоты электромагнитного поля и магнитной индукции в магнитопроводе.

Прокат аттестуют при частоте 50 Гц и при индукции 1,7 Тл (при толщине проката 0,23; 0,27; 0,30; 0,35 мм) или при индукции 1,5 Тл (при толщине проката 0,50 мм).

3.4. Разнотолщинность. Отклонение формы, характеризующееся неравномерностью толщины металлопродукции или ее элементов по ширине или длине (ГОСТ 26877-2008).

* В разделе В.12 сохранена нумерация, принятая в ГОСТ 32482-2013

3.5. Серповидность. Отклонение формы, при которой кромки листа или полосы в горизонтальной плоскости имеют форму дуги (ГОСТ 26877).

3.6. Плоскостность. Отклонение от плоскостности, при которой поверхность металлопродукции или её отдельные части имеют вид чередующихся выпуклостей или вогнутостей, образующих не менее двух вершин отдельных волн, не предусмотренных формой проката (ГОСТ 26877).

3.7. Пластичность. Повторяющийся изгиб на 90° в противоположных направлениях плоского образца, один конец которого закреплен в приспособлении, состоящем из губок установленного размера. Количество перегибов без разрушения характеризует пластичность материала.

3.8. Внутренние (остаточные) напряжения. Напряжения, возникающие в прокате, которые частично могут сохраниться после окончания термической обработки. Такие напряжения называют внутренними или остаточными. Внутренние напряжения характеризует максимальный зазор по линии реза.

3.9. Кривизна. Отклонение от прямолинейности, при которой не все точки, лежащие на геометрической оси металлопродукции, одинаково удалены от горизонтальной или вертикальной плоскости в продольном направлении (ГОСТ 26877).

3.10. Коэффициент заполнения. Отношение теоретического объема, заполненного металлом, определяемого исходя из массы и плотности, к действительному объему, полученному после сдавливания при определенной нагрузке набора (пакета) листов.

3.11. Коэффициент сопротивления изоляционного покрытия. Эффективное удельное сопротивление одиночного слоя изоляции, испытанного между наложенными металлическими контактами и основным металлом изолированного испытательного образца.

3.12. Заусенец. Дефект поверхности, представляющий собой острый, в виде гребня, выступ, образовавшийся при резке металла (ГОСТ 21014}.

3.13. Старение. Показатель, используемый применительно к электротехнической стали для оценки степени ухудшения ее магнитных свойств за установленный (продолжительный) или относительно малый период времени при увеличении температуры.

3.14. Адгезия покрытия. Прочность сцепления электроизоляционного покрытия с поверхностью металлической основы проката.

...

5. Классификация и обозначения

5.1. Прокат подразделяют:

- по видам продукции:

рулон;

лист – рулон, порезанный на отрезки определенной длины;

лента – рулон, распущенный на полосы определенной ширины;

- по способу производства (прокатки), структурному состоянию стали:

T – прокат холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали;

- по требованиям к ширине проката:

СШ – стандартная ширина (изготовителя);

ГШ – ширина, готовая к применению с предельными отклонениями по ширине;

ГШ1 – отрицательными;

ГШ2 – положительными;

- по требованиям к магнитным свойствам на классы:

S – обычного качества;

P – с высокой магнитной индукцией;

D – с оптимизированной доменной структурой (например, лазерной обработкой поверхности проката);

- по типам покрытия:

с электроизоляционным термостойким неорганическим покрытием – ЭТ;

с электроизоляционным термостойким полуорганическим покрытием, улучшающим штампуемость – ТШ.

5.2. Обозначение марок

Обозначение марок состоит из букв и цифр, расположенных в определенной последовательности, например: T145-35S,

где:

- буква T – прокат холоднокатаный анизотропный;

- три (или две) цифры после T – стократное нормированное максимальное значение удельных магнитных потерь на перемагничивание;

- две цифры (через дефис) – стократное значение номинальной толщины проката, мм.

- S; P; D – буквенное обозначение класса стали.

...

7. Технические требования

7.1. Общие требования

7.1.1. Способ выплавки, химический состав стали и технологию изготовления проката определяет изготовитель в соответствии с утвержденной технологической документацией.

Обычно используют кремнистую сталь с массовой долей кремния от 2,8 до 3,6 %.

...

7.2. Магнитные и технологические свойства

7.2.1. Магнитные свойства и коэффициент заполнения проката в состоянии поставки должны соответствовать нормам, указанным в табл. 2.

Таблица 2. Магнитные и технологические свойства тонколистового холоднокатаного проката из электротехнической анизотропной стали для трансформаторов

Марка (обозначение) стали	Номиналь- ная тол- щина, мм	Магнитные свойства		Коэффициент заполнения, не менее
		Удельные маг- нитные потери $P_{1,7/50}; P_{1,5/50}^{1)}$ Вт/кг, не более	Магнитная индукция $B_{800}; B_{2500}^{1)}$, Тл, не менее	
1	2	3	4	4
Прокат обычного качества				
T110-23S	0,23	1,10	1,85	0,945
T120-23S		1,20	1,83	0,945
T127-23S		1,27	1,82	0,945
T105-27S	0,27	1,05	1,87	0,950
T110-27S		1,10	1,86	0,950
T120-27S		1,20	1,84	0,950
T130-27S		1,30	1,83	0,950
T140-27S		1,40	1,82	0,950

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	4
T111-30S	0,30	1,11	1,87	0,955
T120-30S		1,20	1,86	0,955
T130-30S		1,30	1,84	0,955
T140-30S		1,40	1,82	0,955
T120-35S	0,35	1,20	1,86	0,960
T130-35S		1,30	1,83	0,960
T145-35S		1,45	1,81	0,960
T150-50S	0,50	1,50 ¹⁾	1,88 ¹⁾	0,965
T175-50S		1,75 ¹⁾	1,85 ¹⁾	0,965
Прокат с высокой магнитной индукцией				
T90-27P	0,27	0,90	1,88	0,950
T95-27P		0,95	1,88	0,950
T103-27P		1,03	1,88	0,950
T100-30P	0,30	1,00	1,88	0,955
T105-30P		1,05	1,88	0,955
T111-30P		1,11	1,88	0,955
Прокат с оптимизированной доменной структурой				
T95-23D	0,23	0,95	1,87	0,945
T100-23D		1,00	1,86	0,945
T105-23D		1,05	1,85	0,945
T95-27D	0,27	0,95	1,87	0,950
T100-27D		1,00	1,86	0,950
T105-27D		1,05	1,85	0,950
T100-30D	0,30	1,00	1,87	0,955
T105-30D		1,05	1,86	0,955
T110-30D		1,10	1,85	0,955
¹⁾ $P_{1,5/50}$, B_{2500} – при толщине 0,5 мм.				

В.13. Потери мощности и коэффициент полезного действия

В электрических машинах преобразование энергии из электрической в механическую и обратно сопровождается преобразованием электрической или механической энергии в тепло. Энергию, преобразующуюся в электрических машинах и трансформаторах в тепло, принято называть потерями.

Потери в электрических машинах делят на *основные* и *добавочные*. К основным потерям относят *электрические, магнитные* и *механические*.

А. Электрические потери включают потери в обмотках и потери в щеточных контактах (если в машине есть скользящие контакты):

$$p_{\text{э}} = mI^2R_{\theta}, \quad (\text{В.53})$$

где I – ток в фазе; R_{θ} – активное сопротивление фазы обмотки при расчетной температуре θ .

Так же рассчитываются электрические потери в обмотках машин постоянного тока. При этом число фаз m принимается равным 1.

Так как сопротивление зависит от температуры, то электрические потери соответствуют определенному тепловому состоянию проводника. Если известно сопротивление R_0 при температуре θ_0 , то при расчетной температуре θ сопротивление проводника будет

$$R_{\theta} = R_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)]. \quad (\text{В.54})$$

Температурный коэффициент сопротивления для большинства чистых металлов можно принимать $\alpha = 0,004$.

Электрические потери в скользящем контакте зависят от сорта щеток и состояния контактных поверхностей. Так как сопротивление щеточного контакта зависит нелинейно от тока, потери определяются по формуле

$$p_{\text{э.щ}} = m\Delta U_{\text{щ}}I, \quad (\text{В.55})$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в скользящем контакте.

Для угольных и графитных щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 1$ В; для металлографитных и металлоугольных щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 0,3$ В.

Б. Магнитные потери при **пульсационном и вращательном** перемагничивании, или потери в стали, включают потери в зубцах, ярмах магнитопро-

вода и полюсах машины, т. е. в основных участках магнитной системы, где замыкается переменный рабочий поток машины. Магнитные потери состоят из потерь на *вихревые токи* p_v и потерь на *гистерезис* p_g .

Магнитные потери зависят от марки стали, толщины листов магнитопровода, индукции и частоты перемагничивания. Значительное влияние на магнитные потери оказывают технологические факторы (штамповка листов, прессовка пакетов, механическая обработка магнитопровода).

При определении магнитных потерь пользуются приближенной формулой

$$p_{\text{МГ}} = k_{\text{обр}} p_{\text{уд}} (f/50)^\beta \cdot B_i^2 G_i, \quad (\text{В.56})$$

где $k_{\text{обр}}$ – коэффициент обработки, зависящий от обработки стали (для асинхронных двигателей, например, 1,4 – 1,8); $p_{\text{уд}}$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг; f – частота перемагничивания, Гц; β – показатель степени, зависящий от марки стали; B_i – индукция в соответствующей части магнитопровода, Тл; G_i – масса части магнитопровода, где индукция магнитного потока B_i .

В табл. В.8 приведены значения удельных потерь при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц и коэффициента β для различных марок холоднокатаной изотропной электротехнической стали при толщине листа 0,5 мм.

Таблица В.8. Значения удельных потерь в стали и коэффициента β

Марка стали	$p_{\text{уд}}$, Вт/кг	β
2211, 2013	2,5 – 2,8	1,5
2312	1,7	1,4
2411	1,6	1,3

В трансформаторах и вращающихся машинах процессы перемагничивания магнитопровода различны. В трансформаторах имеет место **пульсационное перемагничивание**, когда неподвижный магнитопровод перемагничивается переменным полем. При вращении якоря машины постоянного тока относительно полюсов и при перемагничивании участков магнитопровода в магнитном поле имеет место **вращательное перемагничивание** (рис. В.57, кривые 1 и 2, с. 132). Из кривых видно, что при $B < 1,65$ Тл потери на гистерезис p_g при **вращательном перемагни-**

чивании больше, чем при пульсационном. При более высоких индукциях наблюдается обратное явление. Однако при индукциях 1,6 – 1,7 Тл потери в стали при обоих видах перемагничивания становятся примерно одинаковыми. Природа вращательного перемагничивания, по-видимому, сложнее, пульсационного.

Рассматривая отдельные участки магнитной системы при вращательном перемагничивании, следует отметить, что существуют участки, где есть радиальная и тангенциальная составляющие индукции, и можно представлять перемагничивание как эллиптическое перемагничивание. Эллиптическое перемагничивание называют смешанным, так как его можно представить, как наложение вращательного и пульсационного перемагничивания.

При проектировании электрических машин пользуются таблицами удельных потерь, полученных на аппарате Эпштейна при пульсационном перемагничивании 1 кг массы листовой стали при частоте 50 Гц и индукции 1 Тл. Удельные потери для различных марок стали приведены в разд. В11 и В12.

Из-за наличия в формулах для определения потерь в стали значительных эмпирических коэффициентов, учитывающих обработку стали, уточнение удельных потерь в зависимости от характера перемагничивания отдельных участков магнитопровода имеет смысл лишь в особых случаях.

В. Механические потери включают потери на трение вращающихся частей машины о воздух, потери на трение в подшипниках и в скользящих контактах, а также потери в вентиляторе, затрачиваемые на создание потока охлаждающего воздуха или другого охлаждающего агента.

При проектировании электрических машин каждая составляющая механических потерь рассчитывается отдельно. Приблизительно можно считать, что механические потери пропорциональны квадрату частоты вращения.

Потери на трение зависят от плотности и вязкости среды, в которой вращается ротор машины. При заполнении машины водородом механические потери уменьшаются примерно в 10 раз по сравнению с потерями в воздухе. Механические потери растут, если ротор вращается в жидкости.

Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в асинхронных двигателях с радиальной системой вентиляции рассчитываются по формуле

$$p_{\text{мх}} \approx k_{\text{тр}} (n/1000)^2 \cdot (10D_a)^3, \quad (\text{В.57})$$

где $k_{\text{тр}} = 5$ при $2p = 2$; $k_{\text{тр}} = 6$ при $2p > 4$; D_a – диаметр ротора, м.

Потери на трение щеток о контактные кольца

$$P_{\text{тр.щ}} \approx k_{\text{тр.щ}} \rho_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_{\text{к}}, \quad (\text{В.58})$$

где $k_{\text{тр.щ}}$ – коэффициент трения щеток о контактные кольца (обычно принимается равным 0,1 – 0,2); $\rho_{\text{щ}}$ – давление на контактной поверхности щеток, Па; $S_{\text{щ}}$ – площадь контактной поверхности щеток, м²; $v_{\text{к}}$ – линейная скорость поверхности контактных колец, м/с.

Г. Вентиляционные потери. Это потери на охлаждение машины определяются мощностью, которая расходуется на циркуляцию теплоносителя в машине. Она зависит от количества воздуха, водорода или жидкости, отводящих тепло из машины, и от КПД вентиляторов или насосов.

Д. Добавочные потери делят на добавочные потери при холостом ходе и при нагрузке. К добавочным потерям при холостом ходе относятся *поверхностные* и *пульсационные* потери.

Д1. Поверхностные потери возникают в поверхностном слое зубцов или полюсов из-за пульсаций поля в воздушном зазоре. Частота пульсаций индукции определяется числом зубцов и частотой вращения $f_z = n \cdot z / 60$, где z – число зубцов на статоре, если определяются поверхностные потери в роторе, или число пазов на роторе, если определяются поверхностные потери в статоре.

Д2. Пульсационные потери – это потери в стали за счет пульсаций потока в зубцах статора или ротора. Пульсационные потери зависят от индукции в зубцах и частоты пульсаций. Частота пульсаций в зубцах статора определяется числом зубцов ротора, а частота пульсаций в зубцах ротора определяется числом зубцов статора.

Добавочные потери при нагрузке возникают в обмотках и магнитопроводе из-за потоков рассеяния и искажения поля в воздушном зазоре при нагрузке.

Расчет добавочных потерь производится для крупных электрических машин. Для машин общепромышленных серий добавочные потери, согласно ГОСТ, принимаются равными 0,5 – 1 % номинальной мощности.

Е. Коэффициент полезного действия электрических машин:

генераторов

$$\eta = 100[1 - \sum p / (P_2 + \sum p)]; \quad (\text{В.59})$$

двигателей

$$\eta = 100(1 - \sum p / P_1), \quad (\text{В.60})$$

где P_1 — электрическая мощность, подводимая к двигателю; P_2 — полезная мощность, отдаваемая генератором; $\sum p$ — сумма потерь в машине.

На рис. В.58 дана зависимость КПД от полезной мощности P_2 , выраженной в относительных единицах. Зависимость $\eta = f(P_2)$ при напряжении сети $U_c = \text{const}$ объясняется тем, что с ростом нагрузки полезная мощность растет пропорционально току, а потери электрические растут пропорционально квадрату тока. Коэффициент полезного действия трансформатора имеет максимум, когда постоянные потери в стали $p_{\text{мг}}$ равны потерям переменным в обмотках $p_{\text{э}}$ (это условие максимума КПД, см. разд. 15.6, с. 272, сл.). К постоянным потерям относятся потери, не зависящие от нагрузки. Это потери магнитные и механические (для машин, у которых частота вращения не зависит или мало зависит от нагрузки). Переменные потери — это электрические потери, которые пропорциональны квадрату тока нагрузки.

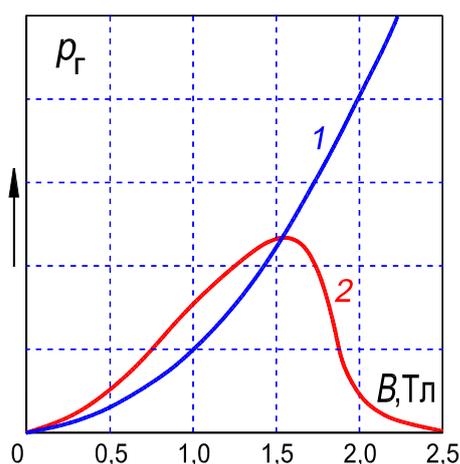


Рис. В.57. Потери на гистерезис p_T при пульсационном (1) и вращательном (2) перемагничивании (см. рис. В.53, с. 107)

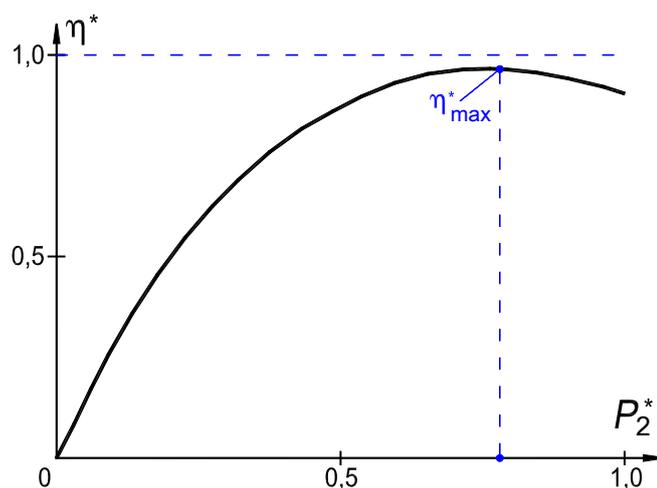


Рис. В.58. Зависимость КПД от нагрузки

При расчете электрических машин максимум КПД стремятся получить при 0,6 – 0,8 номинальной нагрузки, так как электрические машины длительно работают с недогрузкой 15 – 25 %. Чтобы сдвинуть максимум КПД в область номинальной нагрузки или в область перегрузок, надо увеличить сечение обмотки и снизить электрические потери в машине.

Коэффициент полезного действия зависит от мощности машины. В турбогенераторе мощностью 800 МВт $\eta = 98,8 \%$. Однако в микромашинах КПД может быть 10 – 20 %. В трансформаторах предельной мощности $\eta = 99,7 \%$. Таких высоких КПД другие преобразователи энергии не имеют.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

1 Основные сведения о трансформаторах

Трансформаторы – это электромагнитные статические преобразователи электрической энергии, не имеющие вращающихся частей.

В принципе их действия есть много общего с вращающимися электрическими машинами, в частности с асинхронными. Главным является следующее: принцип действия и трансформатора и асинхронного двигателя основан на взаимной индуктивной связи между обмотками посредством переменного магнитного поля (это общее); но в трансформаторе переменное магнитное поле неподвижно в пространстве и пульсирует во времени по периодическому закону с частотой тока f_1 , протекающего по обмоткам, а в асинхронном двигателе магнитное поле распределено по периодическому закону не только во времени, но и в пространстве, причем это поле вращается со скоростью n_1 , определяемой частотой тока f_1 в обмотке статора, $n_1 = f_1/p$, об/с; p – число пар полюсов [1].

Необходимо также подчеркнуть, что в трансформаторе первичные и вторичные электрические величины, а также основное поле и поля рассеяния изменяются с одной и той же частотой равной частоте питающей сети (речь идёт о первых гармонических). В асинхронном же двигателе, частота электрических величин ротора f_{2s} отличается от частоты электрических величин статора f_1 , а именно: $f_{2s} = s \cdot f_1$ (s – скольжение ротора относительно первой гармонической основного магнитного поля двигателя). Это обусловлено тем, что ротор двигателя вращается в пространстве со скоростью, $n = n_1 \cdot (1 - s)$, а трансформатор является статическим устройством [1].

Основное назначение трансформаторов – преобразование энергии переменного тока одного напряжения в энергию переменного тока другого напряжения (*частота напряжения и тока остаются при этом неизменными*). Наибольшее применение имеют *силовые* трансформаторы, предназначенные для передачи и распределения электроэнергии (рис. 1.1).

Трансформаторы являются одними из самых распространенных электромагнитных устройств и применяются в самых разных областях: как *силовые* – для передачи и распределения электрической энергии; как *регулируемые* – для регулирования напряжения; трансформаторы применяются в области электротермии – *печные, сварочные*; в высоковольтной технике –

испытательные; в технике измерений переменного тока – измерительные трансформаторы тока и измерительные трансформаторы напряжения; в радиотехнике – радиотрансформаторы. Они применяются также для преобразования числа фаз и частоты, а также, при выполнении определённых условий, для регулирования реактивной мощности [7].

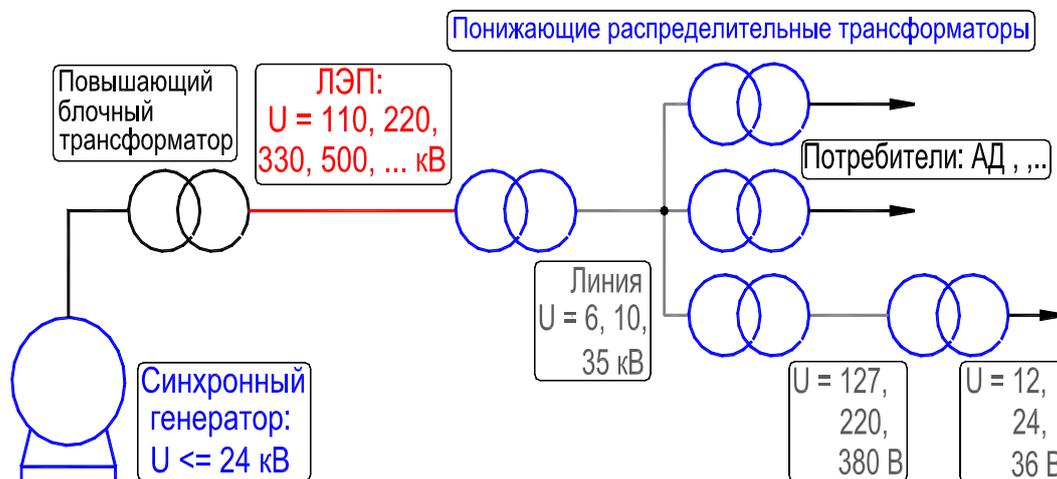


Рис. 1.1. Схема производства, передачи, распределения и потребления (преобразования) электроэнергии

С целью снижения электрических потерь мощности в линиях электропередачи (ЛЭП) при *передаче* электрической энергии, необходимо *повысить* напряжение, вырабатываемое синхронными генераторами [2], установленными на электростанциях, с 10 – 24 кВ до значений 110, 150, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ, используемых в ЛЭП. Для этого применяют повышающие трансформаторы, устанавливаемые на электростанциях в блоке с синхронными генераторами и называемые *блочными трансформаторами* (рис. 1.1).

Затем, для *распределения и использования* энергии в промышленности, сельском хозяйстве и быту необходимо *понизить* напряжение до 35; 10; 6; 3; 0,66; 0,38 и 0,22 кВ. С этой целью используются понижающие трансформаторы, называемые *распределительными* (рис. 1.1).

Так как в электроэнергетических системах имеет место многократная трансформация, то мощность трансформаторов в 5 – 7 раз превышает установленную мощность синхронных генераторов на электростанциях.

Конструктивная схема трансформатора состоит из четырех элементов: 1) замкнутой магнитной системы из листовой электротехнической стали; 2) электрической системы в виде двух или нескольких обмоток, охватывающих магнитную систему и изолированных относительно неё (концы

обмоток присоединены к выводным изоляторам); 3) охлаждающей системы – воздушной, масляной, водяной или комбинированной, служащей для отвода тепла, возникающего вследствие потерь энергии в магнитной системе и обмотках; 4) механической системы, обеспечивающей механическую прочность всей конструкции трансформатора, возможность его перемещения, подъема, транспортировки и пр.

По числу фаз трансформаторы делятся на одно-, двух-, трех- и многофазные. Силовые трансформаторы выпускаются в основном в *трехфазном* исполнении на промышленную частоту 50 Гц; фазы в соответствии со стандартом обозначаются прописными буквами латинского алфавита: «*U*», «*V*» и «*W*» [13, 14].

Обмотки фаз трёхфазных трансформаторов, соединяются в трехлучевую звезду (*Y*), треугольник (Δ) или зигзаг (*Z*). Нейтральная точка в схемах звезда (*Y_n*) и зигзаг (*Z_n*) может быть выведена (нейтральный провод) или изолирована.

Трансформаторы имеют две или несколько обмоток в каждой фазе, индуктивно связанных друг с другом. Обмотки, потребляющие энергию из сети, называются *первичными*. Обмотки, отдающие электрическую энергию потребителю, – *вторичными*.

В зависимости от соотношения напряжений на первичной и вторичной обмотках (сторонах) трансформаторы делятся на *повышающие* и *понижающие*. В повышающем трансформаторе первичная обмотка имеет низкое напряжение (НН), а вторичная – высокое (ВН). В понижающем трансформаторе, наоборот, вторичная обмотка имеет низкое напряжение, а первичная – высокое.

Трансформаторы, имеющие одну первичную и одну вторичную обмотки, называются *двухобмоточными*. Достаточно широко распространены *трехобмоточные* трансформаторы, имеющие на каждую фазу три обмотки, например, низкого, среднего (СН) и высокого напряжения.

Первичную и вторичную обмотки каждой фазы в силовых трансформаторах располагают в пространстве так, чтобы магнитный поток, пронизывающий одну из них, пронизывал, большей своей частью, и другую обмотку. Для этого, а также с целью уменьшения величины МДС, необходимой для создания магнитного потока, обмотки помещают на стержни *3 замкнутой* магнитной цепи (рис. 1.2). Эта магнитная цепь – магнитопровод трансформатора, изготавливаемый из тонких пластин холоднокатаной анизотропной электро-технической стали (см. разд. В11, А, Б и В12, с. 110, сл.).

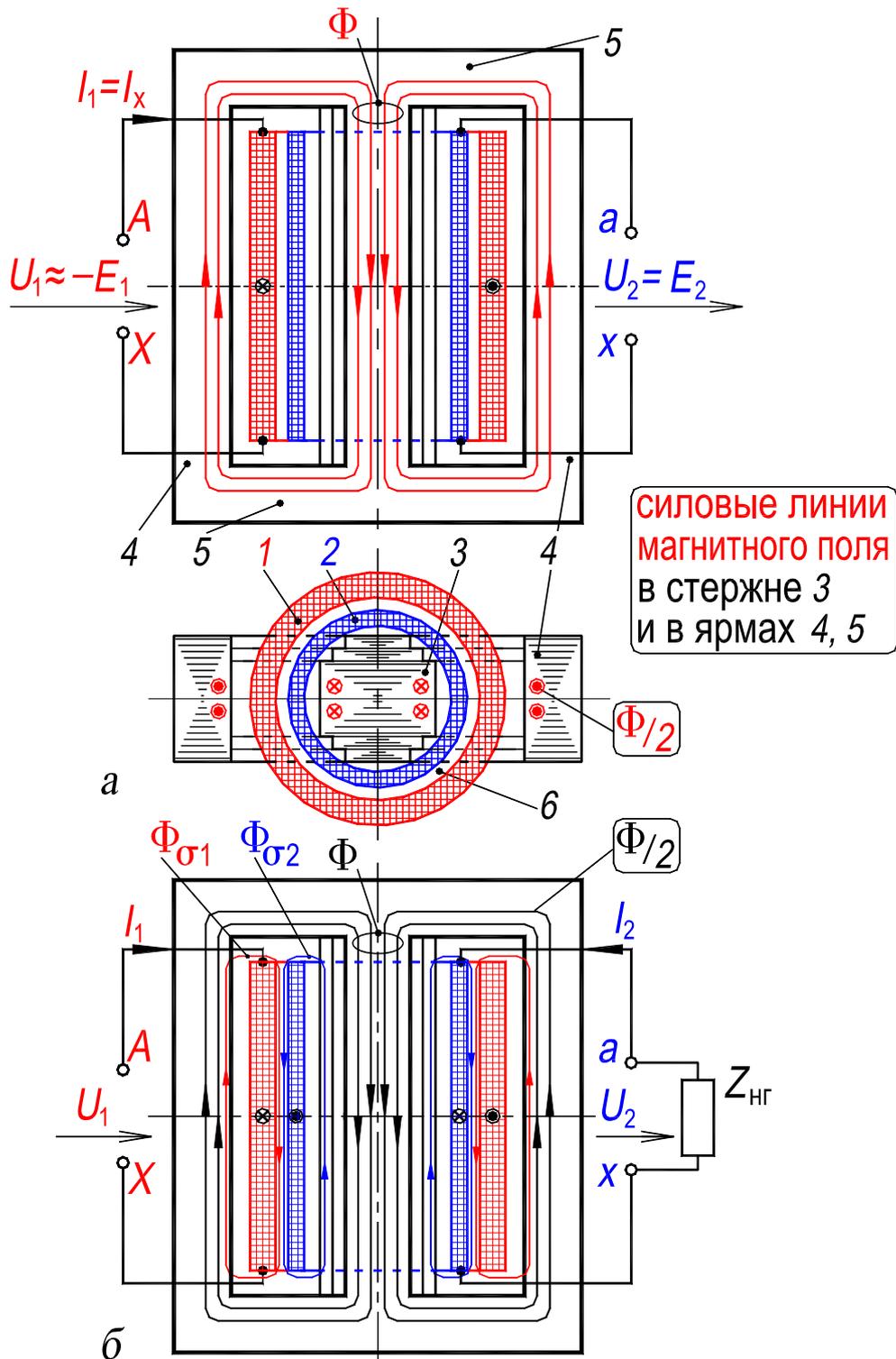


Рис. 1.2. Однофазный броневой трансформатор с двумя concentрическими обмотками в режиме: а – холостого хода; б – нагрузки;
 силовые линии: основного поля – Φ ; поля рассеяния обмоток – $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$
 (изображение схематическое)

На рис. 1.2,а схематически изображен однофазный броневой (см. разд. 9, с. 169,сл.) трансформатор с двумя concentрическими обмотками в режиме холо-

стого хода (вторичная обмотка 2 разомкнута, к её выводам нагрузка не подключена). Для определённости считаем трансформатор понижающим. Цифрами обозначены: 1 – обмотка высокого напряжения, первичная; 2 – обмотка низкого напряжения, вторичная; 3 – стержень магнитопровода на котором располагаются обмотки; 4, 5 – соответственно боковые и торцевые ярма магнитопровода. В первичной обмотке трансформатора при холостом ходе (х. х.) протекает ток I_x , который существенно меньше номинального тока, протекающего в ней при номинальной нагрузке, подключаемой к вторичной обмотке (см. разд. 12, с. 216, сл.). Во вторичной обмотке трансформатора в режиме х. х. ток не протекает.

Стержень 3 и ярма 4, 5 составляют замкнутую магнитную цепь – магнитопровод трансформатора. *Ближе к стержню располагают обмотку низкого напряжения 2*, её легче изолировать от стержня, *обмотка высокого напряжения 3 охватывает обмотку низкого напряжения*. Между обмотками – кольцевой цилиндрический изоляционный канал 6, называемый также – *канал рассеяния*. Именно в нём локализуется магнитный поток рассеяния обмоток, играющий важную, но двоякую роль в трансформаторе.

На рис. 1.2,б к вторичной обмотке 2 трансформатора подключена нагрузка $Z_{нп}$, в обмотке и нагрузке протекает ток I_2 , а в первичной обмотке – ток $I_1 \gg I_x$.

Магнитопровод с обмотками и системой креплений принято называть *активной частью трансформатора*, так как именно в ней происходит основной процесс преобразования энергии переменного тока одного напряжения в энергию переменного тока другого напряжения.

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции /формулировка Дж. К. Максвелла (J. C. Maxwell)/:

$$e = -w d\Phi/dt, \quad (1.1)$$

где e – мгновенное значение ЭДС, индуцируемой переменным магнитным потоком Φ , в обмотке с числом витков w .

Если к зажимам первичной обмотки, (они обозначены символами $A - X$) приложить высшее напряжение U_1 , периодически изменяющееся во времени, то в этой обмотке возникнет переменный ток $I_1 = I_x$ (рис. 1.2,а); последний создает в сердечнике переменный *основной магнитный поток* Φ , сцепляющийся как с обмоткой 1 (пересекающий её поперечное сечение), так и с вторичной понижа-

ющей обмоткой 2. Магнитный поток, сцепляющийся с обеими обмотками, индуцирует в них ЭДС: в первичной – ЭДС $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ самоиндукции, её действующее значение E_1 определяется выражением

$$E_1 = 4,44f_1w_1\Phi_m, \quad (1.2)$$

а во вторичной – ЭДС $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$ взаимоиндукции, её действующее значение –

$$E_2 = 4,44f_1w_2\Phi_m. \quad (1.3)$$

где f_1 – частота изменения основных (первых) гармонических напряжений, ЭДС, токов и потока трансформатора; w_1, w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток; Φ_m – амплитуда основного магнитного потока в магнитопроводе (см. разд. 12.1, с. 216, сл.).

Электродвижущая сила E_1 практически *уравновешивает* приложенное напряжения U_1 , $U_1 \approx -E_1$. Электродвижущая сила E_2 *определяет* величину вторичного напряжения U_2 , причём при холостом ходе (х. х.) трансформатора $U_2 = E_2$ (рис. 1.2, а).

Если к зажимам $a - x$ вторичной обмотки 2 подсоединить электрическую нагрузку $Z_{\text{нг}}$ (рис. 1.2, б), то по этой обмотке и по нагрузке пойдет вторичный ток I_2 . Создаваемая им МДС согласно правилу Э. Х. Ленца стремится противодействовать магнитному потоку Φ , являющемуся причиной появления тока I_2 . Однако поток (его амплитуда Φ_m) должен остаться практически *неизменным*, так как первичная обмотка включена на сеть с определенным переменным напряжением, действующее значение которого *неизменно*. Поэтому на размагничивающее действие обмотки 2 трансформатор реагирует соответствующим увеличением тока первичной обмотки до такого значения I_1 , при котором основной магнитный поток (его амплитуда Φ_m) остаётся практически неизменным, то есть таким же, как и при холостом ходе трансформатора

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_x + (-\underline{I}_2'), \quad (1.4)$$

где \underline{I}_2' – вектор вторичного тока приведенного трансформатора (см. разд. 14.4, с. 248, сл.); $-\underline{I}_2'$ – нагрузочная составляющая первичного тока.

Уравнение (1.4) – это уравнение равновесия МДС приведенного трансформатора. Первичный ток \underline{I}_1 имеет две составляющие: \underline{I}_x – ток холостого хода, при х. х. $\underline{I}_1 = \underline{I}_x$; $-\underline{I}_2'$ – нагрузочная составляющая, которая проявляется при нагрузке трансформатора.

Запись уравнения (1.4) в виде

$$\underline{I}_x = \underline{I}_1 + (-\underline{I}_2') \quad (1.5)$$

трактуется следующим образом: первичный и вторичный токи при нагрузке своим совместным действием создают такой же магнитный поток Φ , что и ток I_x при холостом ходе. Таким образом, основной магнитный поток Φ (его амплитуда Φ_m) остаётся *практически* неизменным при номинальном напряжении и изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до номинальной.

Трансформатор выполняет свое основное назначение – трансформацию электрической энергии, потребляя из первичной цепи ток I_1 при напряжении U_1 и передавая во вторичную цепь ток I_2 при напряжении U_2 . Коэффициент полезного действия трансформаторов весьма высок и у мощных трансформаторов достигает $\sim 99,5$ %. Важной эксплуатационной характеристикой трансформатора является внешняя характеристика $U_2 = f(I_2)$, называемая так потому что вторичные напряжения и ток идут вовне, то есть в нагрузку. Трансформатор проектируют таким образом, чтобы при наиболее вероятной активно-индуктивной нагрузке уменьшение напряжения на нагрузке было небольшим, не более 5 % от номинального вторичного напряжения (термин 62, с. 147).

По конструкции силовые трансформаторы делят на два основных типа – *масляные* и *сухие*. В масляных трансформаторах магнитопровод с обмотками находится в баке, заполненном трансформаторным маслом, которое является *хорошим изолятором* и *охлаждающим агентом* (см. рис. В.20, с. 71). Сухие трансформаторы охлаждаются воздухом. Их используют для жилых и промышленных помещений, в которых эксплуатация масляного трансформатора является нежелательной. Трансформаторное масло является горючим, пожароопасным, и при нарушении герметичности бака масло может повредить другое оборудование.

Наряду с трансформаторами широко применяются *автотрансформаторы*, в которых имеется *кроме магнитной ещё и электрическая связь* между первичной и вторичной обмотками. При этом мощность из одной обмотки в другую передается как магнитным полем, так и за счет электрической связи. Автотрансформаторы строятся на большие мощности и высокие напряжения и применяются в энергосистемах, а также используются для регулирования напряжения в установках небольшой мощности (разд. 18.1, с. 320, сл.).

2. Трансформаторы. Термины и определения

(ГОСТ 16110–82 Трансформаторы силовые. Термины и определения)

Термин	Определение
2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ	
1. Трансформатор (1.1) *	Статическое электромагнитное устройство, имеющее две индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной системы переменного тока в другую систему переменного тока. <i>Примечание.</i> Трансформатор может иметь более двух индуктивно связанных обмоток.
2. Магнитное поле трансформатора (1.5)	Магнитное поле, <i>созданное</i> в трансформаторе <i>совокупностью магнитодвижущих сил</i> обмоток и других частей, в которых протекает <i>электрический ток</i> . <i>Примечание.</i> Для удобства анализа магнитное поле может быть <i>условно</i> разделено на взаимосвязанные части: 1) <i>основное поле</i> , 2) <i>поле рассеяния</i> обмоток, 3) поле токов нулевой последовательности и т. д.
2.2. ВИДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ	
3. Трехфазный трансформатор (2.6)	Трансформатор, в магнитной системе которого создается трехфазное магнитное поле
4. Двухобмоточный трансформатор (2.7)	Трансформатор, имеющий две основные <i>гальванически не связанные</i> обмотки
5. Масляный трансформатор (2.12)	Трансформатор с жидким диэлектриком, в котором основной <i>изолирующей средой</i> и <i>теплоносителем</i> служит трансформаторное масло
6. Сухой трансформатор (2.14)	Трансформатор, в котором основной <i>изолирующей средой</i> служит атмосферный воздух или другой газ или твердый диэлектрик, а <i>охлаждающей средой</i> атмосферный воздух

* В скобках указаны номера согласно ГОСТ 16110–82.

Термин	Определение
7. Трансформатор, регулируемый под нагрузкой. Трансформатор РПН (2.20)	Регулируемый трансформатор, допускающий регулирование напряжения хотя бы одной из его обмоток <i>без перерыва нагрузки и без отключения</i> его обмоток от сети
8. Трансформатор, переключаемый без возбуждения. Трансформатор ПБВ (2.21)	Регулируемый трансформатор, допускающий регулирование напряжения путем переключения ответвлений обмоток без возбуждения <i>после отключения</i> всех его обмоток от сети
9. Автотрансформатор (2.25)	Трансформатор, две или более обмоток которого гальванически связаны так, что имеют общую часть
2.3. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ТРАНСФОРМАТОРА	
10. Магнитная система трансформатора (3.1)	Комплект пластин или других элементов из электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, собранных в определенной геометрической форме, предназначенный для локализации в нем <i>основного магнитного поля</i> трансформатора
11. Стержень (3.2)	Часть магнитной системы, на которой располагаются основные обмотки трансформатора
12. Диаметр стержня (3.3)	Диаметр окружности, в которую вписан контур ступенчатого или квадратного поперечного сечения стержня магнитной системы
13. Ярмо (3.6)	Часть магнитной системы трансформатора, не несущая основных обмоток и служащая для замыкания магнитной цепи
14. Боковое ярмо (3.7)	Ярмо, соединяющее два конца одного и того же стержня
15. Торцевое ярмо (3.8)	Ярмо, соединяющее концы двух и более разных стержней

Термин	Определение
16. Стержневая магнитная система (3.14)	Магнитная система, в которой ярма соединяют разные стержни и нет боковых ярм
17. Шихтованная магнитная система (3.17)	Магнитная система, в которой стержни и ярма с плоской шихтовкой собираются в переплет как цельная конструкция
18. Стыковая магнитная система (3.18)	Магнитная система, в которой стержни и ярма или отдельные части, собранные или скрепленные отдельно, при сборке системы устанавливаются встык
2.4. ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА	
19. Основная обмотка (4.3)	Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия преобразуемого, или отводится энергия преобразованного переменного тока. Примечание. Силовой трансформатор имеет не менее двух основных обмоток
20. Первичная обмотка трансформатора (4.5)	Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия преобразуемого переменного тока
21. Вторичная обмотка трансформатора (4.6)	Обмотка, от которой отводится энергия преобразованного переменного тока
22. Общая обмотка автотрансформатора (4.11)	Обмотка, являющаяся общей частью двух обмоток автотрансформатора
23. Последовательная обмотка автотрансформатора (4.12)	Обмотка автотрансформатора, включаемая последовательно с общей обмоткой
24. Обмотка фазы трехфазного трансформатора (4.16)	Одна из обмоток трехфазного трансформатора, образующая ее фазу
25. Концентрические обмотки (4.18)	Обмотки стержня, изготовленные в виде цилиндров и концентрически расположенные на стержне магнитопровода

Термин	Определение
26. Группа соединения обмоток трансформатора (4.27)	Угловое смещение векторов линейных <i>электродвижущих сил</i> обмотки низшего напряжения к векторам соответствующих электродвижущих сил обмотки высшего напряжения
27. Нейтраль обмотки (4.28)	Общая точка обмоток фаз трехфазного трансформатора, соединяемых в «звезду» или «зигзаг»
2.5. ИЗОЛЯЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА	
28. Междофазная изоляция (5.4)	Изоляция между обмотками разных фаз трансформатора
29. Главная изоляция обмотки (5.5)	Изоляция обмотки от частей остова и других обмоток
30. Продольная изоляция обмотки (5.6)	Изоляция между разными точками изоляции фазы трансформатора
2.6. ОТДЕЛЬНЫЕ ЧАСТИ ТРАНСФОРМАТОРА	
31. Активная часть трансформатора (6.1)	Единая конструкция, включающая в собранном виде остов трансформатора, обмотки с их изоляцией, отводы, части регулирующего устройства, а также все детали, служащие для их механического соединения
32. Активные материалы трансформатора (6.2)	<i>Электротехническая сталь</i> или другой ферромагнитный материал, из которого изготовлена магнитная система, а также <i>металл обмоток</i> и отводов трансформатора
33. Остов (6.3)	Единая конструкция, включающая в собранном виде магнитную систему со всеми деталями, служащими для ее соединения и крепления обмоток
34. Отводы (6.4)	Совокупность электрических проводников, служащих для соединения обмоток трансформатора с вводами, устройствами переключений ответвлений обмоток и другими токоведущими частями

Термин	Определение
35. Бак трансформатора (6.6)	Бак, в котором размещается активная часть трансформатора или трансформаторного агрегата с жидким диэлектриком, газо- или кварцenaполненного
36. Расширитель (6.9)	Сосуд, соединенный с баком трубопроводом и служащий для локализации колебаний уровня жидкого диэлектрика
37. Термосифонный фильтр (6.12)	Сосуд, сообщающийся двумя патрубками с внутренним объемом бака в верхней и нижней его части, заполненный веществом, служащим для очистки масла или другого жидкого диэлектрика от продуктов окисления и для поглощения влаги
38. Переключатель ответвлений обмотки (6.18)	Контактное устройство, служащее для переключения ответвлений обмотки в трансформаторе, переключаемом без возбуждения
39. Радиатор трансформатора (6.26)	Теплообменник, в котором происходит передача тепла от теплоносителя, заполняющего бак трансформатора и движущегося путем естественной конвекции, воздуху, охлаждающему трансформатор
2.7. ДЕТАЛИ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ ЧАСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА 2.7.1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА	
40. Ступенчатое сечение стержня (7.1.4)	Поперечное сечение стержня, собранного из двух или более пакетов пластин <i>разной ширины</i> , имеющее форму ступенчатой фигуры, вписанной в окружность или овал
41. Пластина магнитной системы (7.1.6)	Пластина из электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, являющаяся элементом магнитной системы трансформатора
42. Пакет пластин (7.1.7)	Стопа пластин <i>одного размера</i> в стержне или ярме магнитной системы

Термин	Определение
43. Ярмовая прессующая балка (7.1.16)	Балка, служащая в магнитной системе для прессовки ярма и в качестве торцевой опоры для обмоток или только для прессовки ярма
44. Угол магнитной системы (7.1.17)	Часть магнитной системы, ограниченная объемом, образованным пересечением боковых поверхностей или их продолжений одного из ярм и одного из стержней
45. Стык магнитной системы (7.1.18)	Место сочленения пластин стержня и ярма в шихтованной магнитной системе или пакетов пластин стержня и ярма в стыковой магнитной системе
46. Прямой стык магнитной системы (7.1.19)	Стык магнитной системы, при котором пластины сохраняют прямоугольную форму
47. Косой стык магнитной системы (7.1.20)	Стык магнитной системы, при котором пластины (пакеты) в месте сочленения срезаны под углом, близким к 45° к продольной оси пластины
48. Изоляция пластин магнитной системы (7.1.21)	Слой изоляционного материала, наносимый на поверхность пластины или образуемый на ее поверхности
2.8. РЕЖИМЫ И ПРОЦЕССЫ	
49. Номинальный режим трансформатора (8.1)	Режим работы трансформатора <i>на основном ответвлении</i> при номинальных значениях напряжения, частоты, нагрузки и номинальных условиях места установки и охлаждающей среды
50. Возбуждение трансформатора (8.17)	Создание <i>основного магнитного поля</i> трансформатора путем подключения одной или нескольких обмоток к одной или нескольким сетям или другим источникам с соответствующими номинальными напряжениями и частотой
51. Перевозбуждение трансформатора (8.18)	Увеличение магнитной индукции в магнитной системе трансформатора по отношению к индукции в режиме холостого хода

Термин	Определение
52. Естественное масляное охлаждение (8.26)	Охлаждение частей масляного трансформатора путем естественной конвекции масла при охлаждении внешней поверхности бака и установленных на нем охлаждающих элементов посредством естественной конвекции воздуха и лучеиспускания в воздухе
53. Дутьевое охлаждение (8.28)	Охлаждение трансформатора с использованием принудительного повышения скорости движения воздуха, охлаждающего отдельные части системы охлаждения или активную часть трансформатора
2.9. ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА 2.9.1 ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ	
54. Коэффициент трансформации (9.1.7)	<p>Отношение напряжений на зажимах двух обмоток <i>в режиме холостого хода</i>.</p> <p>Примечания:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Для двух обмоток силового трансформатора, расположенных на одном стержне, коэффициент трансформации принимается равным соотношению чисел их витков. 2. В трехфазном трансформаторе коэффициенты трансформации для фазных и междофазных напряжений могут быть различны. 3. В двухобмоточном трансформаторе коэффициент трансформации равен отношению высшего напряжения к низшему.
55. Потери трансформатора (9.1.24)	Активная мощность, расходуемая в магнитной системе, обмотках и др. частях трансформатора при различных режимах работы
56. Магнитные потери (9.1.26)	Потери, возникающие в магнитной системе трансформатора в режиме холостого хода при номинальном напряжении и номинальной частоте
57. Основные потери в токоведущих частях (9.1.29)	Потери в обмотках и других токоведущих частях трансформатора, определяемые током данной обмотки или ее токоведущей части и ее электрическим сопротивлением, измеренным при постоянном токе

Термин	Определение
58. Суммарные потери трансформатора (9.1.34)	Сумма потерь холостого хода и короткого замыкания трансформатора
59. Относительные потери (9.1.35)	Отношение потерь холостого хода, потерь короткого замыкания или суммарных потерь трансформатора к его номинальной мощности
2.9.2. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРА	
60. Номинальные данные трансформатора (9.2.1)	Указанные изготовителем параметры трансформатора (например, частота, мощность, напряжение, ток), обеспечивающие его работу в условиях, установленных нормативным документом и являющиеся основой для определения условий изготовления, испытаний, эксплуатации
61. Номинальная мощность обмотки (9.2.2)	Указанное на паспортной табличке трансформатора значение <i>полной мощности</i> на основном ответвлении, гарантированное изготовителем в номинальных условиях места установки и охлаждающей среды при номинальной частоте и номинальном напряжении обмотки
62. Номинальное напряжение обмотки трансформатора (9.2.7)	Указанное на паспортной табличке напряжение между зажимами трансформатора, связанными с обмоткой, <i>при холостом ходе</i>
63. Номинальный ток обмотки (9.2.9)	Ток, определяемый по номинальной мощности обмотки, номинальному напряжению и множителю, учитывающему число фаз

3. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах

(ГОСТ 2.710–81 Единая система конструкторской документации.
Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах)

Код элемента	Виды элементов
<i>T</i>	Трансформаторы, автотрансформаторы
<i>M</i>	Двигатели
<i>G</i>	Генераторы
<i>TA</i>	Трансформатор тока
<i>TV</i>	Трансформатор напряжения
<i>LG</i>	Обмотка возбуждения генератора
<i>LE</i>	Обмотка возбуждения возбудителя
<i>LM</i>	Обмотка возбуждения электродвигателя
<i>GE</i>	Возбудитель генератора
<i>XA</i>	Токосъемник, контакт скользящий
<i>LR</i>	Реактор
<i>QF</i>	Выключатель автоматический в силовых цепях
<i>QS</i>	Разъединитель
<i>RR</i>	Реостат
<i>PA</i>	Амперметр
<i>PF</i>	Частотомер
<i>PV</i>	Вольтметр
<i>PW</i>	Ваттметр
<i>PS</i>	Регистрирующий прибор
<i>HL</i>	Прибор световой сигнализации

4. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов

(ГОСТ 11677–85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия)

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Первичная обмотка (ВН): открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	<i>1U1</i> <i>1V1</i> <i>1W1</i>	<i>1U2</i> <i>1V2</i> <i>1W2</i>
Первичная обмотка (ВН): соединение в «звезду» или в «зигзаг»	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нейтральный вывод	<i>1U</i> <i>1V</i> <i>1W</i> <i>1N</i>	
Вторичная обмотка (НН): соединение в «звезду» или в «зигзаг»	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нейтральный вывод	<i>2U</i> <i>2V</i> <i>2W</i> <i>2N</i>	
Первичная обмотка (ВН): соединение в «треугольник»	3	1-й линейный вывод 2-й линейный вывод 3-й линейный вывод	<i>1U</i> <i>1V</i> <i>1W</i>	
Вторичная обмотка (СН): соединение в «треугольник»	3	1-й линейный вывод 2-й линейный вывод 3-й линейный вывод	<i>2U</i> <i>2V</i> <i>2W</i>	
Третичная обмотка (НН): соединение в «треугольник»	3	1-й линейный вывод 2-й линейный вывод 3-й линейный вывод	<i>3U</i> <i>3V</i> <i>3W</i>	

Примечания:

1. В структуре обозначения приняты следующие условности (рис. 4.1):

- первая цифра соответствует номеру обмотки;
- буквы *U*, *V*, *W* соответствуют линейным выводам 1, 2 и 3-й фаз обмотки трехфазного силового трансформатора, а также самим фазам;
- буква *N* соответствует нейтральному выводу;
- вторая цифра соответствует началу и концу фазы обмотки;

2. Ответвления, подводимые к устройствам РПН (регулирование напряжения под нагрузкой) и ПБВ (переключение регулировочных витков без возбуждения /термин 50, с.145/), следует обозначать группой цифр, расположенных в возрастающем порядке (рис. 4.1,з).

3. Фазы, а также начала фаз трехфазного силового трансформатора в дальнейшем изложении будут обозначаться символами A, B, C – для стороны ВН и символами a, b, c – для стороны НН.

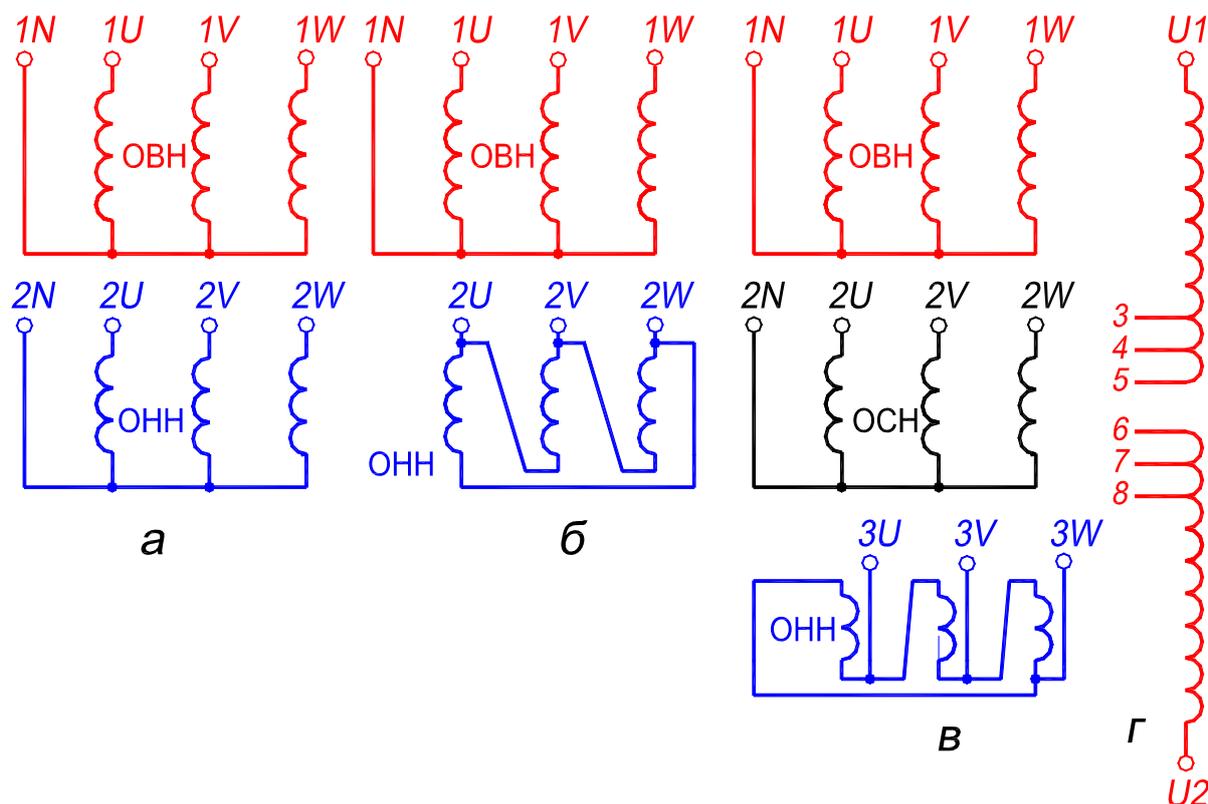


Рис. 4.1. Маркировка выводов и ответвлений силовых трёхфазных трансформаторов:

а – двухобмоточный, U/U_H-0 ; *б* – двухобмоточный, $U_H/Д-11$;

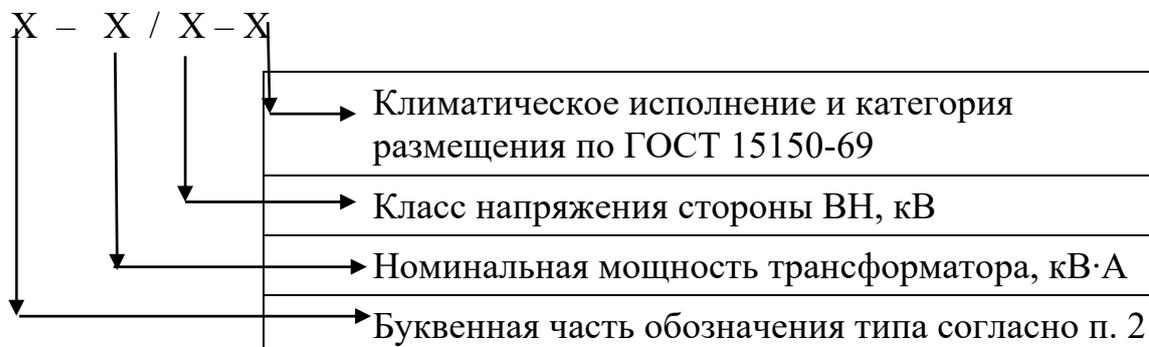
в – трёхобмоточный, $U_H/U_H/Д-0-5$;

г – обмотка фазы U с ответвлениями 3, 4, ..., 8 посередине

5. Условное обозначение трансформаторов

(ГОСТ 11677–85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия)

1. Структурная схема условного обозначения трансформатора



Для автотрансформаторов при классах напряжения стороны СН или НН 110 кВ и выше после класса напряжения стороны ВН через дробную черту указывают класс напряжения стороны СН или НН.

Примечание. Для трансформаторов, разработанных до 01.07.87, допускается указывать последние две цифры года выпуска рабочих чертежей.

2. Буквенная часть условного обозначения должна содержать символы в следующем порядке:

А – автотрансформатор;

О или Т – однофазный или трехфазный трансформатор;

Р – расщепленная обмотка НН;

Условное обозначение видов охлаждения – по табл. 1 ГОСТ 11677–85*;

З – исполнение трансформатора с естественным масляным охлаждением или с охлаждением негорючим жидким диэлектриком с защитой при помощи азотной подушки без расширителя;

Л – исполнение трансформатора с литой изоляцией;

Т – трехобмоточный трансформатор**;

Н – трансформатор РПН (регулирование под нагрузкой);

С – исполнение трансформатора собственных нужд электростанций.

3. В стандартах или технических условиях на трансформаторы конкретных групп или типов могут предусматриваться дополнительные буквенные обозначения после символов, перечисленных выше.

4. Для трансформаторов с разными классами напряжения обмоток ВН допускается применять одинаковые условные обозначения, если эти трансформаторы различаются лишь номинальными напряжениями. В этом случае указывают наибольший из классов напряжения обмотки ВН.

5. Примеры условных обозначений.

Трансформатор трехфазный сухой с естественным воздушным охлаждением при защищенном исполнении, двухобмоточный, мощность – 100 кВ·А, класс напряжения – 10 кВ, климатическое исполнение – У категории 3 по ГОСТ 15150–69:

ТСЗ–100/10–У3.

Трансформатор трехфазный масляный с охлаждением при естественной циркуляции воздуха и масла, двухобмоточный, с регулированием напряжения под нагрузкой, мощность – 2500 кВ·А, класс напряжения – 110 кВ, климатическое исполнение – У категории 1 по ГОСТ 15150–69:

ТМН–2500/110–У1.

Автотрансформатор трехфазный масляный с охлаждением при принудительной циркуляции воздуха и масла с ненаправленным потоком масла, трехобмоточный, с регулированием напряжения под нагрузкой, мощность – 20000 кВ·А, класс напряжения обмотки ВН – 330 кВ, класс напряжения обмотки СН – 110 кВ, климатическое исполнение – У категории 1 по ГОСТ 15150–69:

АТДЦТН–20000/330/110–У1.

* **Таблица 1. Виды охлаждения трансформаторов** (выдержки из ГОСТ 11677–85)

Вид системы охлаждения трансформатора	Условное обозначение вида системы охлаждения
Сухие трансформаторы	
Естественное воздушное при открытом исполнении	С
Воздушное с принудительной циркуляцией воздуха	СД
Масляные трансформаторы	
Естественная циркуляция воздуха и масла	М
Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	Д
Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла	ДЦ
Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком	
Естественное охлаждение негорючим жидким диэлектриком	Н
Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха	НД

** Для двухобмоточных трансформаторов не указывают.

6. Соотношения из теории переменных токов

Уважаемый читатель! Прежде чем переходить к изучению трансформаторов и электрических машин, необходимо напомнить себе некоторые важнейшие соотношения из теории переменных токов. С этой целью внимательно ознакомьтесь с материалом, изложенным в данном разделе.

6.1. Изображение синусоидальной функции в декартовой и полярной системах координат

Пусть ток i в рассматриваемой цепи изменяется во времени по синусоиде (рис. 6.1,а). Наименьший промежуток времени T , по истечении которого значение синусоидальной функции повторяется, соответствует углу 360° или 2π радиан, называется периодом. Количество периодов в секунду $f = 1/T$ называется частотой и измеряется в Герцах.

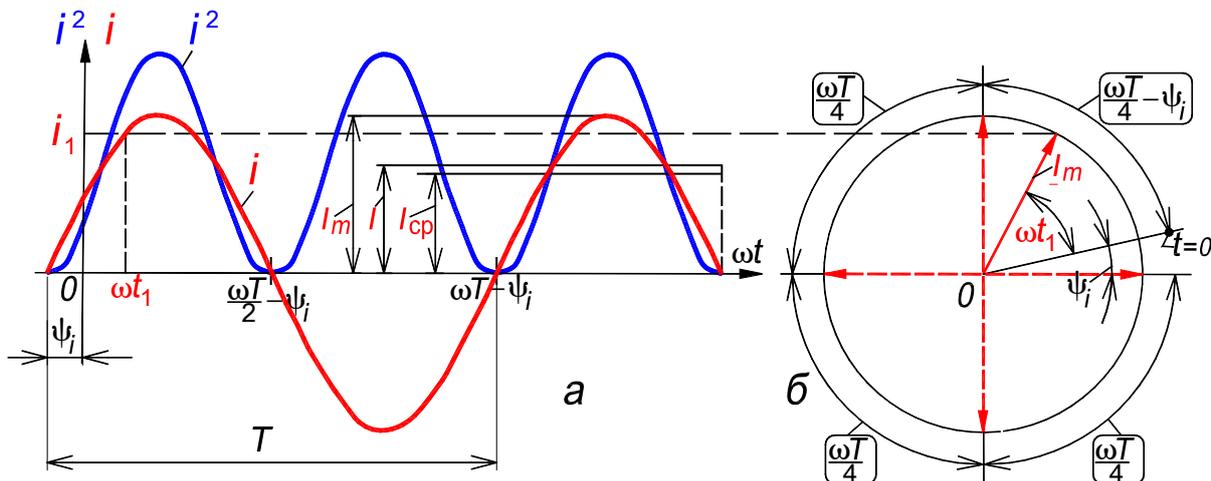


Рис. 6.1. Изображение синусоидальной функции:
а – в прямоугольных координатах, б – векторное

Мгновенное значение тока

$$i = I_m \sin(2\pi t/T - \psi_i) = I_m \sin(2\pi f t - \psi_i) = I_m \sin(\omega t - \psi_i), \quad (6.1)$$

где I_m – амплитудное значение тока.

Аргумент синуса ($2\pi t/T - \psi_i$) определяет стадию или фазу изменения тока и называется фазным углом или фазой, а ψ_i соответствует значению фазного угла при $t = 0$ и называется начальной фазой.

Показанное на рис. 6.1 расположение начала отсчета времени и ближайшего нулевого значения синусоиды соответствует отрицательному значению начальной фазы ψ_i .

Величина $2\pi/T = \omega$ есть скорость изменения фазного угла и называется угловой частотой. Измеряется ω числом радиан, на которое увеличивается фазный угол в секунду, т. е. $\omega = 2\pi f$.

Среднее арифметическое значение синусоидальной величины за целый период равно нулю, так как функция расположена симметрично относительно оси абсцисс, со сдвигом на половину периода. Среднее значение синусоиды за половину периода от $-\psi_i$ до $(\omega T/2 - \psi_i)$, т. е. равно площади полувольты, деленной на ее основание $T/2$, т. е.

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{T/2} \int_{-\psi_i}^{\omega T/2 - \psi_i} i dt = \frac{2}{T} I_m \int_{-\psi_i}^{\omega T/2 - \psi_i} \sin(\omega t + \psi_i) dt = \frac{2}{\pi} I_m. \quad (6.2)$$

Электромеханическая сила взаимодействия двух проводников, по которым протекает одинаковый ток, пропорциональна мгновенному значению тока во второй степени. Тепловое действие тока также пропорционально току во второй степени. Поэтому вводят понятие о среднем квадратичном или действующем значении тока, для определения которого нужно построить квадратичную зависимость $i^2 = f(t)$ за период или полупериод и вычислить корень квадратный из ее среднего значения, т. е.

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{-\psi_i}^{\omega T/2 - \psi_i} i^2 dt} = I_m \sqrt{\frac{2}{T} \int_{-\psi_i}^{\omega T/2 - \psi_i} \sin^2(\omega t + \psi_i) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (6.3)$$

Отношение действующего значения тока к его среднему значению за положительную полувольту называется коэффициентом формы тока:

$$k_i = I/I_{\text{ср}}. \quad (6.4)$$

При синусоидальном изменении тока

$$k_i = I/I_{\text{ср}} = \pi/2\sqrt{2} = 1,11. \quad (6.5)$$

Все сказанное относительно синусоидального тока, его мгновенного, среднего и действующего значений в одинаковой степени относится и к другим величинам, изменяющимся синусоидально. Обычно, говоря о токах, напряжениях и ЭДС, имеют в виду их действующие значения, все другие значения этих величин всегда оговариваются особо.

Вместо того чтобы изображать ток в прямоугольных координатах, как на рис. 6.1,а, значительно проще изобразить его в полярных координатах с помощью вращающегося вектора I_m так, как показано на рис. 6.1,б, причем его следует представить себе вращающимся вокруг точки O в направлении,

противоположном вращению часовой стрелки со скоростью, равной угловой частоте $\omega = 2\pi f$. Для момента времени $t = 0$ вектор \underline{I}_m располагается под углом ψ_i к положительному направлению оси абсцисс. По истечении промежутка времени t вектор \underline{I}_m повернется на угол ωt , проекция этого вектора на ось ординат дает мгновенное значение $i = I_m(\sin(\omega t - \psi_i))$ для рассматриваемого момента времени. За период T вектор \underline{I}_m совершит полный оборот вокруг точки O , что соответствует полной волне синусоиды на рис. 6.1,а.

Для тока, ЭДС и напряжения принято изображать на векторной диаграмме не амплитудные, а действующие значения этих величин, что сводится только к различию в масштабах для вращающегося вектора и его проекции, чтобы по-прежнему эта проекция соответствовала мгновенному значению синусоидальной величины.

Если совместно с током изображается на общей векторной диаграмме и напряжение, то нужно соблюсти правильную ориентацию этих векторов относительно друг друга.

В общем случае цепь переменного тока состоит из активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C .

6.2. Напряжение, ток и мощность в активном сопротивлении

Для любого момента времени ток в активном сопротивлении и напряжение на зажимах сопротивления (рис. 6.2,а) связан законом Ома: $I = U/R$.

При синусоидальном напряжении $u = U_m \sin \omega t$ и ток

$$i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t \quad (6.6)$$

Действующее значение тока

$$I = U_m/\sqrt{2}R = U/R. \quad (6.7)$$

Линии тока и напряжения показаны на рис. 6.2,б. Напряжение и ток совпадают по фазе и поэтому изображающие их векторы \underline{U} и \underline{I} совпадают по направлению (рис. 6.2,в).

Мгновенная мощность

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = UI (1 - \cos 2\omega t) \quad (6.8)$$

изменяется с частотой 2ω и колеблется в пределах от 0 до $2UI$, оставаясь все

время положительной (рис. 6.2,б). Среднее значение мощности за период называется активной мощностью:

$$P = UI = I^2R. \quad (6.9)$$

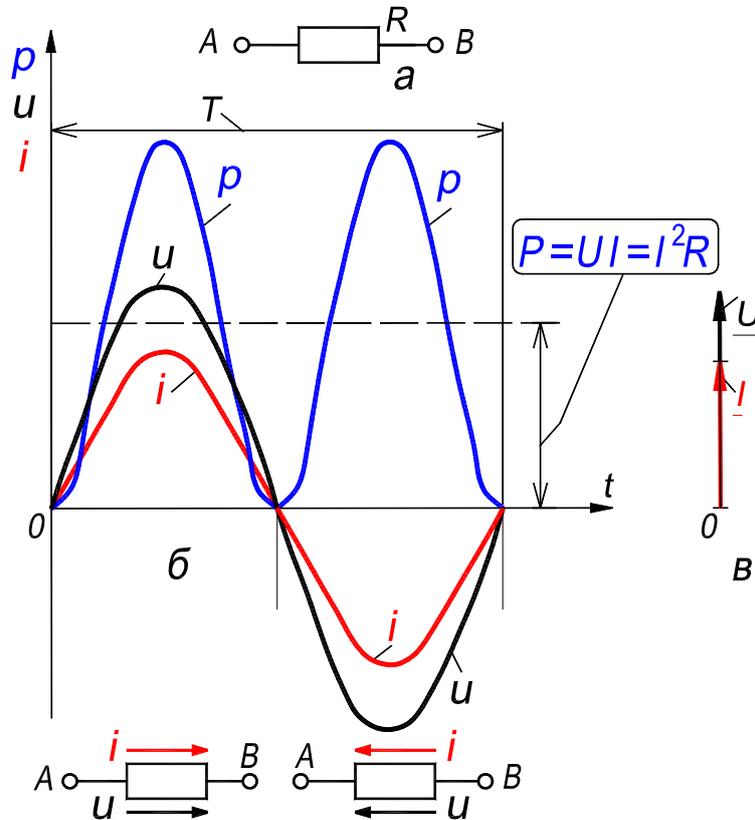


Рис. 6.2. Цепь с активным сопротивлением: *а* – схема, *б* – изменение напряжения, тока и мощности во времени, *в* – векторная диаграмма

6.3. Напряжение, ток и мощность в индуктивном сопротивлении

Изменение тока i в индуктивности L (рис. 6.3,а) вызывает ЭДС самоиндукции

$$e_L = -Ldi/dt. \quad (6.10)$$

При синусоидальном токе $i = I_m \sin \omega t$ ЭДС самоиндукции

$$e_L = -Ldi/dt = \omega LI_m \cos \omega t = E_m \sin (\omega t + \pi/2). \quad (6.11)$$

ЭДС e_L отстает по фазе на четверть периода от тока (рис. 6.3,б) и соответственно вектор \underline{E}_L отстает от вектора \underline{I} на $\pi/2$ (рис. 6.3,в). Для того чтобы через индуктивность проходил переменный ток, на ее зажимах должно быть напряжение, равное и противоположное наведенной ЭДС, т. е.

$$u = -e_L = Ldi/dt = \omega LI_m \sin (\omega t + \pi/2) = U_m \sin (\omega t + \pi/2). \quad (6.12)$$

Действующее значение напряжения и тока связано следующий выражением:

$$U = \omega LI = X_L I. \quad (6.13)$$

Величина $\omega L = X_L$ называется индуктивным сопротивлением.

Мгновенная мощность в цепи, содержащей индуктивность,

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin(\omega t + \pi/2) \cdot I_m \sin \omega t = \\ &= (U_m I_m / 2) [\cos \pi/2 - \cos(2\omega t + \pi/2)] = UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (6.14)$$

изменяется с угловой частотой 2ω , причем среднее значение мощности $P = 0$ (рис. 6.3,б). Поступившая за время, пока $p > 0$, энергия запасается в индуктивности в форме энергии электромагнитного поля, а за время, когда $p < 0$, – возвращается в сеть.

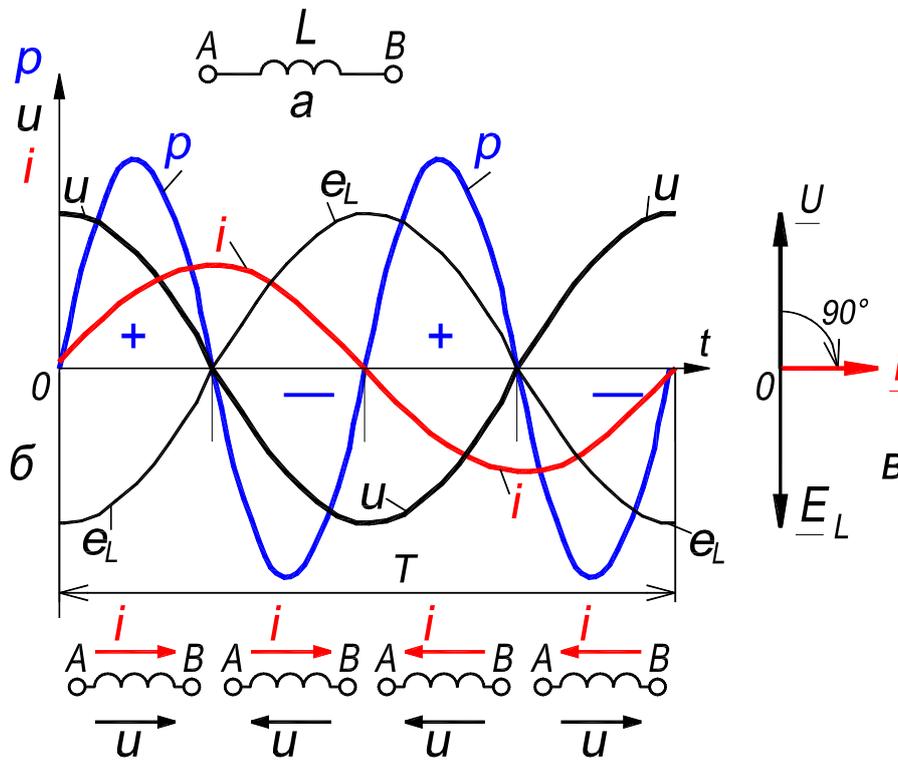


Рис. 6.3. Цепь с индуктивным сопротивлением: а – схема, б -- изменение напряжения, тока и мощности во времени, в – векторная диаграмма

6.4. Напряжение, ток и мощность в ёмкостном сопротивлении

На емкости C величина заряда

$$q = Cu. \quad (6.15)$$

Ток в цепи с емкостью (рис. 6.4,а) равен скорости изменения ее заряда:

$$i = dq/dt = Cdu/dt \quad (6.16)$$

или

$$u = (1/C) \int i dt. \quad (6.17)$$

При синусоидальном напряжении $u = U_m \sin \omega t$ ток

$$i = Cdu/dt = \omega CU_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (6.18)$$

Действующее значение тока

$$I = U/1/(\omega C) = U/X_C. \quad (6.19)$$

где $1/(\omega C) = X_C$ – емкостное сопротивление.

Ток i опережает на четверть периода напряжение u (рис. 6.4,б). Вектор тока \underline{I} опережает вектор напряжения \underline{U} на угол $\pi/2$ (рис. 6.4,в).

Мгновенная мощность в цепи, содержащей емкость,

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + \pi/2) = UI \sin 2\omega t \quad (6.20)$$

изменяется синусоидально с угловой частотой 2ω , среднее значение мощности равно нулю (рис. 6.4,б).

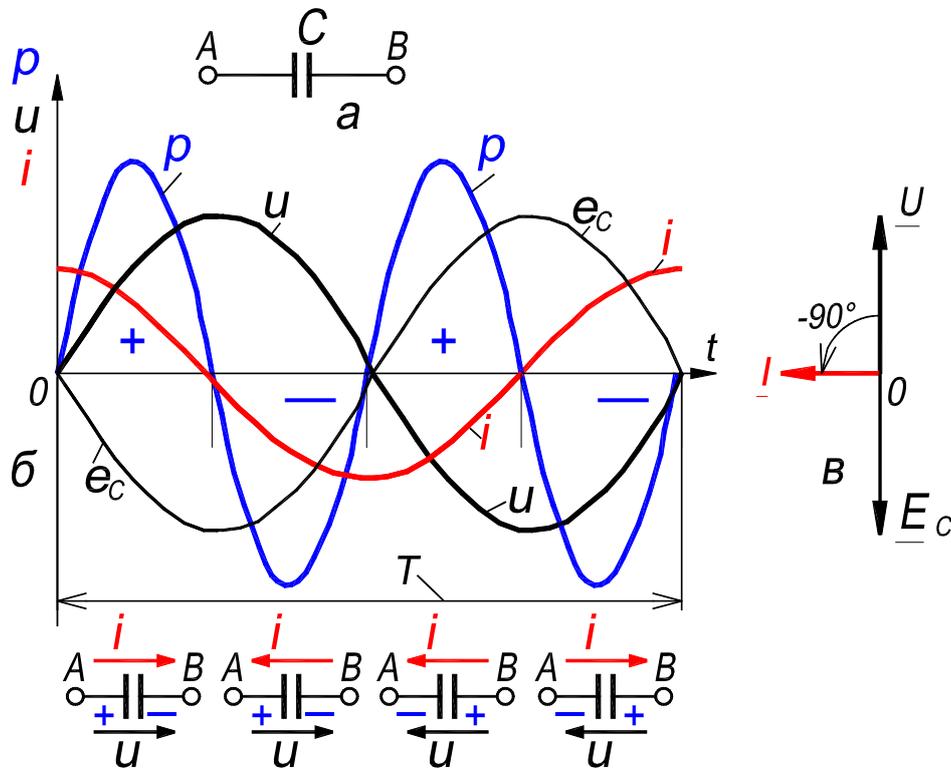


Рис. 6.4. Цепь с емкостным сопротивлением: а – схема, б – изменение напряжения, тока и мощности во времени, в – векторная диаграмма

6.5. Напряжение, ток и мощность в цепи со смешанным сопротивлением

При последовательном соединении активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C (рис. 6.5,а) для определения тока можно воспользоваться вторым законом Кирхгофа, по которому

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (6.21)$$

Сумме мгновенных значений синусоидальных функций времени соответствует сумма векторов, изображающих эти функции, т. е.

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C. \quad (6.22)$$

Указанное векторное равенство представлено на рис. 6.5,в. Вектор тока \underline{I} расположен по горизонтали вправо, с ним совпадает по направлению вектор \underline{U}_R . Вектор \underline{U}_L опережает вектор \underline{I} на $\pi/2$ и вектор \underline{U}_C отстает на $\pi/2$. Величина приложенного напряжения определится из прямоугольного треугольника Oab :

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = R^2 I^2 + [\omega L I - I/(\omega C)]^2,$$

откуда

$$I = U / (R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2)^{1/2} = U / (R^2 + [X_L - X_C]^2)^{1/2}. \quad (6.23)$$

Если $U_L = U_C$, то цепь ведет себя как безындукционная, и угол между векторами тока и напряжения равен нулю.

В общем случае $U_L \neq U_C$ и тогда ток сдвинут относительно напряжения на угол φ . Этот угол всегда определяется как разность начальных фаз напряжения и тока $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, и величина его из треугольника Oab равна:

$$\varphi = \arctg[(U_L - U_C)/U_R] = \arctg[(X_L - X_C)/R]. \quad (6.24)$$

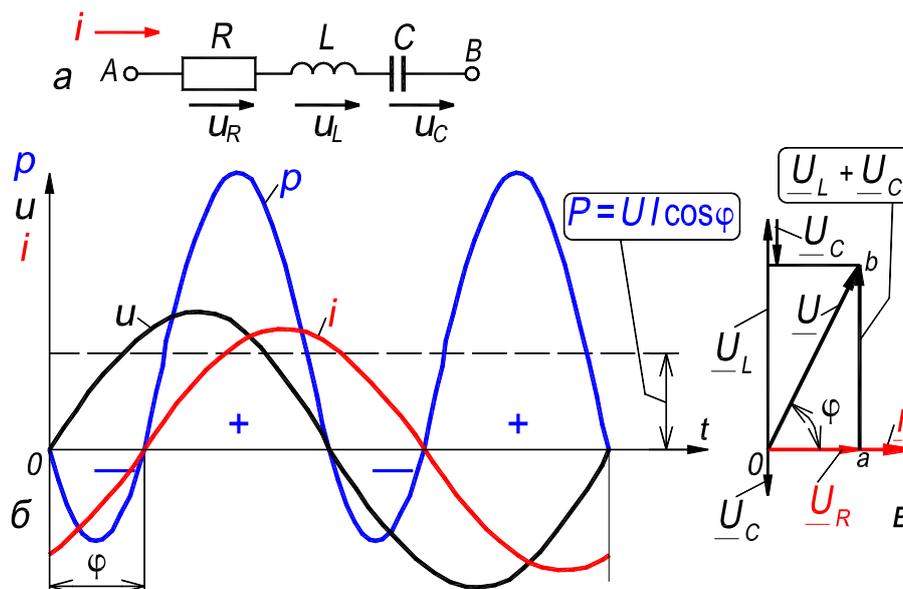


Рис. 6.5. Цепь со смешанным сопротивлением: а – схема, б – изменение напряжения, тока и мощности во времени, в – векторная диаграмма

На рис. 6.5,б изображены зависимости u , i и p для случая, когда в цепи имеется смешанная активно-индуктивная нагрузка ($X_L - X_C > 0$). Здесь мощность p колеблется с двойной частотой относительно линии, приподнятой над осью абсцисс на величину активной мощности $P = UI \cos \varphi$. Мгновенная мощность принимает как положительные, так и отрицательные значения, но энергия, поступающая из сети в рассматриваемую цепь, больше энергии, возвращаемой обратно в сеть. Аналогично протекает процесс в цепи со смешанной активно-емкостной нагрузкой.

6.6. Изображение векторов тока и напряжения на комплексной плоскости

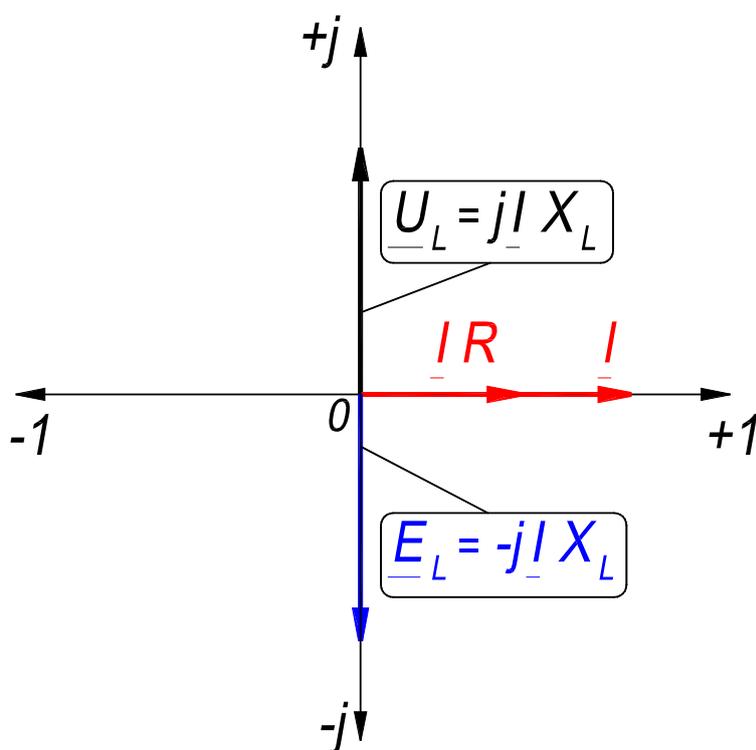


Рис. 6.6. Изображение векторов на комплексной плоскости

Для изображения и записи векторов удобно использовать комплексную плоскость. По оси абсцисс откладываются вещественные числа, а по оси ординат – мнимые (рис. 6.6). Первый вектор, например вектор тока \underline{I} , откладывается обычно по оси вещественных чисел. Также откладываются и другие векторы, совпадающие по направлению с вектором тока, например вектор напряжения \underline{IR} на активном сопротивлении R . Вектор ЭДС \underline{E}_L самоиндукции отстает от вектора тока на $\pi/2$. Вектор напряжения \underline{U}_L на индуктивном сопротивлении X_L опережает вектор тока \underline{I} на $\pi/2$ и записывается сле-

дующим образом: $\underline{U}_L = j\underline{I}X_L$, т. е. повороту вектора $\underline{I}X_L$ на $\pi/2$ в сторону опережения соответствует умножение этого вектора на $+j$. Так как угол $\pi/2$ между векторами \underline{I} и $j\underline{I}X_L$ сохраняется неизменным независимо от положения вектора тока \underline{I} , то эта форма записи справедлива при любом положении вектора тока \underline{I} .

7. Назначение, области применения и номинальные данные трансформаторов

Трансформатором называется статический индуктивный преобразователь, имеющий две или больше индуктивно связанных взаимно неподвижных обмоток и предназначенный для преобразования посредством электромагнитной индукции параметров электрической энергии переменного тока (напряжения, тока, частоты, числа фаз).

Электрическая энергия переменного тока подводится к первичной обмотке трансформатора от сети с числом фаз m_1 , фазным напряжением U_1 и частотой f_1 , и передается во вторичную обмотку с числом фаз m_2 , фазным напряжением U_2 и частотой f_2 посредством магнитного поля. В большинстве случаев при помощи трансформатора преобразуются только напряжения $U_2 \neq U_1$, и токи $I_2 \neq I_1$, без изменения частоты и числа фаз.

Обычно электрическое соединение между первичной и вторичной обмотками в трансформаторе отсутствует и энергия из одной обмотки в другую передается только за счет магнитной связи между ними.

Трансформатор, имеющий две однофазные или многофазные электрически не связанные между собой обмотки (рис. 1.2, с. 136), называется двухобмоточным; трансформатор, имеющий три или более электрически не связанные обмотки – трехобмоточным или многообмоточным (рис. 18.3, с. 325).

Особой разновидностью трансформатора является автотрансформатор, в котором часть энергии из первичной сети передается во вторичную электрическим путем за счет электрической связи между обмотками (см. разд. 18.1, с. 320, сл.).

Однофазная или многофазная обмотка, потребляющая энергию из сети, называется первичной. При направлениях преобразования энергии, показанных на рис. 1.2 (с. 136), обмотка I – первичная.

Обмотка, отдающая энергию в сеть, называется вторичной (обмотка 2 на рис. 1.2, с. 136). Многообмоточный трансформатор может иметь несколько первичных и вторичных обмоток (рис. 18.3, с. 325, две вторичные обмотки 2 и 3).

Многофазные обмотки образуются из соединенных звездой или многоугольником фазных обмоток, число которых равно числу фаз сети. Каждая из фазных обмоток представляет собой многовитковую катушку, располагающуюся на отдельном стержне магнитопровода.

В зависимости от числа фаз различают однофазные (рис. В.20, с.71), трехфазные (рис. 10.1, с. 190, 191) и многофазные трансформаторы.

Трансформатор как преобразователь электрической энергии находит широкое применение. При помощи трансформаторов производится передача электрической энергии от электрических станций к потребителям. При этой передаче напряжение должно многократно изменяться. Поэтому суммарная установленная мощность трансформаторов в современных электрических системах в 5 – 7 раз превышает установленную мощность электрических генераторов.

Наряду с трансформаторами и автотрансформаторами, используемыми в электрических системах и называемых силовыми, широкое распространение получили трансформаторы, предназначенные для преобразований числа фаз и частоты. В разнообразных промышленных установках, в устройствах связи, радио, телевидения, автоматических системах регулирования и управления и в измерительной технике применяются специальные типы трансформаторов (разд. 18, с. 320, сл.).

Отечественная промышленность выпускает широкий ассортимент трансформаторов мощностью от долей вольт-ампера до нескольких сотен мегавольт-ампер; на напряжения от долей вольта до сотен киловольт; на токи до нескольких десятков килоампер; на частоты до сотен тысяч герц, а также ряд специальных трансформаторов (импульсных, с регулируемым напряжением, со стабилизированным напряжением и др.; разд. 18, с. 320, сл.).

Трансформаторы изготавливаются по техническим условиям или в соответствии с требованиями стандартов и предназначаются изготовителем для выполнения вполне определенных функций по преобразованию электрической энергии.

Частота, токи, напряжения, мощности и другие параметры, относящиеся к тому режиму работы, для которого трансформатор предназначен изготовителем, называются номинальными. Номинальные параметры указываются на табличке, прикрепленной к трансформатору.

Под номинальными напряжениями понимаются линейные напряжения каждой из обмоток на линейных выводах $U_{1\text{ном.л}}$ и $U_{2\text{ном.л}}$.

Под номинальной мощностью трансформатора понимается полная мощность: $S_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}}$ – для однофазного трансформатора, $S_{1\text{ном}} = \sqrt{3}U_{1\text{ном.л}}I_{1\text{ном.л}} = 3U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}}$ – для трехфазного трансформатора ¹.

В двухобмоточном трансформаторе номинальные мощности первичной ($S_{1\text{ном}}$) и вторичной ($S_{2\text{ном}}$) обмоток одинаковы и равны номинальной мощности трансформатора $S_{1\text{ном}} = S_{2\text{ном}} = S$.

Номинальная частота $f_{\text{ном}}$ гармонически изменяющихся величин (токов, напряжений) для трансформаторов общего применения в нашей стране равна 50 Гц, в некоторых других странах, например в США, 60 Гц.

Номинальные токи определяются по номинальной мощности и номинальному напряжению обмотки: $I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{1\text{ном}}$ – для однофазного, $I_{1\text{ном.л}} = S_{\text{ном}}/\sqrt{3}U_{1\text{ном.л}}$ – для линейного тока трехфазного трансформатора, $I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}}/3U_{1\text{ном}}$ – для фазного тока трехфазного трансформатора. ¹

Трансформатор может эксплуатироваться не только при номинальных значениях величин, указанных на табличке. Работа трансформатора возможна и в диапазоне изменения тока I_2 от 0 до $I_{2\text{ном}}$, возможны и некоторые перегрузки по току, ограниченные по времени, а также небольшие изменения напряжения и частоты [13, 14].

При фиксированном первичном напряжении $U_{1\text{ном}} = \text{const}$ вторичное напряжение U_2 , зависящее от величины вторичной нагрузки и ее характера, может отличаться на $\pm(5 - 10) \%$ от напряжения U_2 при холостом ходе, когда $I_2 = 0$. Согласно стандарта за номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{ном}}$ принято его значение при холостом ходе трансформатора (при $I_2 = 0$) и номинальных значениях первичного напряжения и частоты (термин 62, с. 147). Так принято для того, чтобы избежать неопределенности, обусловленной тем, что вторичное напряжение зависит и от величины вторичного тока и от его фазы.

За номинальный вторичный ток условно принимается ток, рассчитанный по номинальной мощности при номинальном вторичном напряжении: $I_{2\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$ – для однофазного трансформатора; $I_{2\text{ном.л}} = S_{\text{ном}}/\sqrt{3}U_{2\text{ном.л}}$ – для линейного тока трехфазного трансформатора; $I_{2\text{ном}} = S_{\text{ном}}/3U_{2\text{ном}}$ – для фазного тока трехфазного трансформатора.

В зависимости от соотношения между номинальными напряжениями первичной и вторичной обмоток различают трансформаторы понижающие и повышающие. В повышающем трансформаторе первичная обмотка является обмоткой низшего напряжения (НН), вторичная – обмоткой высшего напряжения (ВН). В понижающем – наоборот. Например, трансформатор на рис. 1.2, с. 136, будет повышающим, если $U_{1\text{ном}} < U_{2\text{ном}}$, и понижающим, если $U_{1\text{ном}} > U_{2\text{ном}}$ (стрелки на рисунке показывают направление передачи энергии).

¹ Линейные величины снабжаются индексом «л», у фазных величин индекс отсутствует ($U_{\text{л}}$ – линейное, (U_1 – фазное первичное напряжение).

8. Принцип действия и виды трансформаторов

А. Принцип действия. Трансформатор представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

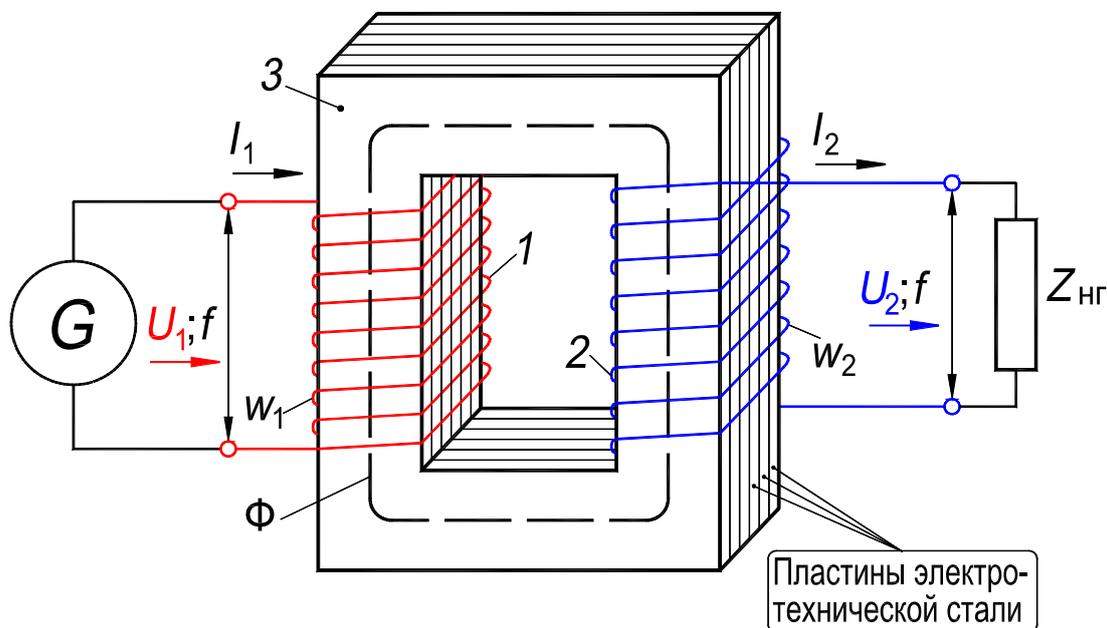


Рис. 8.1. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора:

G – генератор переменного тока; $Z_{нг}$ – сопротивление нагрузки

В простейшем случае (рис. 8.1) трансформатор имеет одну первичную обмотку 1, к которой подводится электрическая энергия, и одну вторичную обмотку 2, от которой энергия отводится к потребителю (нагрузке). Передача энергии из одной обмотки в другую производится путем электромагнитной индукции. Для усиления электромагнитной связи между обмотками они обычно располагаются на замкнутом ферромагнитном сердечнике 3. При частоте $f < 150$ Гц сердечник изготавливается из пластин электротехнической стали толщиной 0,35 и 0,50 мм. При более высоких частотах применяется более тонкая листовая сталь. При частоте порядка 100 000 Гц и выше потери на гистерезис и вихревые токи в подобном сердечнике становятся чрезвычайно большими, и в этом случае применяют трансформаторы без ферромагнитного сердечника (так называемые воздушные трансформаторы). Трансформаторы весьма малой мощности для радиотехнических, счетно-решающих и других устройств изготавливаются также с сердечниками из ферритов, которые представляют собой особый вид магнитодиэлектриков с малыми магнитными потерями.

При подключении первичной обмотки трансформатора (рис. 8.1) к сети с синусоидальным напряжением U_1 в обмотке возникает ток I_1 , который создает пульсирующий магнитный поток Φ , изменяющийся по периодическому закону во времени и замыкающийся по сердечнику. Поток Φ индуцирует ЭДС частоты f как в первичной, так и во вторичной обмотке. При подключении к вторичной обмотке нагрузки $Z_{\text{нп}}$ в этой обмотке возникает вторичный ток I_2 и на ее зажимах устанавливается некоторое напряжение U_2 . Результирующий магнитный поток сердечника создается током обеих обмоток.

Б. Электрические соотношения в идеальном трансформаторе. Идеальным считаем трансформатор, в котором: 1) отсутствуют потери энергии (сопротивления обмоток и потери в стали сердечника равны нулю); 2) магнитная проницаемость стали сердечника $\mu_c = \infty$ и в листах стали сердечника нет разъемов и стыков; 3) все линии магнитной индукции проходят целиком по сердечнику и каждая линия сцепляется со всеми витками первичной (w_1) и вторичной (w_2) обмоток. При соблюдении последнего условия электромагнитная связь между первичной и вторичной цепями является полной и коэффициент электромагнитной связи обмоток трансформатора

$$c = M/\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}} = 1. \quad (8.1)$$

Здесь L_{11} и L_{22} – собственные индуктивности, а M – взаимная индуктивность обмоток.

ЭДС первичной и вторичной обмоток такого трансформатора при синусоидальных переменных токах соответственно равны

$$\begin{aligned} e_1 &= -d\Psi_1/dt = -w_1 d(\Phi_m \sin \omega t)/dt = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \pi/2); \\ e_2 &= -d\Psi_2/dt = -w_2 d(\Phi_m \sin \omega t)/dt = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2), \end{aligned} \quad (8.2)$$

где Φ_m – амплитуда магнитного потока трансформатора. ЭДС обмоток отстают от магнитного потока на $\pi/2$.

Действующие значения этих ЭДС

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{1m}/\sqrt{2} = \omega w_1 \Phi_m/\sqrt{2} = \pi\sqrt{2}f w_1 \Phi_m = 4,44f w_1 \Phi_m; \\ E_2 &= E_{2m}/\sqrt{2} = \omega w_2 \Phi_m/\sqrt{2} = \pi\sqrt{2}f w_2 \Phi_m = 4,44f w_2 \Phi_m. \end{aligned} \quad (8.3)$$

Так как в идеальном трансформаторе падения напряжения отсутствуют, то

$$U_1 = E_1; U_2 = E_2. \quad (8.4)$$

На основании выражений (8.3) и (8.4)

$$U_1/U_2 = E_1/E_2 = w_1/w_2 \quad (8.5)$$

или

$$U_1/U_2 = k; U_2 = U_1/k, \quad (8.6)$$

где

$$k = w_1/w_2 \quad (8.7)$$

называется коэффициентом трансформации трансформатора.

Поскольку в идеальном трансформаторе потери активной и реактивной энергии отсутствуют, то

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

откуда

$$I_2/I_1 = U_1/U_2 = w_1/w_2 \quad (8.8)$$

или

$$I_2/I_1 = k; I_2 = k I_1. \quad (8.9)$$

Таким образом, в идеальном трансформаторе первичное и вторичное напряжения прямо пропорциональны, а первичный и вторичный токи обратно пропорциональны числам витков соответствующих обмоток. В реальном трансформаторе полученные соотношения несколько нарушаются, однако в мощных трансформаторах с ферромагнитными сердечниками эти отклонения при нагрузках, близких к номинальным, относительно малы.

В. Виды трансформаторов. Трансформатор с одной первичной и с одной вторичной обмотками называется двухобмоточным. Во многих случаях применяются трансформаторы с одной первичной и несколькими вторичными обмотками. Такие трансформаторы называются многообмоточными. Далее прежде всего рассматриваются двухобмоточные трансформаторы.

Чаще всего применяются однофазные и трехфазные трансформаторы. Трансформаторы с другим числом фаз используются в специальных устройствах.

В зависимости от назначения трансформаторы имеют некоторые особенности в конструкции и режимах работы.

Трансформаторы, предназначенные для преобразования энергии переменного тока в электрических сетях энергетических систем (на электростанциях и подстанциях, промышленных предприятиях, в городских сетях, в сельском хозяйстве и т. д.), называются силовыми. Частота тока силовых трансформаторов в РФ равна 50 Гц, а в США и в некоторых других странах 60 Гц. Силовые трансформаторы представляют собой наиболее распространенный и наиболее важный класс трансформаторов. Кроме этого, имеется целый ряд трансформаторов специального назначения: выпрямительные, сварочные, измерительные и др. (разд. 18, с. 320, сл.).

Силовые трансформаторы изготавливают с масляным охлаждением (масляные) или воздушным охлаждением (сухие). В масляных трансформаторах магнитопровод с обмотками помещают в бак с трансформаторным маслом, которое выполняет одновременно роль электрической изоляции и охлаждающего агента. Однако трансформаторное масло является горючим, в связи с чем при аварии таких трансформаторов существует определенная опасность возникновения пожара. Поэтому в общественных и жилых зданиях, а также в ряде других случаев применяются сухие трансформаторы, охлаждение которых осуществляется воздухом. В паспортных табличках силового трансформатора указываются следующие данные: 1) номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}$ (кВ·А); 2) номинальные линейные напряжения обмоток $U_{\text{л.ном}}$ (кВ); 3) номинальные линейные токи $I_{\text{л.ном}}$ (А); 4) номинальная частота f (Гц); 5) число фаз m ; 6) схема и группа соединения обмоток (разд. 13.2, с. 227, сл.); 7) напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}}$ (разд. 14, с. 242); 8) режим работы (длительный, кратковременный); 9) способ охлаждения (разд. 10, с. 188, сл.).

К настоящему времени изготовлены силовые трансформаторы единичной мощностью 1000 МВ·А и напряжением 750 кВ и более.

Основные вопросы теории являются общими для всех видов трансформаторов.

9. Устройство магнитопроводов и обмоток трансформаторов

А. Виды магнитопроводов силовых трансформаторов

По конструкции магнитопровода трансформаторы подразделяются на стержневые и броневые. Магнитопровод, или сердечник, однофазного стержневого трансформатора (рис. 9.1, *а*) имеет два стержня, на которых размещаются обмотки, и два ярма, которые служат для создания замкнутого магнитопровода. Каждая из двух обмоток (*1* и *2*) состоит из двух частей, расположенных на двух стержнях, причем эти части соединяются либо последовательно, либо параллельно. При таком расположении первичная и вторичная обмотки находятся близко друг от друга, что приводит к увеличению коэффициента электромагнитной связи [см. равенство (8.1)].

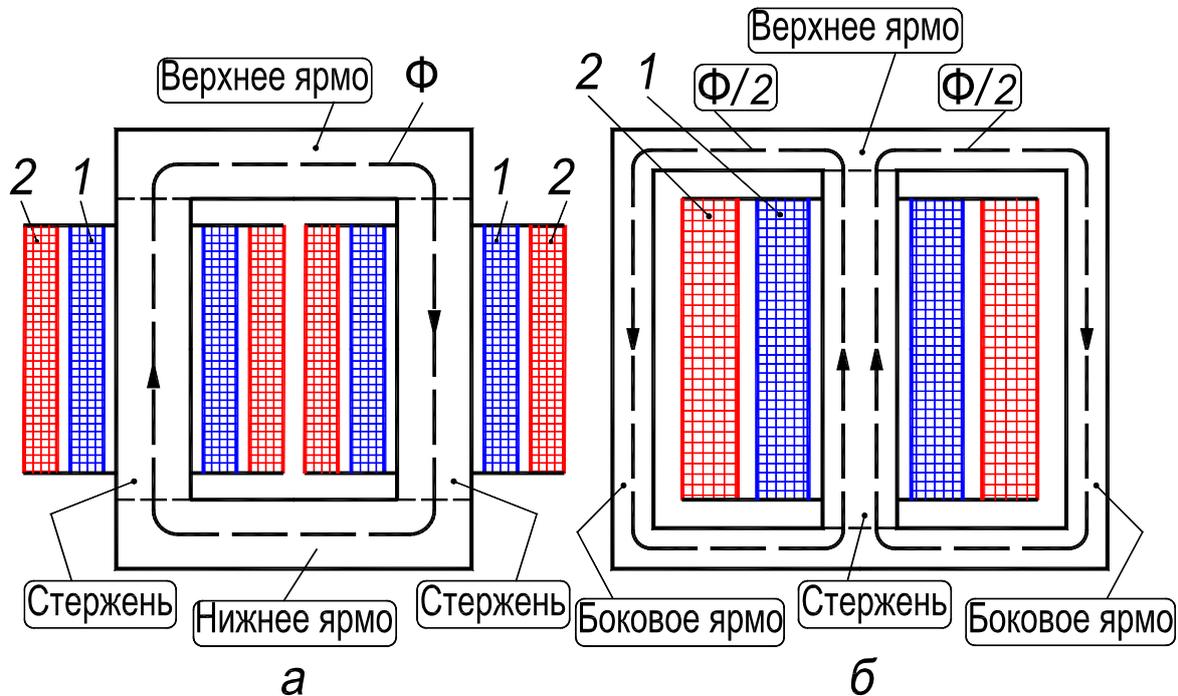


Рис. 9.1. Устройство однофазных трансформаторов:

а – стержневого, *б* – броневидного

Однофазный трансформатор броневидной конструкции (рис. 9.1, *б* и 1.2, с. 136) имеет один стержень с обмотками и развитое ярмо, которое частично закрывает обмотки подобно «броню».

Для преобразования, или трансформации, трехфазного тока можно использовать три однофазных трансформатора (рис. 9.3), которые включаются по отдельности в каждую фазу трехфазной сети. Такое устройство называется трехфазной трансформаторной группой. Чаще, однако, применяются

трехфазные трансформаторы с общим для всех фаз сердечником, так как такие трансформаторы компактнее и дешевле.

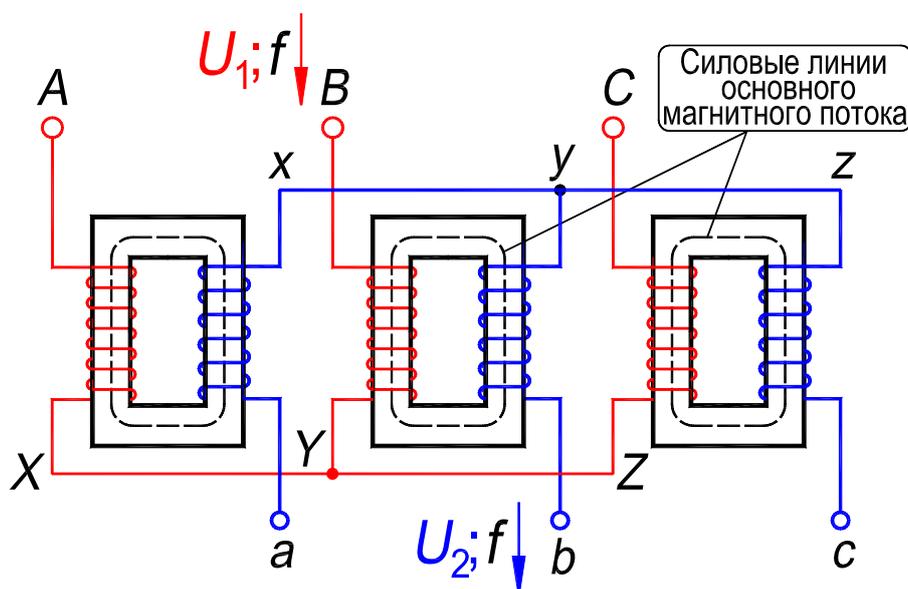


Рис. 9.2. Трехфазная трансформаторная группа

Образование трехфазного трансформатора стержневого типа показано на рис. 9.3. Если для трехфазных синусоидальных токов соблюдается условие

$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

то для синусоидальных потоков трех трансформаторов (рис. 9.3, а) также соблюдается условие

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0.$$

Поэтому, если объединить три стержня 1, 2 и 3 (рис. 9.3, а) в общий стержень, то поток в этом стержне будет равен нулю и этот стержень можно удалить. Тогда получается трехфазный трехстержневой трансформатор, показанный на рис. 9.3,б. Конструкцию этого трансформатора можно упростить, расположив все три стержня в одной плоскости (рис. 9.3, в). Эта последняя конструкция была предложена М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. и получила всеобщее распространение (см. рис. 10.12 – 10.27, с. 207,сл.). Такой сердечник не вполне симметричен, так как длина магнитопровода для средней фазы В несколько короче, чем для крайних фаз А и С, однако влияние этой несимметрии незначительно. Оно проявляется в основном при холостом ходе трансформатора влияя на несимметрию трёхфазного тока холостого хода: токи крайних фаз между собой равны, но несколько больше тока средней фазы.

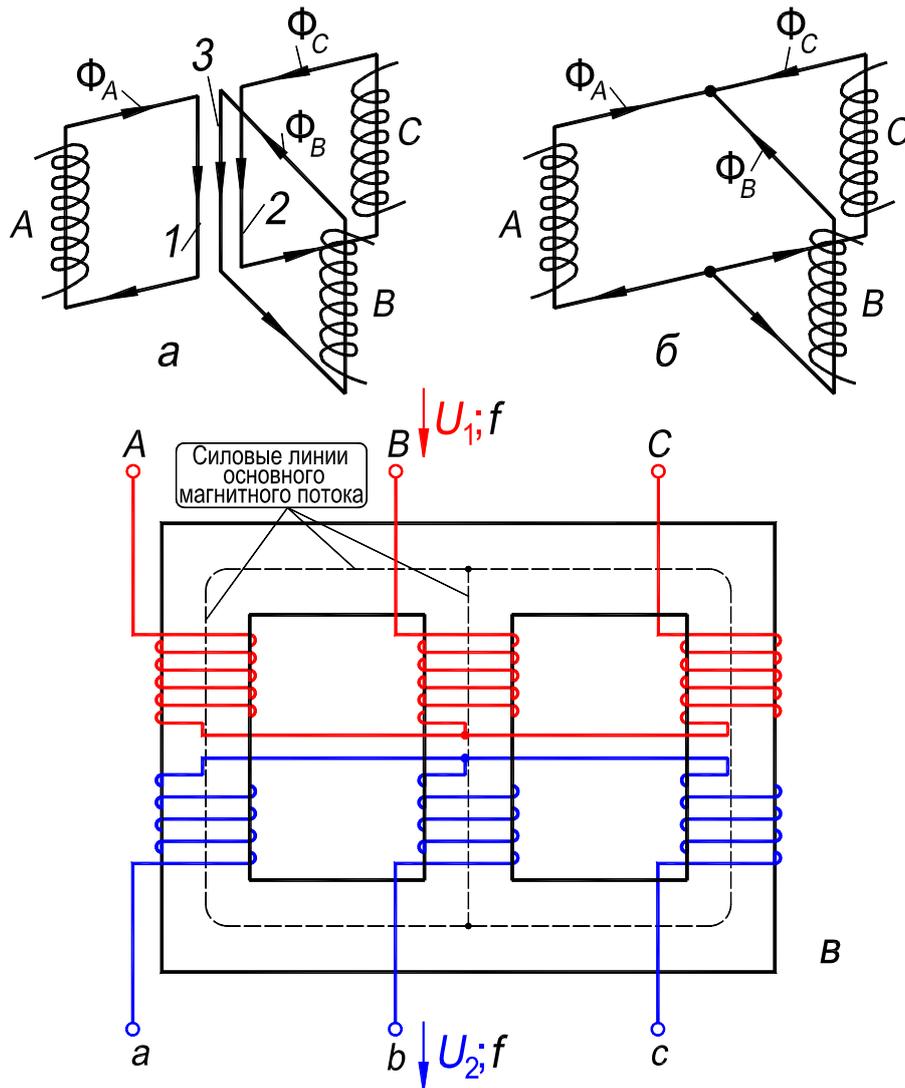


Рис. 9.3. Устройство трехфазного трёхстержневого трансформатора

Трехфазный броневой трансформатор (рис. 9.4) можно рассматривать как три однофазных броневых трансформатора (рис. 9.1,б), поставленных рядом или друг над другом. При этом средняя фаза имеет обратное включение относительно крайних, чтобы в соприкасающихся горизонтальных участках магнитной системы потоки фаз складывались, а не вычитались. Так как $(\Phi_A - \Phi_B)/(\Phi_A + \Phi_B) = \sqrt{3}$, то при таком включении средней фазы поток в соприкасающихся частях магнитной системы уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, и во столько же можно уменьшить сечение этих частей сердечника. При этом потоки во всех частях ярма равны половине потока стержней.

В броневых трансформаторах коэффициент электромагнитной связи между обмотками несколько больше, чем в стержневых, и поэтому броневые трансформаторы в электромагнитном отношении несколько совершеннее, но по конструкции броневые трансформаторы сложнее.

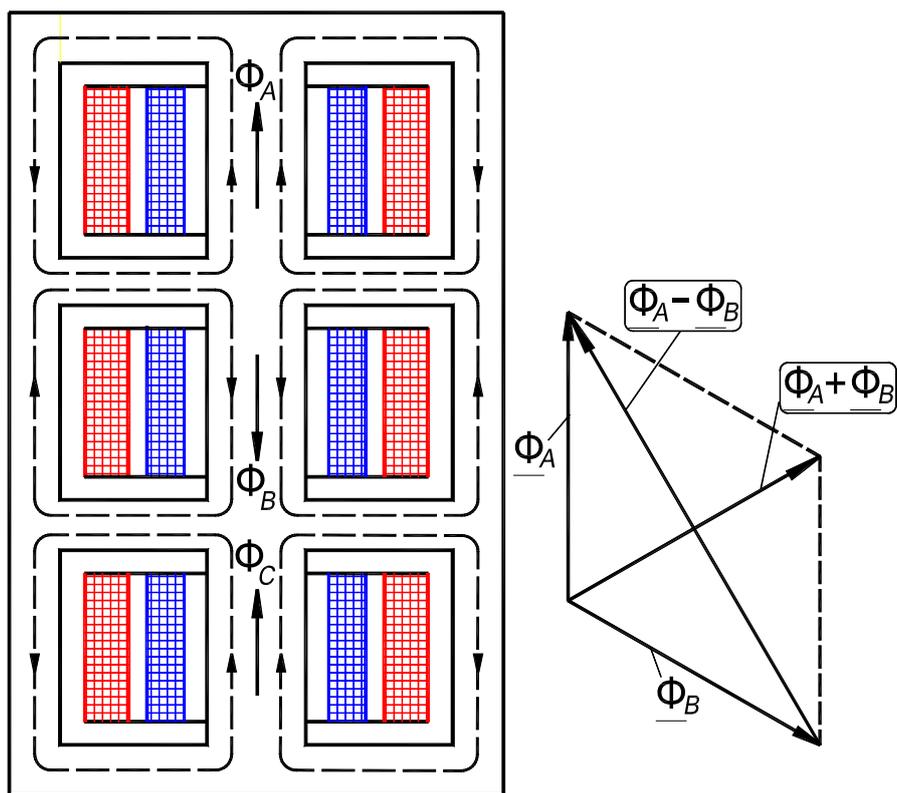


Рис. 9.4. Устройство трёхфазного броневых трансформатора

С увеличением мощности трансформаторов возрастают их размеры и трудности транспортировки по железным дорогам. Поэтому в трансформаторах мощностью $S_{\text{ном}} > 80 - 100 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ на фазу и напряжением 220 – 500 кВ применяют бронестержневую или многостержневую конструкцию. Такие конструкции получаются, если у трансформаторов вида показанных на рис. 9.1,а и 9.3,в добавить слева и справа по одному боковому ярму (см. рис. 9.5). При этом магнитный поток в горизонтальных ярмах разветвляется и в случае рис. 9.5,а уменьшается в два раза, а в случае рис. 9.5,б в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с рис. 9.1,а и 9.3,в. Во столько же раз можно уменьшить сечение ярм, в результате чего высота сердечников уменьшается, что является существенным при транспортировке трансформатора от завода-изготовителя к потребителю (см. рис. 10.24, 10.25, с. 213,сл.).

Преимущественно применяются трехфазные трансформаторы с общей магнитной системой (рис. 9.3). Трехфазные группы однофазных трансформаторов (рис. 9.2) используются, во-первых, при весьма больших мощностях ($S_{\text{ном}} > 300 \text{ МВ}\cdot\text{А}$), когда транспортировка трехфазного трансформатора становится весьма затруднительной или невозможной, и, во-вторых, иногда при $S_{\text{ном}} > 30 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, когда применение однофазных трансформаторов позволяет уменьшить резервную мощность на случай аварии и ремонта.

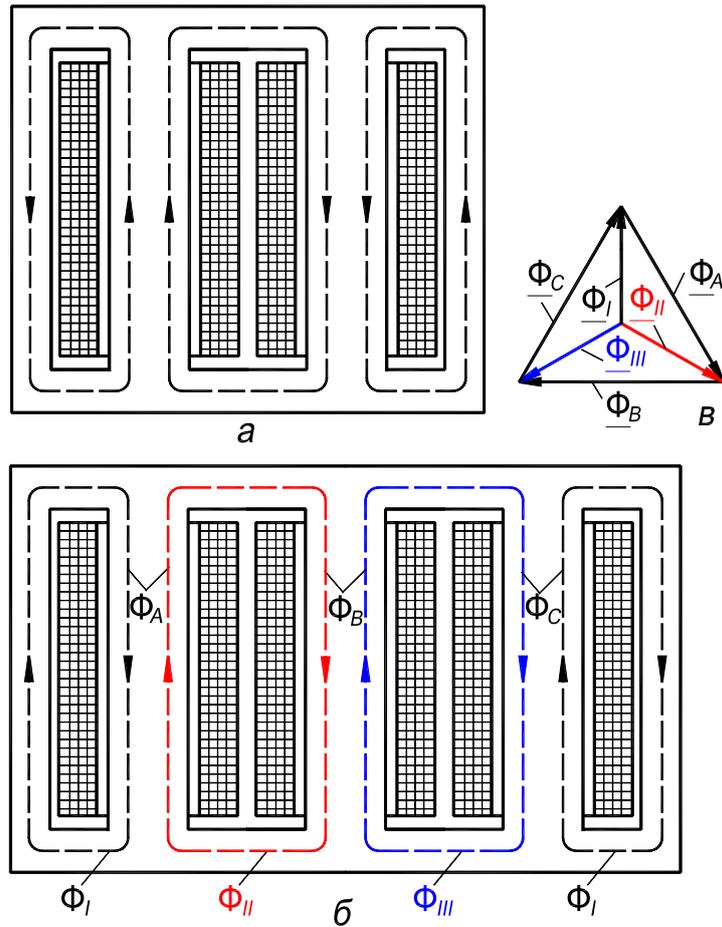


Рис. 9.5. Устройство бронестержневых трансформаторов

Б. Виды магнитопроводов трансформаторов малой мощности

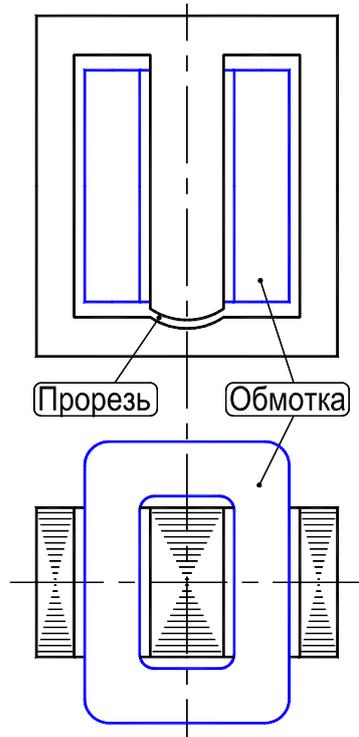


Рис. 9.6. Магнитопровод и обмотка трансформатора небольшой мощности

В однофазных трансформаторах весьма малой мощности (до 50 – 200 В·А) применяется броневая конструкция магнитопроводов. Обычно штамповка листов магнитопровода производится по одному из вариантов, представленных на рис. 9.6 и 9.7.

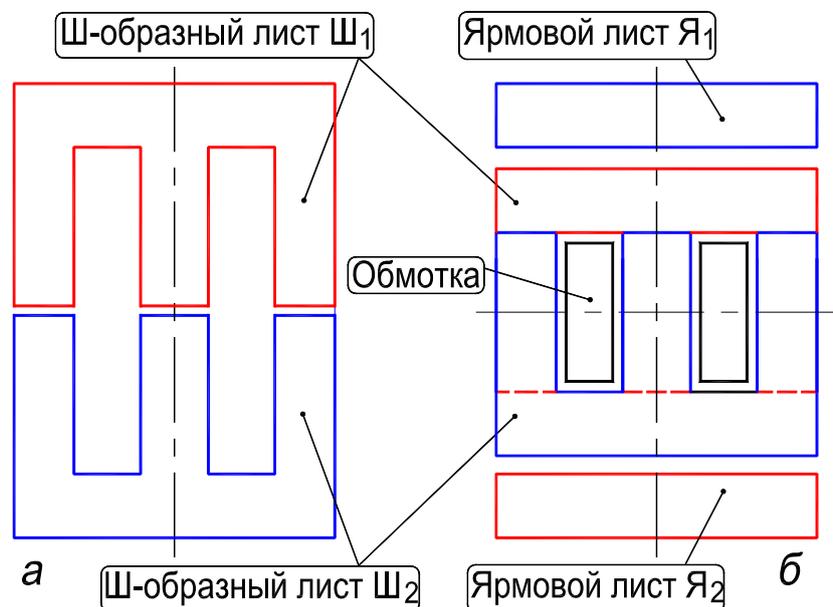


Рис. 9.7. Форма пластин (а) и шихтовка магнитопровода (б) трансформатора небольшой мощности

В первом случае пластина вырубается одним ударом штампа и имеет прорезь. При сборке стержень временно отгибается и вводится внутрь катушки обмотки, стержень последующего листа вводится внутрь катушки с противоположного, торцового ее конца и т. д. Во втором случае одновременно вырубаются Ш-образные листы $Ш_1$ и $Ш_2$ и ярмовые листы $Я_1$ и $Я_2$ (рис. 9.7, а), из которых составляются два слоя листов сердечника (рис. 9.7, б). При этом листы вводятся внутрь катушки также поочередно с одного и второго ее конца.

Большое распространение получили также микротрансформаторы с ленточными магнитопроводами кольцеобразной формы. Эти трансформаторы имеют весьма технологичную конструкцию. Их магнитопровод образуется из навитой в виде спирали стальной ленты, обмотки обматываются вокруг магнитопровода на специальном станке.

В. Магнитопровод трёхфазного трёхстержневого трансформатора

На рис. 9.8 представлен остов трёхфазного трансформатора. Стержни 3 и ярма 4 вместе с прессующими деталями (1 – балки, 5 и 10 – шпильки) образуют остов трансформатора.

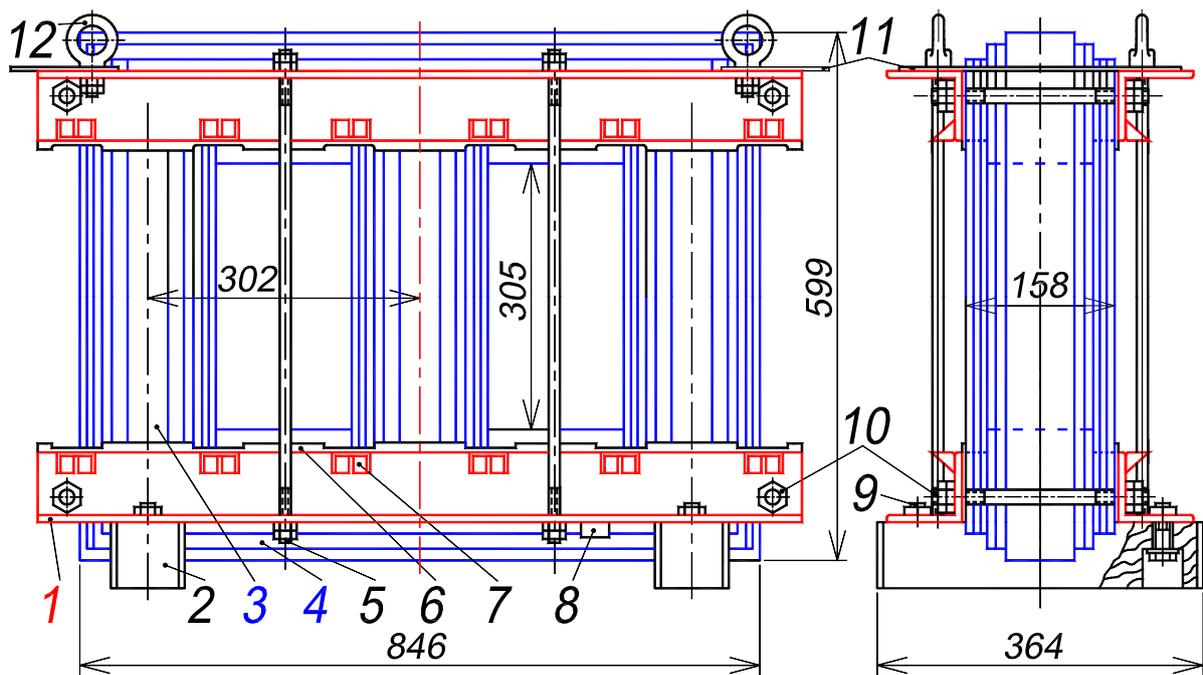


Рис. 9.8. Остов трёхфазного трансформатора, мощность 180 кВ·А, напряжение 6–10 кВ:

1 – яровая балка (угольник сечением 80x80x8 мм); 2 – деревянный опорный брусок; 3 – стержень магнитопровода; 4 – ярмо; 5 – вертикальная стяжная шпилька М12; 6 – пластина из электрокартона толщиной 1,5 мм; 7 – штампованный угольник из стали толщиной 3 мм, приварен к поз. 1; 8 – заземляющая лента; 9 – болт М12; 10 – шпилька М12, стягивающая ярмо; 11 – стальная пластина толщиной 4 мм, прикреплённая рым-болтами к яровым балкам (привинчивается к уголку на стенке бака); 12 – рым-болт

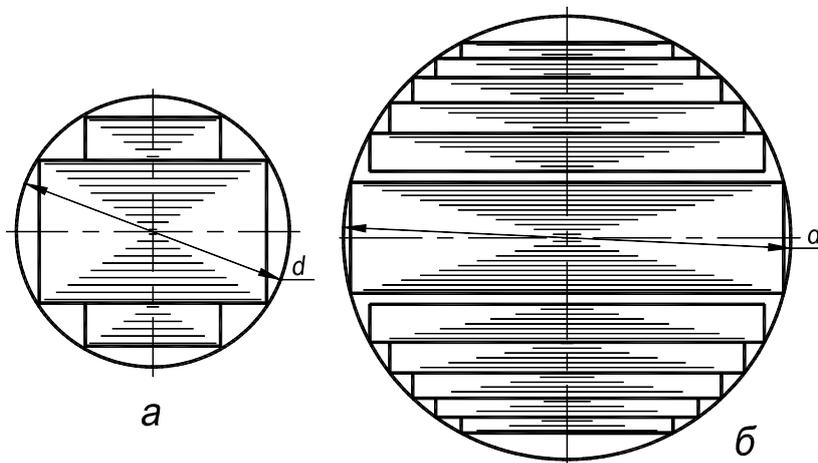


Рис. 9.9. Формы сечений стержней трансформаторов

У броневых магнитопроводов (см. рис. 9.4) сечения стержней прямоугольные, а стержневые и бронестержневые магнитопроводы (см. рис. 9.3 и 9.5) имеют в сечении вид многоугольника, вписанного в окружность (рис. 9.9; 10.21, с. 211). В последнем случае обмотки имеют вид круговых цилиндров, а вследствие ступенчатого сечения стержня коэффициент заполнения сталью полости обмотки получается большим (см. рис. 1.2, с. 136). Такая конструкция с точки зрения расхода

материалов, уменьшения габаритов и стоимости изготовления трансформатора, а также механической прочности обмоток является наиболее рациональной. Число ступеней сердечника увеличивается с увеличением мощности. В мощных трансформаторах в сечении сердечника предусматриваются каналы для его охлаждения циркулирующим трансформаторным маслом (рис. 9.9,б).

Для упрощения технологии изготовления ярм их сечение берется прямоугольным или с небольшим числом ступеней (рис. 9.10). Форма сечения ярма и его сочленение со стержнем выбираются с учетом обеспечения равномерного распределения магнитного потока в сечении сердечника. Площади сечения ярм выбираются, с целью уменьшения магнитных потерь, так, чтобы индукция в них была на 10 – 15 % меньше, чем в стержнях.

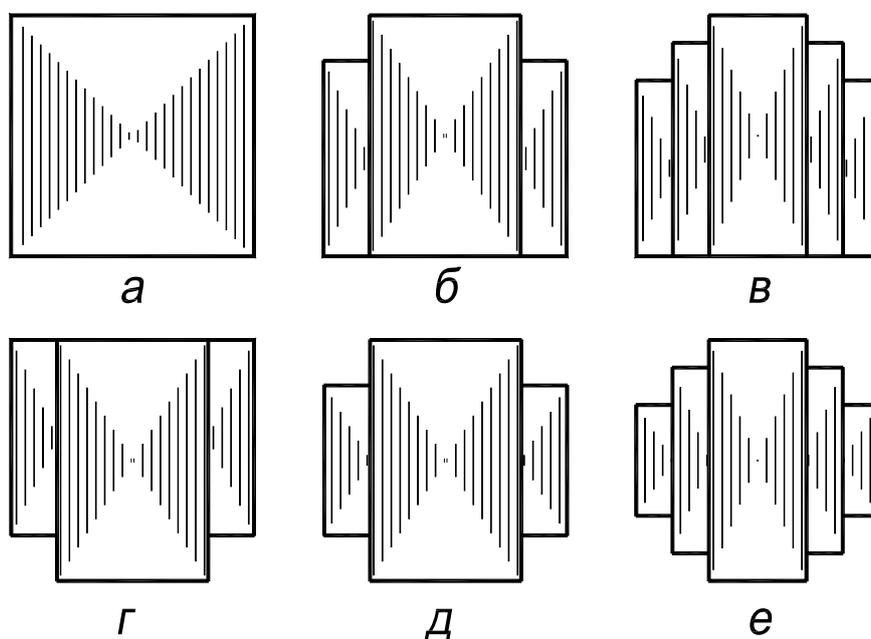


Рис. 9.10. Формы сечения ярм трансформаторов

Стяжка стержней трансформаторов мощностью менее 1 000 кВ·А (на один стержень) производится при помощи деревянных или пластмассовых планок и стержней, которые заполняют пространство между стержнем и изоляционным цилиндром, на котором укреплена ближайшая к стержню обмотка низкого напряжения (рис. 9.11).

В трансформаторах бóльшей мощности стяжка стержней ранее осуществлялась стальными шпильками, изолированными от стержня трубками из бакелизированной бумаги (рис. 9.12). Для прессовки ярм также использовались шпильки, стягивающие деревянные или стальные нажимные балки (рис. 10.18 и 10.20, с. 210 и 211).

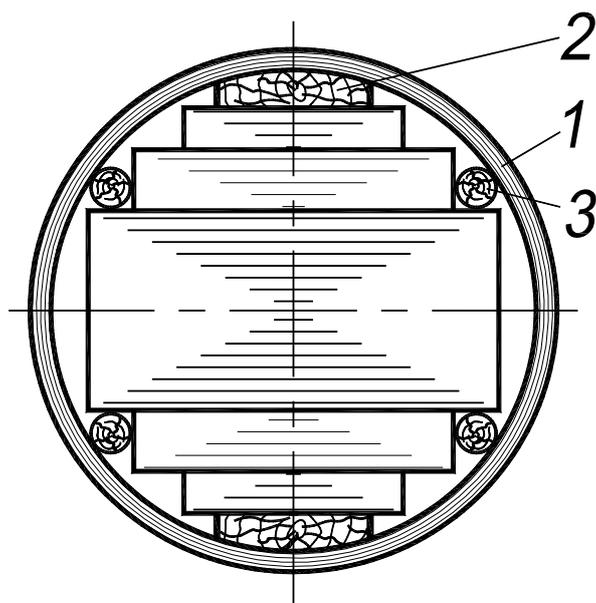


Рис. 9.11. Стяжка стержней трансформаторов средней мощности:
 1 – изоляционный цилиндр; 2 – деревянная планка; 3 – деревянный стержень

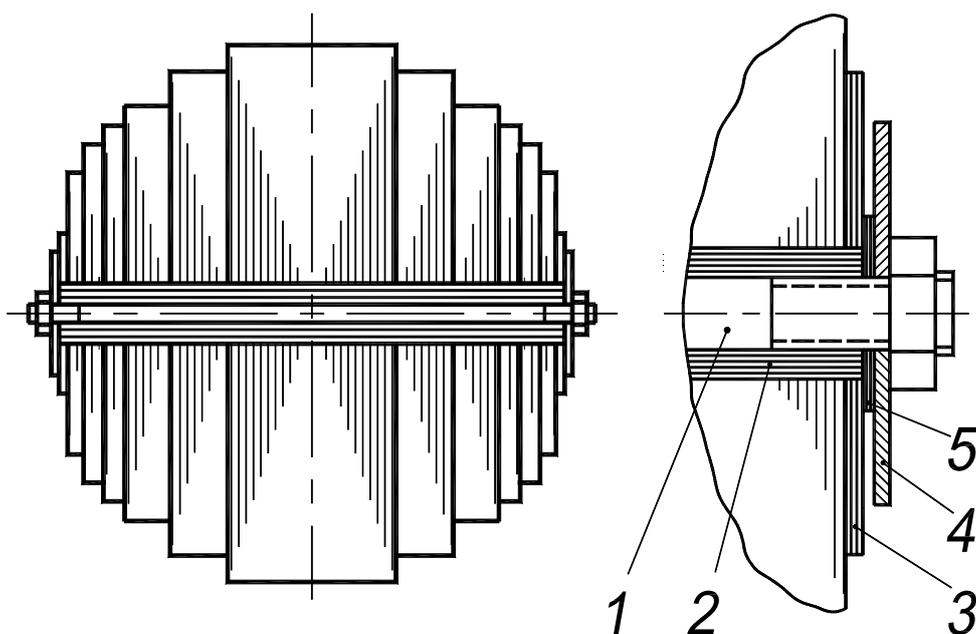


Рис. 9.12. Стяжка стержней трансформаторов большой мощности:
 1 – стальная шпилька; 2 – трубка изоляционная;
 3 и 5 – шайбы из электроизоляционного картона; 4 – стальная шайба

В настоящее время для стяжки стержней, а во многих случаях и ярм, широко применяется бандажировка стеклолентой, пропитанной эпоксидными терморезистивными компаундами (бандажи на стержнях видны на рис. 10.24, с. 213). При использовании бандажей отпадает необходимость в применении стягивающих шпилек и в штамповке отверстий в листах магнитопровода, что приводит к уменьшению его магнитного сопротивления

и добавочных потерь при холостом ходе. Магнитопровод вместе с ярмовыми балками и другими деталями, предназначенными для прессовки магнитопровода и крепления на его стержнях обмоток, образует *остов трансформатора* (см. рис. 9.8 и 10.24, с. 213).

Г. Способы уменьшения магнитных потерь в стали. С целью уменьшения магнитных потерь мощности на вихревые токи и гистерезис, возникающие при перемагничивании стали переменным пульсирующим магнитном полем, магнитопроводы силовых трансформаторов собирают из пластин электротехнической холоднокатаной анизотропной тонколистовой стали марок 3411, 3412, 3413, ..., 3405, 3406 (при частоте 50 Гц толщина пластин стали 0,5, 0,35 или 0,28 мм.). Пластины электротехнической стали изолированы друг от друга плёнкой специального жаростойкого покрытия или плёнкой масляного лака. Жаростойкое покрытие обычно осуществляется непосредственно на металлургическом заводе, изготавлиющем электротехническую сталь; двустороннее покрытие плёнкой лака выполняется на трансформаторном заводе после резки (штамповки) пластин (рис. 10.12, с. 207). В процессе плавки сталь легируется кремнием, что повышает её удельное электрическое сопротивление и уменьшает вихревые токи, а, следовательно, и потери на вихревые токи.

Индукции в стержнях трансформаторов мощностью 5 кВт и выше находятся в пределах 1,2 – 1,45 Тл для горячекатаных сталей и 1,5 – 1,7 Тл для холоднокатаных сталей в случае масляных трансформаторов и соответственно 1,0 – 1,2 Тл и 1,1 – 1,5 Тл в случае сухих трансформаторов.

На рис. 9.13,*а* показан стержень магнитопровода, выполненный из сплошного куска электротехнической стали. Переменный магнитный поток Φ_{\sim} замыкается вдоль стержня и в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит в сечениях стержня, перпендикулярным силовым магнитным линиям, ЭДС e_v , вызывающую протекание тока i_v , называемого вихревым. Вихревой ток, согласно правилу Э.Х. Ленца, направлен таким образом, что созданное им магнитное поле ослабляет результирующее поле, то есть оказывает размагничивающее действие. Электрическое сопротивление куска стали сравнительно мало, поскольку площадь сечения велика. Следовательно, в сплошном магнитопроводе вихревые токи и потери мощности значительны. Их протекание ведёт к существенному нагреву магнитопровода.

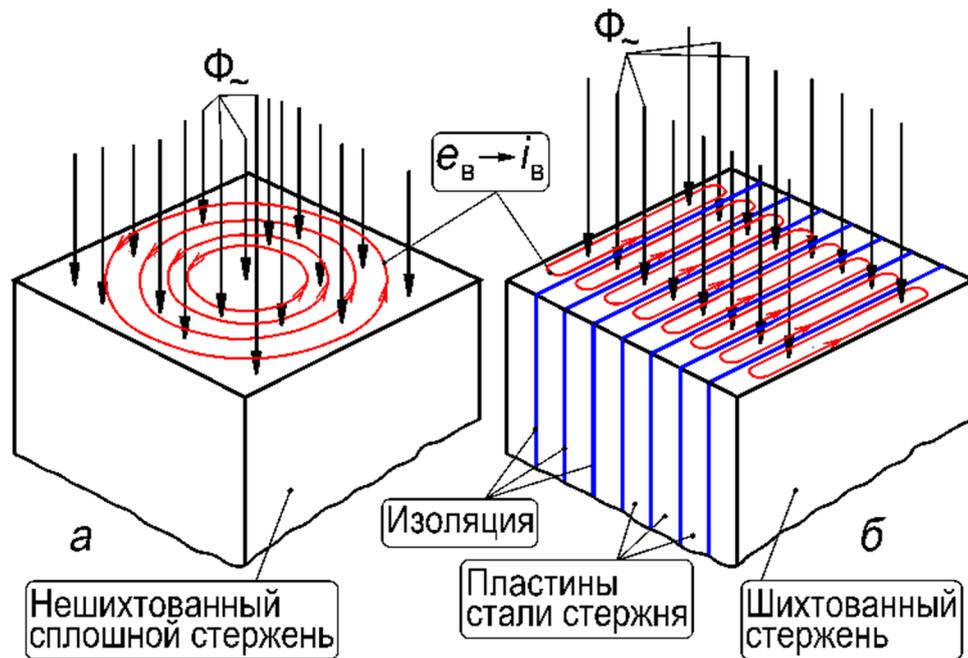


Рис. 9.13. Вихревые токи в магнитопроводе трансформатора:

a – сплошном, *б* – шихтованном

На рис. 9.13,*б* показан стержень магнитопровода, выполненный из тонких пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга. В этом случае вихревой ток i_v значительно уменьшается, так как замыкается в пределах тонких пластин электротехнической стали, легированной кремнием, то есть по пути с увеличенным электрическим сопротивлением. Это позволяет существенно снизить потери на вихревые токи и повысить КПД трансформатора. Также существенно уменьшается размагничивающее действие вихревого тока.

По способу сочленения стержней с ярами различаются трансформаторы со стыковыми (рис. 9.14) и шихтованными (рис. 9.15) магнитопроводами. В первом случае стержни и яра собираются отдельно и крепятся друг с другом с помощью стяжных шпилек, а в места стыков во избежание замыкания пластин и возникновения значительных вихревых токов ставятся изоляционные прокладки (см. рис. 9.17). Во втором случае стержни и яра собираются вместе как цельная конструкция, причем пластины стержней и ярм отдельных слоев собираются в переплет. Для установки обмоток пластины верхнего яра вынимаются, а затем зашихтовываются (см. рис. 10.16, 10.17, с. 209).

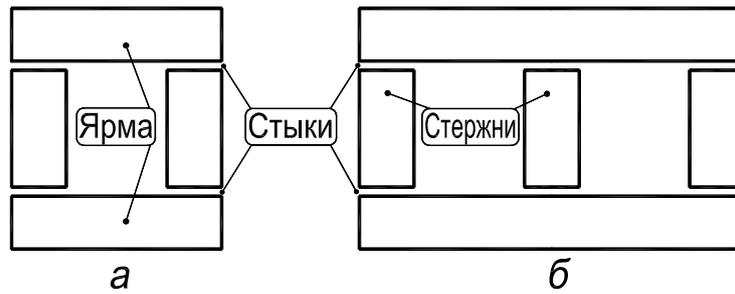


Рис. 9.14. Схемы стыковых трансформаторов: а – однофазных; б – трехфазных

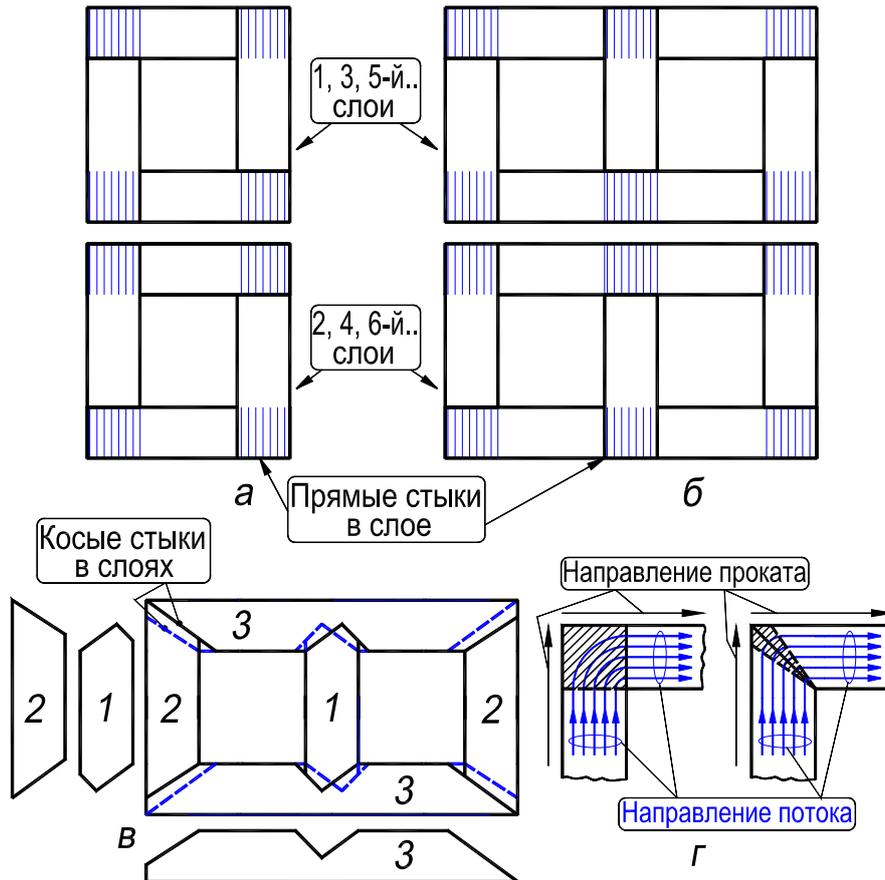


Рис. 9.15. Укладка листов стали в слоях шихтованных магнитопроводов трансформаторов: а – однофазных; б, в – трехфазных; г – иллюстрация уменьшения зоны несовпадения потока с направлением проката при косом стыке

Преимуществом стыковой конструкции является сравнительная простота сборки и демонтажа магнитной системы и обмоток. В то же время этой конструкции свойственны существенные недостатки, связанные с возможностью возникновения в местах стыков значительных вихревых токов из-за взаимного перекрытия пластин стержней и ярм (рис. 9.16). Вихревые токи создают дополнительные потери и могут вызвать значительный нагрев магнитной системы в местах стыков. Во избежание этого между стержнями и ярмами помещают прочные тонкие изоляционные прокладки из нагревостойкого материала, которые, однако, заметно увеличивают намагничивающий ток трансформатора и полностью

не устраняют возможности нежелательного замыкания листов заусенцами, поскольку в местах стыка торцы листов стержней и ярм находятся под значительным давлением (рис. 9.17). Поэтому стыковые магнитопроводы применяются редко.

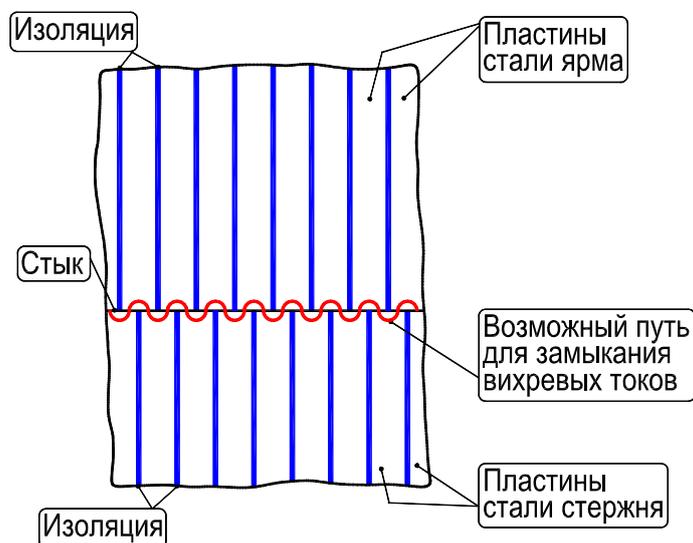


Рис. 9.16. Вихревые токи в стыковом соединении стержней и ярм

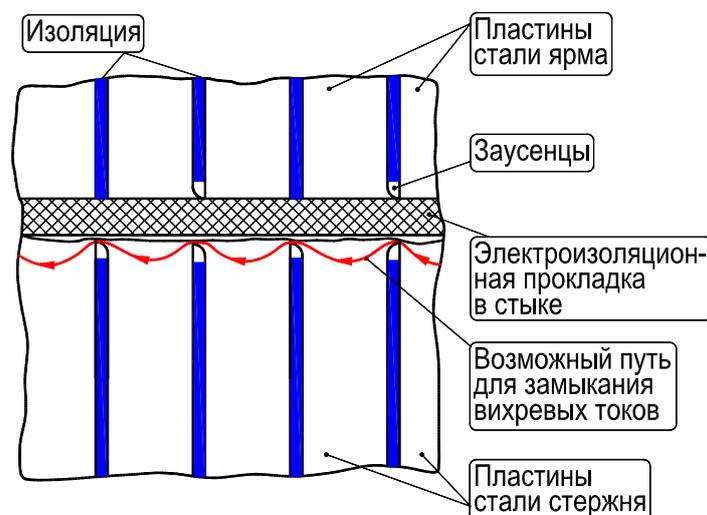


Рис. 9.17. Вихревые токи в стыковом соединении стержней и ярм, обусловленные наличием заусенцев

В шихтованных конструкциях в местах сочленений стержней и ярм (рис. 9.8) также возникают дополнительное падение магнитного напряжения и некоторое увеличение магнитных потерь, однако в шихтованных конструкциях эти явления выражены значительно слабее, чем в стыковых.

При применении холоднокатаной стали, у которой удельные потери и магнитная проницаемость имеют лучшие показатели при протекании магнитного потока вдоль направления прокатки листов (см. разд. В.11, с. 110, сл.),

возникают увеличение магнитных потерь и дополнительное повышение падения магнитного напряжения в местах поворота на 90° индукционных линий при их переходе из стержней в ярма в зоне *прямых* стыков в слое. Эти участки магнитопровода на рис. 9.15,а,б выделены штриховкой. Частично это явление удастся устранить путем применения *скошенных* стыков (скос $\sim 45^\circ$) (рис. 9.15,з) и особого способа шихтовки, показанного на рис. 9.15,в; в технологическом отношении такая конструкция магнитной системы сложнее.

Д. Обмотки трансформаторов. Конструкция обмоток трансформаторов должна удовлетворять условиям высокой электрической и механической прочности, а также нагревостойкости. Кроме того, технология изготовления обмоток должна быть по возможности простой и недорогой, а электрические потери в обмотках должны находиться в установленных пределах. Конструкции обмоток в зависимости от номинального тока и номинального напряжения обмотки весьма разнообразны (рис. 10.14, 10.15 и 10.23, с. 208,сл.).

Обмотки изготавливаются из медного, а также из алюминиевого провода. Плотность тока в медных обмотках масляных трансформаторов находится в пределах $2 - 4,5 \text{ А/мм}^2$, а в сухих трансформаторах $1,2 - 3,0 \text{ А/мм}^2$. Верхние пределы относятся к более мощным трансформаторам. В алюминиевых обмотках плотность тока на $40 - 45 \%$ меньше. Для изготовления обмоток применяются круглые провода сечением $0,02 - 10 \text{ мм}^2$ (рис. 10.14 и 10.15) и прямоугольные сечением $6 - 60 \text{ мм}^2$ (рис. 10.22 и 10.23, с. 212). Во многих случаях витки и катушки обмоток наматываются из определенного количества параллельных проводников.

Обмотки масляных трансформаторов изготавливаются из проводов с эмалевой и хлопчатобумажной изоляцией (круглые сечения) и из проводов, изолированных двумя слоями кабельной бумаги и хлопчатобумажной пряжей (прямоугольные сечения). В сухих силовых трансформаторах применяются провода с теплостойкой изоляцией из стекловолокна (разд. В.11, В и Г, с. 113,сл.).

Части трансформатора, обеспечивающие процесс преобразования энергии, – магнитопровод и обмотки, называются его активными частями (рис. 10.20, с. 211). Эффективное преобразование электрической энергии удастся получить только в конструкциях, в которых обмотки охватываются замкнутыми магнитопроводами из ферромагнитного материала с высокой

магнитной проницаемостью μ , в сотни и тысячи раз превышающей магнитную постоянную μ_0 (см. рис. 1.2, с. 136). Для получения высокой магнитной проницаемости магнитопровод не должен быть чрезмерно насыщен и индукция в нем при максимальном магнитном потоке не должна превышать 1,4 – 1,7 Тл. Снижение потребляемой реактивной мощности достигается за счет уменьшения магнитных полей рассеяния, сцепленных только с первичной или только со вторичной обмоткой (см. рис. 1.2). Эти поля уменьшаются с уменьшением промежутков между первичной и вторичной обмотками, и поэтому катушки первичной и вторичной обмоток каждой из фаз располагают на одном и том же участке магнитопровода, называемом стержнем (см. рис. 1.2). При этом обмотки либо располагаются концентрически (рис. 9.18,*а*), либо разбиваются на отдельные диски и размещаются на стержне в чередующемся порядке (рис. 9.18,*б*). В последнем случае обмотка называется дисковой чередующейся.

Из большого числа разновидностей концентрических обмоток наиболее простой является цилиндрическая обмотка (рис. 9.19). Также применяются винтовые и непрерывные обмотки [11].

Для увеличения эффективности при преобразовании энергии должны быть приняты меры для уменьшения потерь энергии, выделяющихся в трансформаторе в виде тепла. В первую очередь должны быть выбраны достаточно малыми активные сопротивления обмоток, т. е. возможно большие сечения витков обмоток, возможно меньшие длины витков и возможно меньшие электрические удельные сопротивления проводов обмоток. Именно поэтому провода обмоток изготавливают из меди, обладающей наименьшим удельным электрическим сопротивлением, и реже – из алюминия, удельное сопротивление которого примерно в 1,6 раза больше, чем у меди (разд. В.11, В, с. 113, сл.).

Кроме активных элементов – обмоток и магнитопровода – конструкция трансформатора включает еще ряд важных частей, которые называются конструктивными частями и предназначены для создания электрической изоляции между обмотками, фиксации активных частей в пространстве, охлаждения активных частей, сопряжения его обмоток с электрическими сетями и других вспомогательных функций. К конструктивным частям относятся, в частности, ярмовые балки (см. рис. 9.8, поз. 1) и другие прессующие детали магнитопровода.

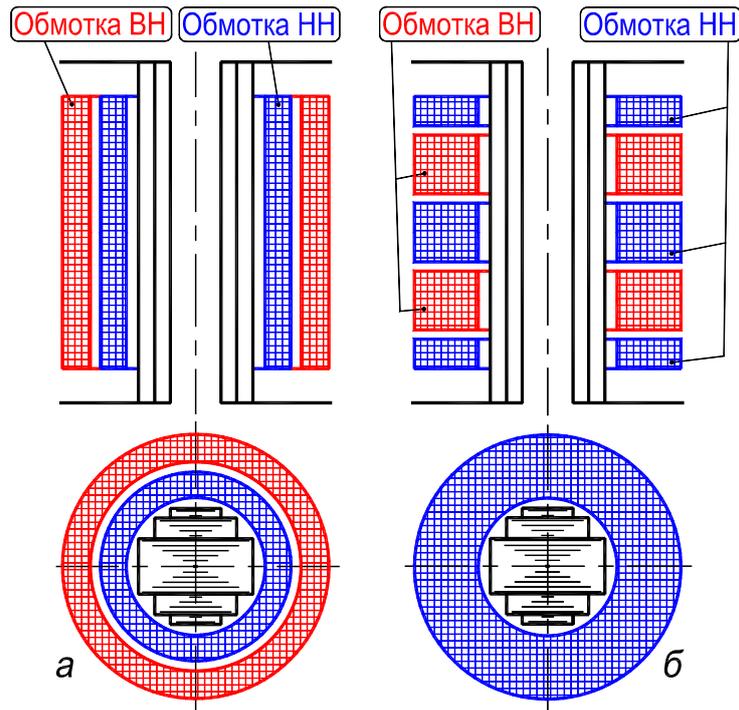


Рис. 9.18. Концентрические (а) и дисковые чередующееся (б) обмотки

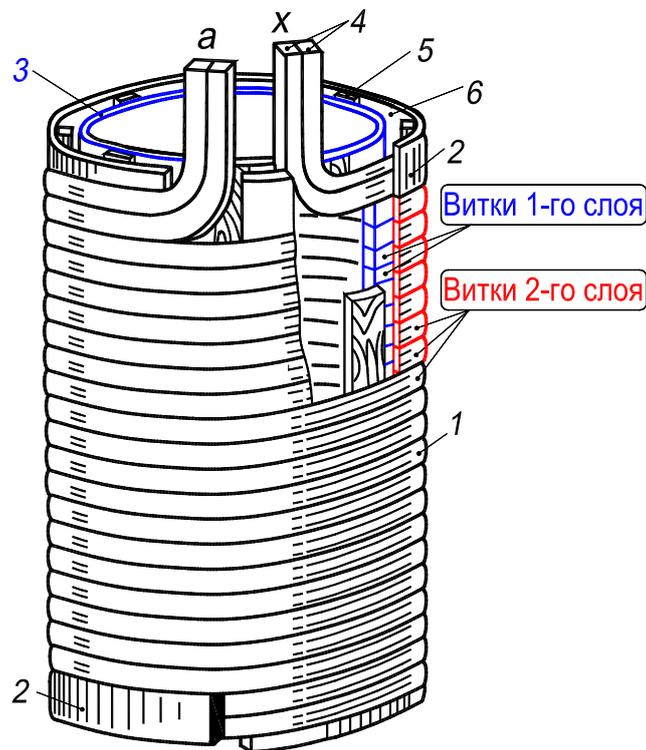


Рис. 9.19. Цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольного провода:
 1 – витки из прямоугольного провода, 2 – разрезные выравнивающие кольца, 3 – бумажно-бакелитовый цилиндр, 4 – конец первого слоя обмотки, 5 – вертикальные рейки между слоями обмотки, 6 – вертикальный канал между слоями обмотки для масла

Е. Изоляция силовых трансформаторов. Электрическая прочность – важнейшая характеристика трансформатора – определяет его надежность в эксплуатации и обеспечивается соответствующим устройством изоляции обмоток, отводов и других частей трансформатора, находящихся под напряжением, от заземленных элементов конструкции.

Заземленными частями конструкции являются остов (магнитопровод) и бак, в котором размещается активная часть трансформатора (поз. 7 на рис. 10.1, с. 190; поз. 8 на рис. 9.8).

Трансформаторы в РФ изготавливают с обмотками стандартных классов напряжения — 3, 6, 10, 20, 35, 110 кВ и т. д. Для каждого класса установлены наибольшие рабочие напряжения (частоты 50 Гц), длительное воздействие которых не нарушает электрическую прочность изоляции. Например, для классов напряжения 6 кВ это 7,2 кВ, для 10 кВ – 12 кВ, для 110 кВ – 126 кВ и т. д.

Напряжения, воздействующие на изоляцию. В эксплуатации на трансформатор длительно воздействует номинальное рабочее напряжение, на которое он рассчитан. Однако под влиянием различных причин напряжение на короткое время может значительно превысить даже наибольшее рабочее, что создает опасность для изоляции трансформатора и заставляет принимать меры для ее усиления и защиты.

Напряжения, которые превосходят наибольшее рабочее напряжение и опасны для изоляции, называют *перенапряжениями*. Различают *внутренние* и *внешние* перенапряжения. *Внутренние* перенапряжения возникают при включении или отключении трансформатора, аварийном отключении какого-либо элемента электрической сети (двигателей, генераторов, других трансформаторов), несимметричном режиме работы и т. д. *Внешние* перенапряжения возникают в результате электрических разрядов (молний). При прямом ударе молнии, например в опору линии электропередачи, возникает ток главного разряда, создающий напряжение, равное силе тока, умноженной на сопротивление, которое он встречает. Это напряжение во много раз превосходит внутренние перенапряжения.

Перенапряжение может появиться и при разряде молнии в землю вблизи линии электропередачи. Такие перенапряжения называют наведенными или индуцированными. Как при прямом ударе молнии, так и при разряде вблизи линии вдоль проводов в обе стороны от места разряда будет распространяться

волна высокого потенциала. Достигнув подстанции, волна вызовет на ее шинах значительные перенапряжения, которые будут воздействовать на трансформаторы. Эти внешние перенапряжения, несмотря на их ничтожную длительность, измеряемую микросекундами, являются наиболее опасными для изоляции трансформатора (разд. 17.5, с. 313, сл.).

Волны внешних перенапряжений воздействуют, в первую очередь, на изоляцию «входных» витков и катушек, при этом вся «входная» (начальная) часть обмотки оказывается под действием максимальных градиентов, т. е. максимальной разности потенциалов между соседними витками и катушками. Эти максимальные напряжения проникают в глубину обмотки и во много раз превышают напряжения, действующие на витки и катушки в нормальном режиме работы, поэтому атмосферные перенапряжения особенно опасны для межкатушечной и межвитковой изоляции обмоток.

Таким образом, требования к прочности изоляции трансформатора определяются номинальным напряжением сети, а также внешними и внутренними перенапряжениями.

Виды изоляции. В трансформаторе различают внутреннюю и внешнюю изоляции.

Внешней называют изоляцию снаружи бака трансформатора. Изолирующей средой для нее является воздух, а ее электрическая прочность зависит от атмосферных условий (давления, температуры, влажности и осадков). К внешней относят и воздушную изоляцию между вводами обмоток и наружными элементами конструкции (расширителем, патрубками, газовым реле), а также внешние поверхности вводов ВН и НН.

Внутренней называют изоляцию токопроводящих частей (обмоток, отводов, переключателей) между собой внутри бака и заземленными частями трансформатора. Изолирующей средой для нее является трансформаторное масло (или другой жидкий диэлектрик), твердый диэлектрик или их комбинация. К внутренней относят *главную* и *продольную* изоляцию обмоток.

Изоляцию обмотки от остова и других обмоток, гальванически не соединенных с ней, называют *главной*, а между частями одной и той же обмотки (соседними витками, катушками, слоями) — *продольной*. Твердую изоляцию выполняют в виде покрытий, изолирования и барьеров (см. рис. 9.20 и 10.1, с. 189, сл.).

Покрытием называют сравнительно тонкий (не более 1 – 3 мм) слой изоляции (бумага, лак), плотно охватывающий проводник, например витковая изоляция обмоточных проводов.

Изолирование отличается от покрытия большей толщиной слоя изоляции (до десятков миллиметров), улучшающей распределение электрического поля вокруг проводника, например бумажная (или лакотканевая) изоляция концов внутренней обмотки трансформатора.

Барьерами называют прямые или фасонные перегородки из электрокартона, бумажно-бакелитовых цилиндров или трубок, разделяющих масляные промежутки между токопроводящими и заземленными частями трансформатора. Изоляцию, состоящую из масляных промежутков, разделенных барьерами, называют *маслобарьерной*. Главную изоляцию обмоток выполняют, как правило, маслобарьерной, а продольную — чисто масляной (катушки между собой) или твердой (между соседними витками).

Факторы, влияющие на электрическую прочность изоляции. При эксплуатации изоляция трансформатора должна выдерживать, не разрушаясь, электрические и тепловые воздействия, механические усилия при коротком замыкании, а также быть стойкой к химическим процессам, которые могут возникнуть из-за содержания в ней посторонних примесей, влаги и воздействия повышенной температуры.

От качества сборки во многом зависит способность изоляции сохранять электрическую прочность. Любая небрежность при установке изоляционных деталей, монтаже обмоток или отделке активной части может стать причиной повреждения изоляции. Обрыв полоски бумаги, изолирующей обмоточный провод, может вызвать витковое замыкание, недостаточная толщина изоляции, наложенной на конец обмотки, – пробой главной изоляции, посторонние предметы (волокна ткани, куски бумаги, пыль, грязь, влага) – загрязнение масла. Посторонние примеси, воздух, влага создают «мостики», по которым возможен пробой изоляции, что резко снижает электрическую прочность масла.

Очень вредными являются воздушные включения в изоляции, возникающие после заполнения бака маслом в различных полостях и «лабиринтах» внутренней изоляции. Под воздействием электрического поля в местах

скопления воздуха возникают разряды, постепенно разрушающие органическую изоляцию. Необходимо удалить воздушные включения, для чего трансформатор перед испытаниями (или включением в работу) прогревают, и воздух, расширяясь, покидает изоляцию.

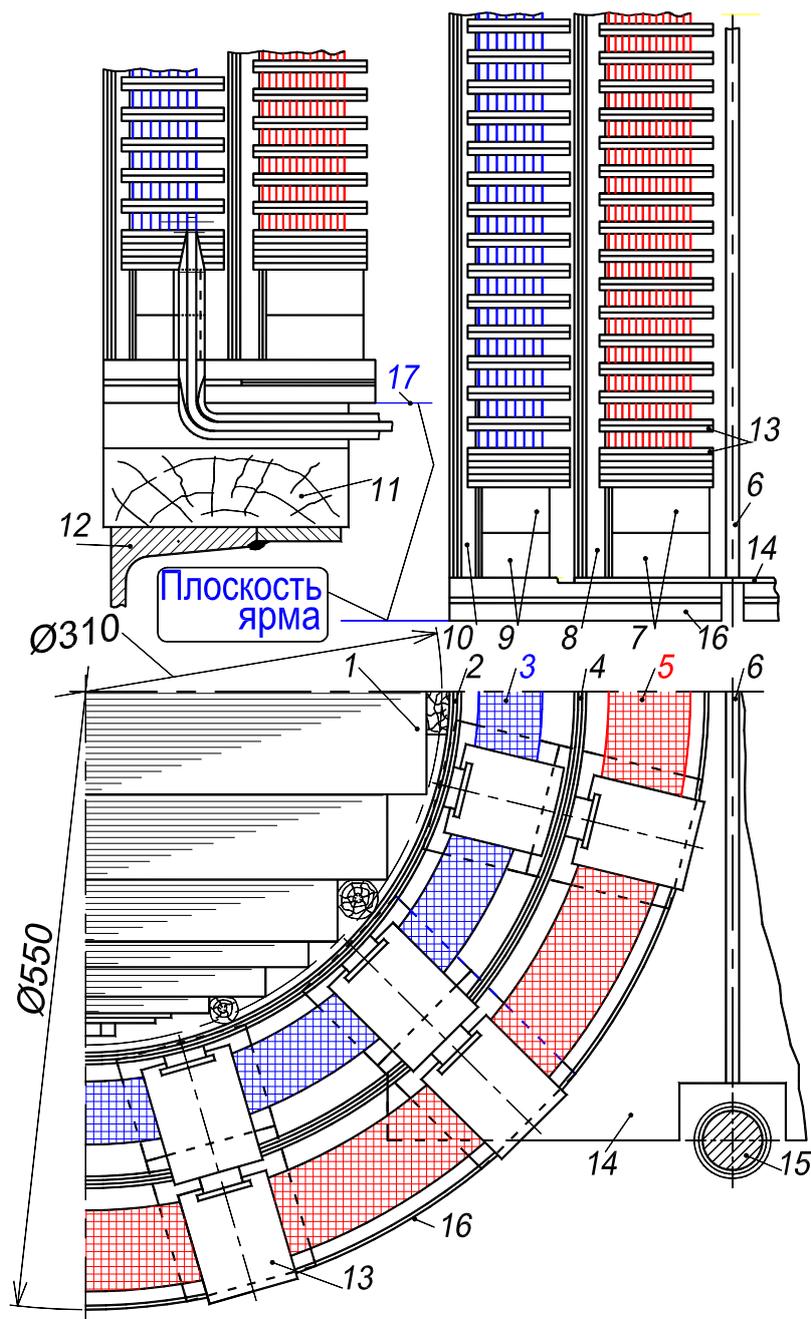
Конструкция изоляции и ее деталей. Конструкция *главной и продольной* изоляций обмоток различается в зависимости от мощности и класса напряжения трансформатора. Однако принципиальное строение изоляции и типовые элементы конструкции одинаковы для большинства трансформаторов со стержневой магнитной системой. Размещение обмоток и основных изоляционных деталей трехфазного трансформатора показано на рис. 9.20. Обмотки высшего 5 и низшего 3 напряжений намотаны на бумажно-бакелитовые цилиндры 4 и 2, которые кроме механической опоры выполняют роль барьеров, изолирующих обмотку НН от магнитной системы 1, а также обмотки ВН и НН друг от друга. Междофазная перегородка 6 изолирует обмотки ВН разных фаз между собой. Другим элементом главной изоляции служит концевая изоляция обмоток – это изоляционные детали и конструкции, изолирующие торцовые части обмоток от ярма, ярмовых балок и стальных прессующих колец (поз. 11, 16, 7 и 9).

Витковой изоляцией служит пропитанная маслом изоляция проводов марок ПЭЛБО, ПБ (круглые сечения проводов) и ПББО (прямоугольные сечения). Конструкция главной изоляции, предназначенной для изоляции обмоток друг от друга, от бака и от остова, также частично представлена на рис. 10.1.

10. Конструктивные части трансформатора

Рассмотрим устройство конструктивных частей силового масляного трехфазного трансформатора, общая компоновка которого представлена на рис. 10.1.

А. Бак с охладителями. Бак масляного трансформатора (поз. 4 на рис. 10.1), внутри которого устанавливают активную часть, представляет собой стальной резервуар, чаще всего овальной формы. К его дну приварена стальная стенка 4, охватываемая сверху рамой из угловой стали; к раме болтами прикреплена крышка (поз. 14 на рис. 10.1).



**Рис. 9.20. Обмотка трёхфазного трансформатора мощностью 1800 кВ·А,
на напряжение $35000 \pm 5\%$ /6300 В:**

- 1 – стержень магнитопровода; 2 – бумажно-бакелитовый цилиндр обмотки НН;
 3 – обмотка НН; 4 – бумажно-бакелитовый цилиндр обмотки ВН; 5 – обмотка ВН;
 6 – междуфазная перегородка; 7 – опорные кольца обмотки ВН; 8 – рейка обмотки ВН;
 9 – опорные кольца обмотки НН; 10 – рейка обмотки НН; 11 – уравнивательная планка
 (уравнивательная изоляция); 12 – ярмовая балка; 13 – прокладки обмотки ВН;
 14 – щиток, закрывающий ярмо; 15 – вертикальная стальная шпилька, изолированная
 бумажно-бакелитовой трубкой; 16 – ярмовая изоляция; 17 – плоскость ярма

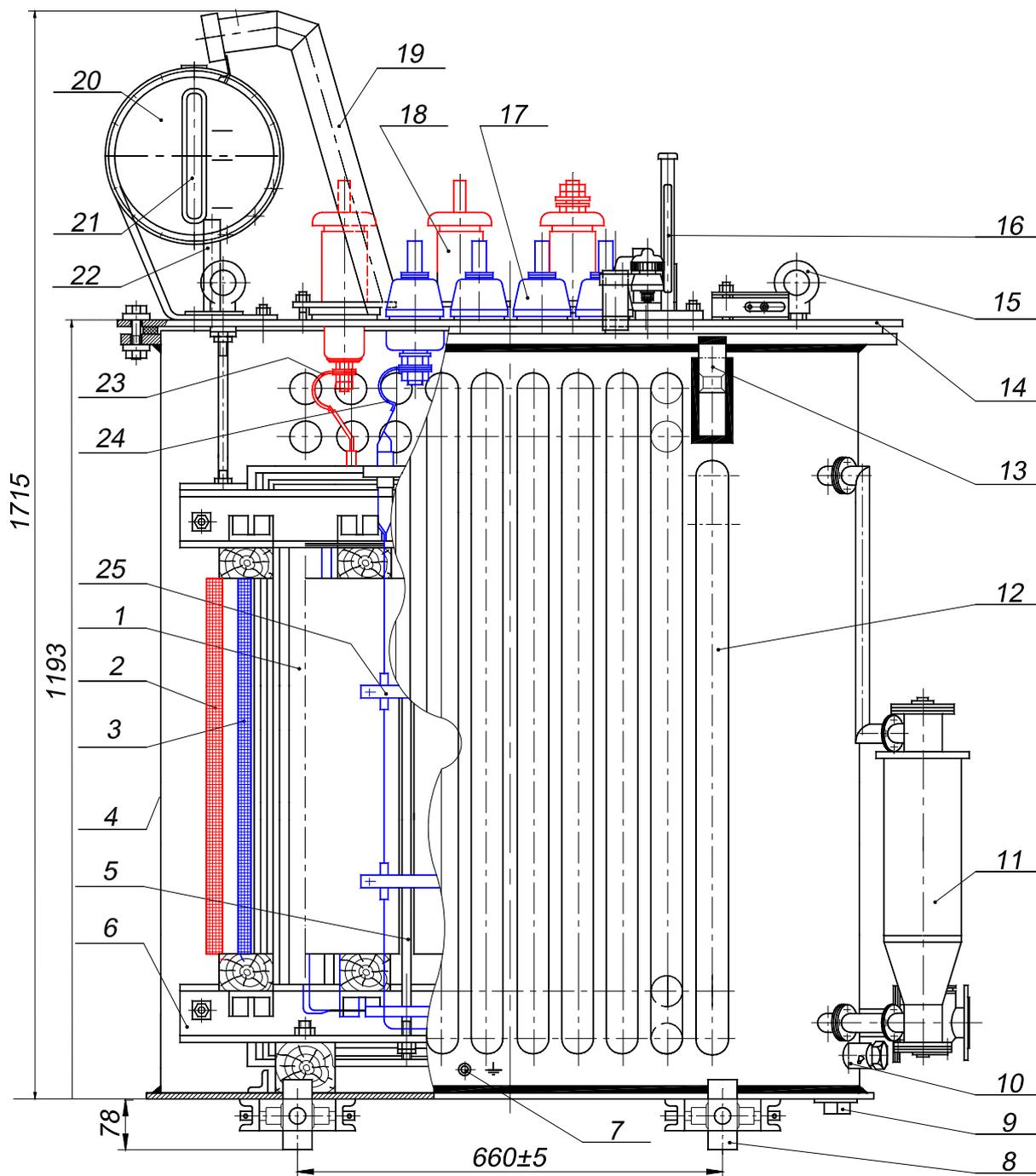


Рис. 10.1, лист 1. Трехфазный двухобмоточный трансформатор мощностью 320 кВ·А, на напряжение 6/0,525 кВ (вид спереди):

1 – стержень магнитопровода; 2 – обмотка ВН; 3 – обмотка НН; 4 – бак; 5 – вертикальная стяжная шпилька остова; 6 – ярмовая балка; 7 – болт заземления; 8 – каток; 9 – пробка для спуска остатков масла; 10 – пробка для снятия пробы масла; 11 – фильтр термосифонный; 12 – охлаждающая труба; 13 – крюк для подъема трансформатора; 14 – крышка бака; 15 – рым-болт для подъема выемной части; 16 – термометр; 17 – ввод НН 0,525 кВ; 18 – ввод ВН 6 кВ; 19 – предохранительная (выхлопная) труба; 20 – бак-расширитель; 21 – маслоуказатель; 22 – маслопровод расширителя; 23 – отвод обмотки ВН; 24 – отвод обмотки НН; 25 – система крепления отводов обмотки НН

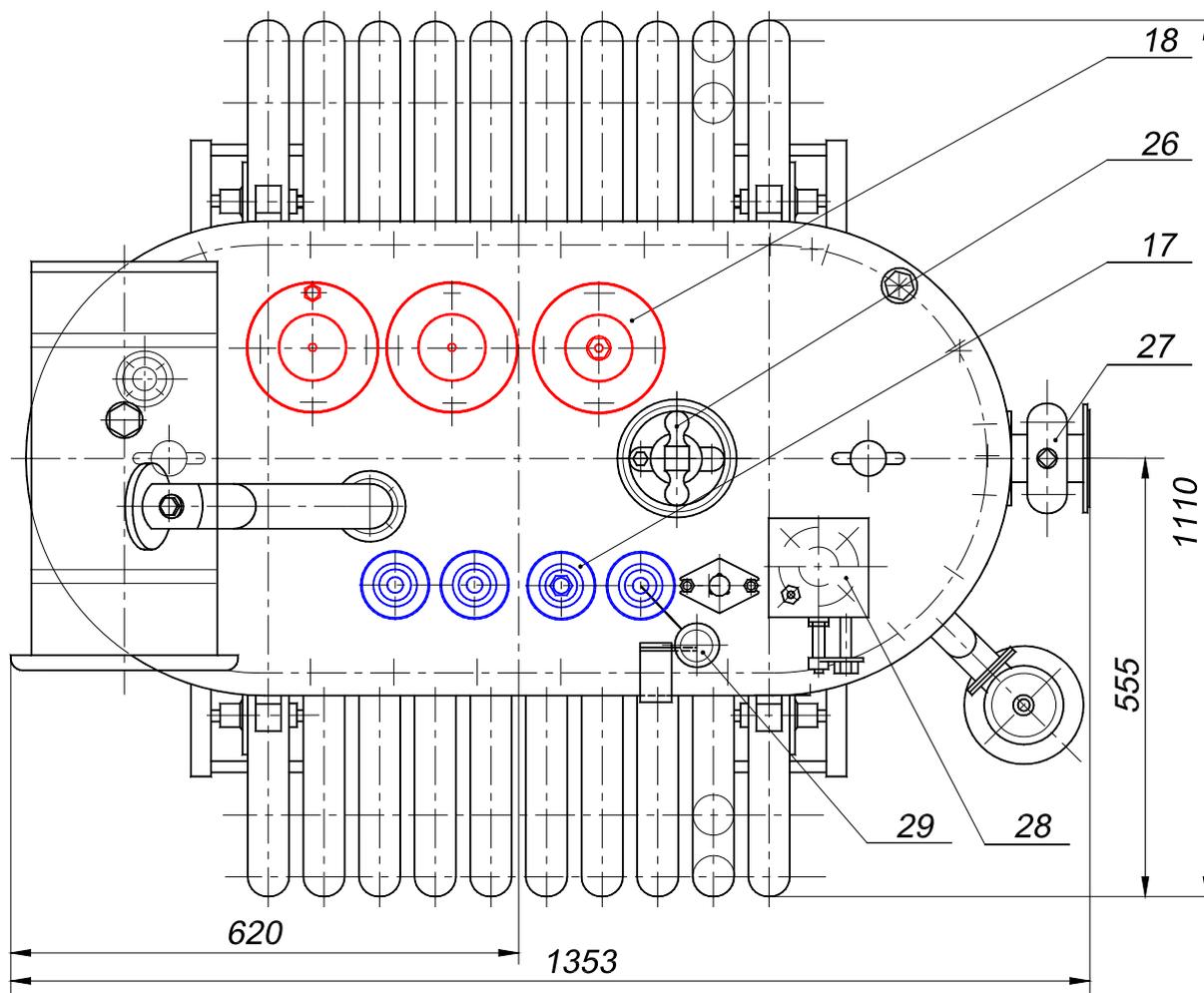


Рис. 10.1, лист 2. Трехфазный двухобмоточный трансформатор мощностью 320 кВ·А, на напряжение 6/0,525 кВ (вид сверху):

17 – ввод НН 0,525 кВ; 18 – ввод ВН 6 кВ; 26 – устройство переключения ответвлений обмотки ВН; 27 – кран для спуска и фильтрации масла; 28 – кран для заливки и фильтрации масла; 29 – пробивной предохранитель

Конструкция баков трансформаторов меняется с увеличением мощности. Для трансформаторов малой мощности (например, 25 кВ·А) не требуется значительных поверхностей для отвода относительно небольшого количества тепла, выделяющегося при их работе. Поэтому для таких трансформаторов делают баки с гладкими стенками (гладкие баки).

Однако, как показано в прил. ПЗ.1, с. 462, сл., при повышении номинальной мощности трансформатора потери в нем растут пропорционально кубу линейных размеров, а поверхности охлаждения – пропорционально их квадрату. Это приводит к необходимости по мере роста номинальной мощности увеличивать относительные размеры охлаждающих поверхностей обмоток, магнитной системы и бака. У трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А для увеличения теплоотдачи в стенки бака вваривают трубы круглого или овального сечения в один или несколько рядов (рис. 10.2,а). Во многих случаях вместо труб, вваренных в стенку, применяют трубчатые или пластинчатые (штампованные) охладители – радиаторы. Радиатор трансформатора – это навесной теплообменник, присоединяемый к патрубкам на стенках бака, через который происходит передача тепла от масла, заполняющего трансформатор, к воздуху (рис. 10.2,б). Направление потока нагретого трансформаторного масла показано стрелками. Вследствие разности плотностей горячего масла, поступающего из бака трансформатора в верхний коллектор радиатора, и холодного в нижней части радиатора оно непрерывно перемещается в радиаторе сверху вниз, отдавая на своем пути теплоту стенкам труб, а те, в свою очередь, окружающей среде – воздуху.

Бак трансформатора на рис. 10.1 содержит два ряда труб 12 круглого сечения (всего 40 труб).

У трансформаторов мощностью выше 6300 кВ·А периметр бака обычно оказывается недостаточным для размещения необходимого количества радиаторов. В этом случае прибегают к различным видам искусственного (принудительного) охлаждения. Наибольшее распространение получила система принудительного воздушного охлаждения. При этом способе охлаждения можно увеличить теплоотдачу радиаторов до 40 % по сравнению с их теплоотдачей при естественном охлаждении. Обдув радиаторов осуществляется вентиляторами с асинхронными двигателями [1]. Каждый радиатор обдувается одним или несколькими вентиляторами (рис. 10.3).

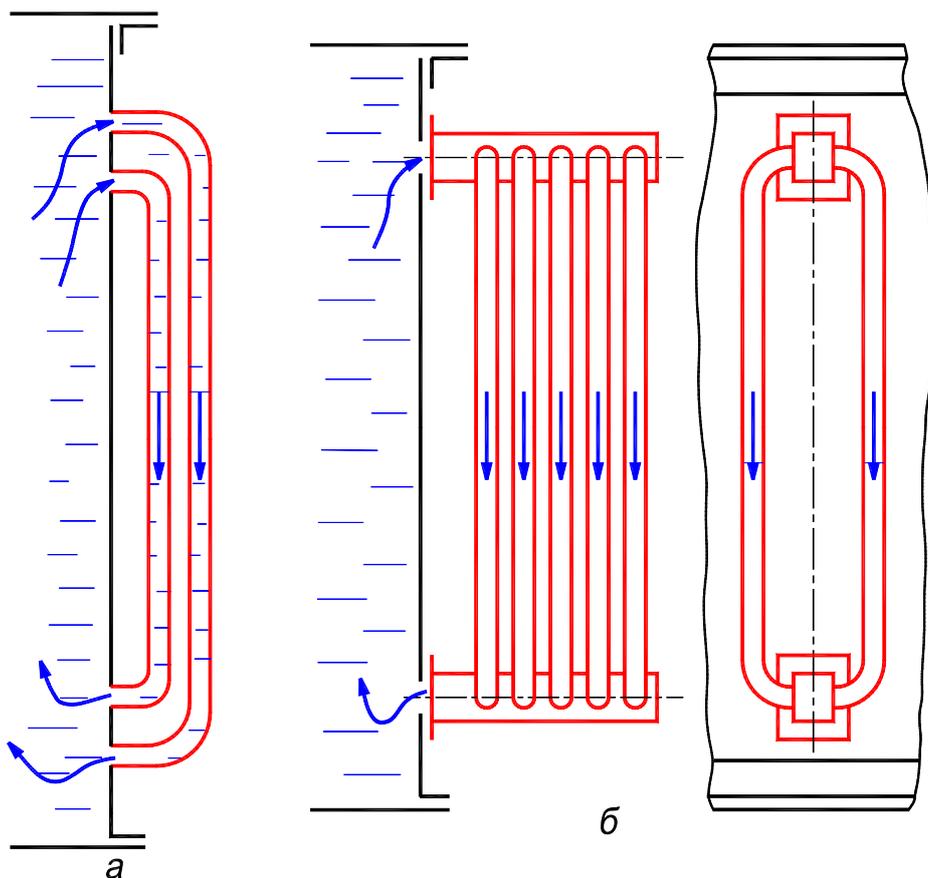


Рис. 10.2. Стенка бака трансформатора с охлаждающими маслом:

a – трубами; *б* – радиаторами

Широкое распространение получила система масловоздушного охлаждения с принудительной циркуляцией масла и воздуха (рис. 10.3). Основное достоинство устройств такой системы – возможность отвода большого количества тепла при относительно малых габаритах установок.

В отечественной и зарубежной практике для электропечных, преобразовательных и некоторых силовых трансформаторов общего назначения широко применяют масляно-водяную систему охлаждения. Циркуляция масла осуществляется электронасосами погружного типа; горячее масло поступает из верхней части трансформатора, перекачивается насосом через маслоохладитель и поступает в нижнюю часть бака.

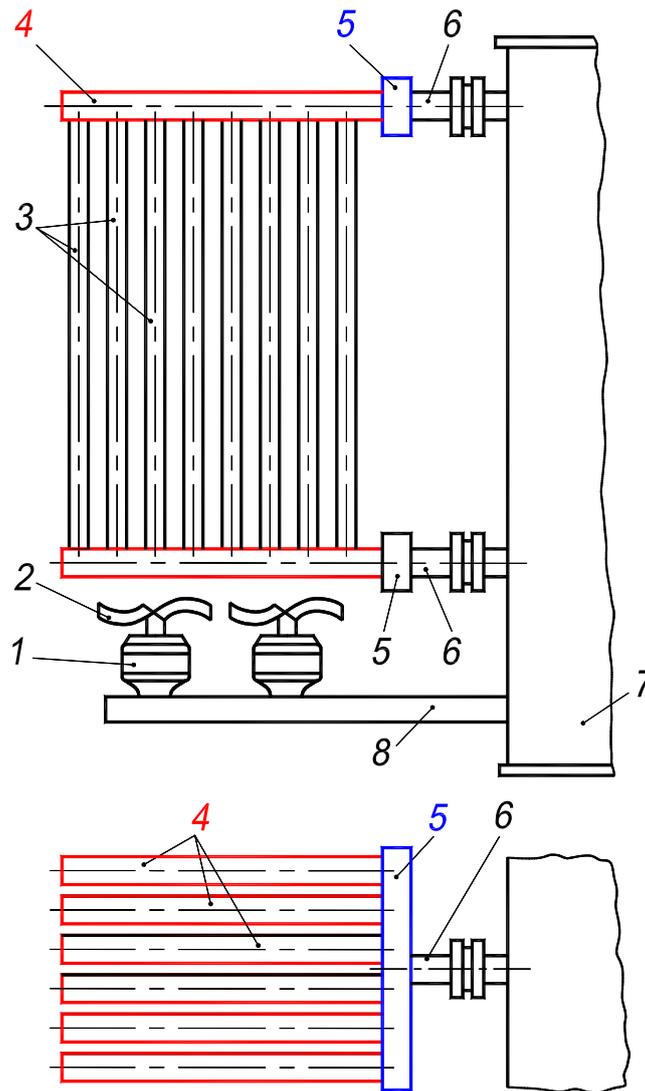


Рис. 10.3. Прямотрубный радиатор с обдувом вентиляторами:

1 – асинхронный двигатель; 2 – лопасти; 3 – труба; 4 – коробка;
5 – коллектор (верхний и нижний); 6 – патрубков; 7 – стенка бака; 8 – кронштейн

А1. Тепловые процессы в трансформаторе. В масляных трансформаторах магнитная система и обмотки омываются трансформаторным маслом, уровень которого значительно выше верхнего уровня магнитной системы. Частицы масла (рис. 10.2 и 10.4), соприкасающиеся с горячими поверхностями, нагреваясь, устремляются вверх и отдают свое тепло в окружающую среду через стенки и крышку бака. Охлаждаясь, частицы масла движутся вниз, уступая место другим, более горячим. В этом случае передача тепла происходит путем конвекции. Между обмотками и магнитной системой, с одной стороны, и маслом – с другой, устанавливается определенная разность температур. Однако температура масла и других частей

трансформатора в разных зонах по высоте различны. Примерное изменение температуры по высоте трансформатора показано на рис. 10.4.

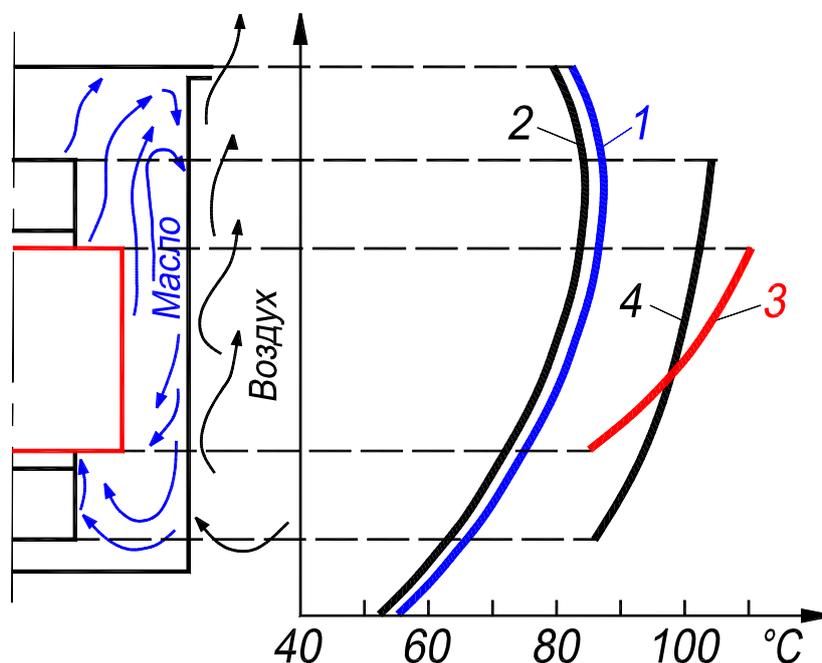


Рис. 10.4. Примерное изменение температуры по высоте трансформатора:
 1 – температура масла, 2 – температура стенок бака, 3 – температура обмотки,
 4 – температура магнитной системы.

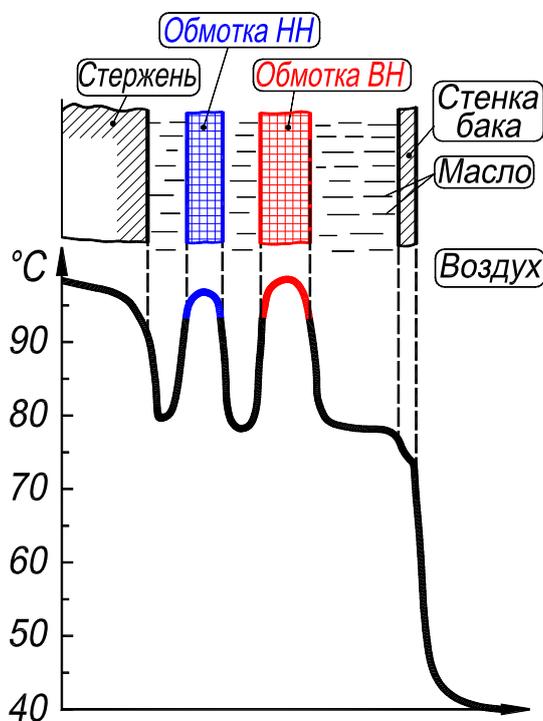


Рис. 10.5. Примерное распределение температуры в горизонтальном сечении
 масляного трансформатора

Сквозь стенки бака тепло проходит путем теплопроводности. Теплоотдача на поверхности бака происходит как путем конвекции, т. е. через нагретые движущиеся частицы воздуха, так и путем лучеиспускания. Разность температур между баком и окружающим воздухом может достигать нескольких десятков градусов. Примерное распределение температур в горизонтальном сечении масляного трансформатора показано на рис. 10.5.

В сухих трансформаторах отведение тепла от нагретых поверхностей магнитной системы и обмоток происходит конвекцией и лучеиспусканием. Роль масла в этом случае выполняет воздух.

Б. Тележка с катками. Для передвижения трансформатора в пределах подстанции трансформаторы снабжают тележками с катками (поз. 8 на рис. 10.1). Тележки могут быть съёмными или, чаще, приваренными к дну бака. На заводе-изготовителе собранный трансформатор перемещают главным образом подъёмными кранами, поэтому для перевозки в пределах завода тележка трансформатора не используется.

В. Расширитель. Бак трансформатора недопустимо полностью заполнять маслом и закрывать герметически, так как в этом случае он был бы неизбежно разрушен давлением, возникающим в баке при увеличении объема масла при колебаниях температуры. Согласно ГОСТ 11677–85 температура окружающего воздуха может изменяться от -45 до $+40$ °С. Поэтому приходится заполнять бак маслом не полностью и сообщать воздушное пространство над маслом с окружающим воздухом. От соприкосновения с окружающим воздухом масло в трансформаторе окисляется и увлажняется, постепенно, теряя свои электроизоляционные свойства. Для уменьшения площади контакта масла с воздухом и стабилизации его изоляционных свойств баки масляных трансформаторов снабжаются расширителем – цилиндрическим сосудом из листовой стали, сообщаемым с баком (поз. 20, 21 на рис. 10.1; рис. 10.6).

При установленном расширителе бак трансформатора заполнен маслом при любых температурах окружающего воздуха и любых нагрузках. При повышении температуры и увеличении объема избыток масла по маслопроводу (поз. 22 на рис. 10.1; поз. 1 на рис. 10.6), соединяющему расширитель с баком, поступает в расширитель. При понижении температуры и уменьшении объема масло переходит из расширителя в бак.

Трансформатор, имеющий расширитель, значительно реже нуждается в сушке, очистке, регенерации масла или замене его новым.

Необходимыми принадлежностями расширителя являются указатель уровня масла *4* и отстойник *9* для грязи и влаги (рис. 10.6). Воздушный объем в верхней части расширителя сообщается с атмосферой при помощи трубки *8* для свободного обмена воздуха, выведенной под расширитель (это исключает попадание в расширитель капель влаги). Объем масла в расширителе составляет 10 % объема масла в баке трансформатора.

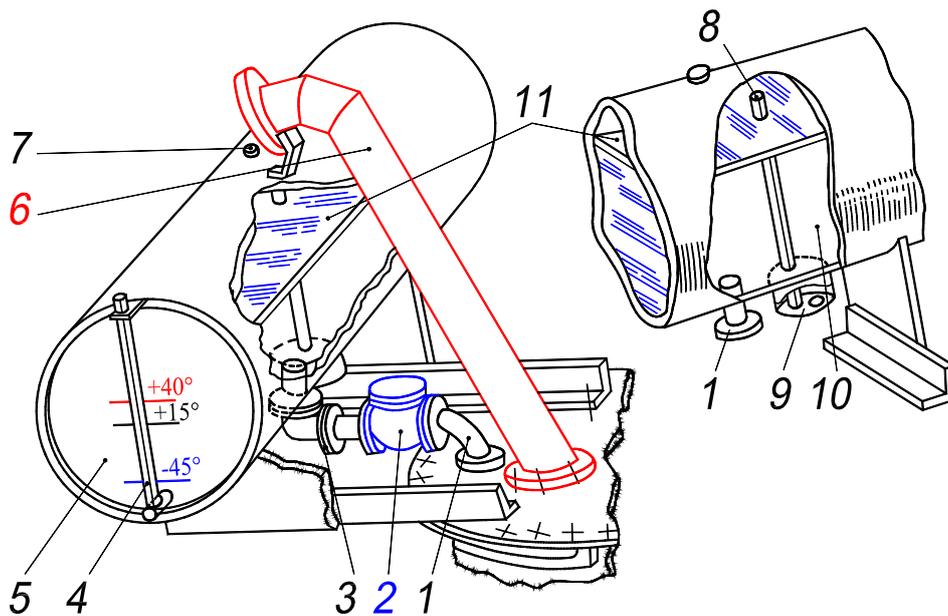


Рис. 10.6. Арматура бака трансформатора – расширитель и выхлопная труба:
1 – маслопровод; *2* – газовое реле; *3* – кран для отсоединения расширителя; *4* – маслоуказатель; *5* – расширитель; *6* – выхлопная труба; *7* – пробка для заливки масла; *8* – трубка для свободного обмена воздухом; *9* – грязеотстойник; *10* – трансформаторное масло; *11* – поверхность трансформаторного масла

Г. Газовое реле. При электрическом пробое изоляции трансформатора, замыкании витков, плохом контакте, искрении (например, из-за ненадежного заземления) масло или твердая изоляция (бумага, электроизоляционный картон) начинают разлагаться, выделяя при этом газы. Поднимаясь, пузырьки газа попадают под крышку (поз. *14* на рис. 10.1), проходят вдоль нее к маслопроводу (поз. *22* на рис. 10.1) (для этого трансформаторы на фундаменте ставят с небольшим наклоном в сторону от расширителя) и через него в расширитель (поз. *20* на рис. 10.1). В рассечку маслопровода между баком и расширителем помещают специальное устройство, срабатывающее при появлении газа или сильного потока масла, устремляющегося из бака в расширитель, и называемое газовым реле.

На патрубке между крышкой бака и расширителем устанавливается газовое реле (поз. 2 на рис. 10.6; рис. 10.7), которое служит для обнаружения повреждений. При повреждениях, приводящих к незначительному местному нагреванию (ухудшение контакта в соединениях, нарушение изоляции между листами сердечника), происходит разложение твердой изоляции и масла, сопровождающееся выделением пузырьков газа. Поднимаясь вверх, пузырьки газа скапливаются в газовом реле, вытесняя из него масло. Это приводит к опрокидыванию поплавка 15, замыкающего сигнальный контакт.

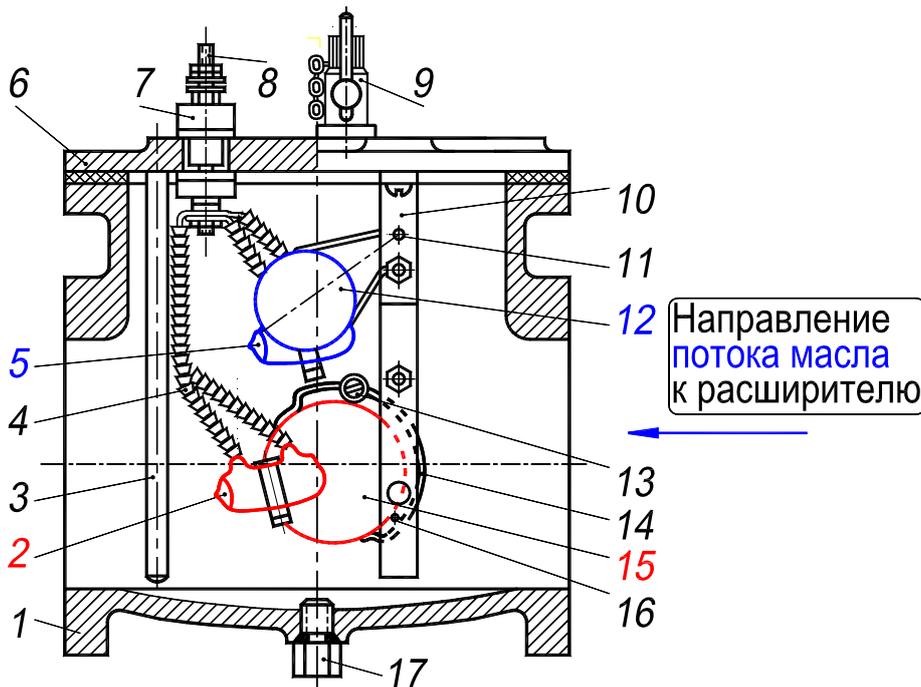


Рис. 10.7. Схема устройства газового реле:

1 – корпус; 2 – стеклянный ртутный выключатель нижнего элемента; 3 – стержень для опоры вынутой из корпуса крышки; 4 – соединительный провод, изолированный фарфоровыми бусами; 5 – стеклянный ртутный выключатель верхнего элемента; 6 – крышка реле; 7 – изолятор; 8 – зажим; 9 – кран; 10 – рамка, несущая рабочие элементы; 11 – ось вращения верхнего поплавка; 12 – верхний поплавок; 13 – груз; 14 – скоба; 15 – нижний поплавок; 16 – ось вращения нижнего поплавка; 17 – спускная пробка.

При значительных повреждениях, сопровождающихся взрывообразным выделением газов (короткое замыкание одного или нескольких витков и т. п.), масло толчкообразно перемещается из бака в расширитель. Струя масла опрокидывает другой поплавок реле 12, который, замыкая соответствующие контакты, отключает трансформатор от сети. Ртутные выключатели 2 и 5 изображены в замкнутом положении. Стрелка показывает направление к расширителю. На рис. 10.8 представлен ртутный выключатель в разомкнутом и замкнутом положениях.

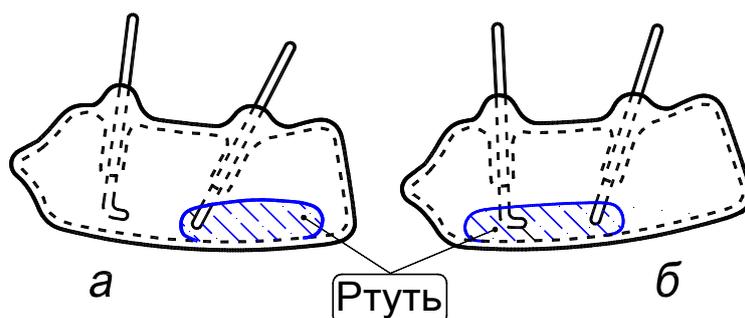


Рис. 10-8. Стеклоный ртутный выключатель (поз. 2 и 5 на рис. 10.7):
а – в разомкнутом положении; *б* – в замкнутом положении

Д. Выхлопная труба. Еще одно устройство, называемое выхлопной трубой (см. рис. 10.1, поз. 19 и 10. 6, поз. б), предохраняет бак трансформатора от механических деформаций при взрывообразных выделениях газа. Выхлопная предохранительная труба срабатывает, если в трансформаторе происходит бурное выделение газов, грозящее взрывом бака. Труба представляет собой удлиненный стальной цилиндр, один конец которого сообщается с баком, а другой закрыт мембраной (стеклянным диском). При повышении давления, вызванном аварийным процессом в баке, диск разрушается раньше, чем деформируется бак, масло и газы выбрасываются наружу.

Е. Термосифонный фильтр. В соответствии с требованиями ГОСТа масляные трансформаторы мощностью 160 кВ·А и более, в которых масло в расширителе соприкасается с окружающим воздухом, должны иметь термосифонный фильтр. Он предназначен для непрерывной автоматической регенерации трансформаторного масла. Фильтр представляет собой сварной стальной цилиндр, присоединяемый к баку, так же как радиатор, посредством двух патрубков с плоскими кранами (поз. 11 на рис. 10.1). Фильтр заполняют специальным поглощающим веществом (сорбентом), которым чаще всего служит силикагель КТС (крупный силикагель крупнопористый). Через фильтр, так же как через радиаторы (сверху вниз) (рис. 10.2), циркулирует масло. При этом продукты старения масла поглощаются силикагелем. На трансформаторах III габарита обычно устанавливают один термосифонный фильтр; масса силикагеля в нем должна быть равна 1 % массы масла трансформатора.

Ё. Термометр. Для контроля температуры масла в верхней части бака используются ртутные (рис. 10.1, поз. 16), а в более мощных трансформаторах манометрические термометры или дистанционные электротермометры

сопротивления. Измерительное устройство последних устанавливается на щите управления.

Трансформаторы мощностью менее 1000 кВ·А снабжают ртутным стеклянным (техническим) термометром со шкалой от 0 до 150 °С. Нижнюю часть термометра помещают в гильзу (карман) – открытый сверху стальной тонкостенный цилиндр. Гильзу устанавливают в отверстие в крышке и закрепляют болтами через резиновое уплотнение. Термометр показывает температуру верхних слоев масла (низ гильзы находится на 150 мм ниже крышки). Для уменьшения перепада температур гильзу заполняют трансформаторным маслом. Выступающую над крышкой часть термометра защищают стальным цилиндрическим футляром с двумя прорезями.

Температуру масла у более мощных трансформаторов измеряют при помощи термометрического сигнализатора – это дистанционный термометр с электроконтактным устройством, которое включается при определенной заданной заранее температуре. Контакты сигнализатора включают сигнальную или другую цепь, предупреждая обслуживающий персонал о недопустимой температуре масла в баке трансформатора. У мощных трансформаторов с дутьевым охлаждением термосигнализатор используют для запуска электродвигателей обдува.

Ж. Пробивной предохранитель. При электрическом пробое между обмотками ВН и НН сеть, подсоединенная к обмоткам НН, и сами обмотки НН могут оказаться под повышенным потенциалом. Чтобы исключить повышение потенциала на стороне НН, применяют для обмоток НН с напряжением до 690 В пробивной предохранитель (поз. 29 на рис. 10.1). Иногда пробивной предохранитель устанавливают и у трансформаторов с напряжением обмотки НН 230 и 400 В. Пробивной предохранитель представляет собой искровой промежуток, одним концом присоединенный к «земле» и другим — к нейтральному вводу НН (при соединении обмотки НН в звезду с выведенной нейтралью, рис. 10.1) или к любому линейному вводу (*a*, *b* и *c*) при соединении обмотки в треугольник. Пробивной предохранитель во многом напоминает обычный пробковый предохранитель, широко применяемый в сетях 127 – 220 В. Предохранители, защищающие обмотки НН напряжением 230 и 400 В, имеют пробивное напряжение 350 – 500 В; предохранители, присоединяемые к обмотке напряжением 525 В, имеют пробивное напряжение 800 – 1000 В.

З. Заземление. К арматуре бака относится также приспособление для заземления трансформатора – приваренная внизу бака к его стенке гайка с резьбой для прикрепления болтов заземляющей шины (поз. 7 на рис. 10.1). Поверхность заземляющего контакта должна быть гладкой и зачищенной, а ее размеры должны быть достаточными для получения надежного контакта со стальной шиной сечением не менее 30х4 мм. Вместе с баком также заземляется и магнитопровод (поз. 8 на рис. 9.8).

И. Арматура для заливки, взятия пробы, спуска и фильтрации масла (см. рис. 10.1). На баках трансформаторов в соответствии с ГОСТ устанавливают арматуру для заливки, взятия пробы, спуска и фильтрации масла (поз. 28, 10, 27). Трансформаторы мощностью до 630 кВ·А имеют на крышке бака кран с условным проходом 50 мм для заливки и фильтрации масла (поз. 28); такой же кран устанавливают и у трансформаторов бóльшей мощности внизу бака для слива масла (поз. 27). У всех трансформаторов внизу стенки бака имеется специальная пробка для взятия пробы масла (поз. 10). Такая пробка необходима, если нужно проверить химический состав масла и его электрическую прочность. В дне бака помещают пробку для спуска остатков масла и грязи при замене масла (поз. 9).

В конструкцию бака входит большое количество уплотнений, суммарная длина которых достигает многих метров. В отечественных трансформаторах для уплотнений используют специальную маслостойкую резину. При хорошем качестве уплотнений исключается возможность течи масла и соответственно повышается надежность работы трансформатора в эксплуатации.

Й. Отводы и вводы. Электрическое соединение обмоток ВН и НН с электрическими сетями осуществляется при помощи отводов (изолированных проводников, укрепленных внутри бака трансформатора; см. рис. 10.1, поз. 23, 24, 25) и вводов (проходных фарфоровых изоляторов, сквозь которые проходит токоведущий стержень; рис. 10.1, поз. 17 и 18; рис. 10.9 и 10.10). Отводы трансформатора также служат для соединения его обмоток с переключателями витков и другими токоведущими частями. Основой крепления отводов служат буковые планки, скрепленные с верхними и нижними ярмовыми балками. Проводники отводов зажимают между двумя планками, из которых одна является основной, а другая — прижимной, стягивающей проводники (поз. 25 на рис. 10.1).

В масляных трансформаторах концы обмоток должны быть выведены из бака наружу и присоединены к электрической сети. Для этого используют

проходные фарфоровые изоляторы, размещаемые на крышке или стенке бака. Проходной, т. е. проходящий через стенку или крышку бака, изолятор вместе с токопроводящим стержнем и другими деталями называют вводом.

Простейший трансформаторный ввод состоит из цилиндрического фарфорового изолятора, являющегося основой изоляционной конструкции ввода, металлического фланца для крепления ввода к стенке или крышке бака и токоведущей части. К токоведущей части ввода относят не только стержень, по которому непосредственно проходит ток, но и другие детали, электрически с ним связанные.

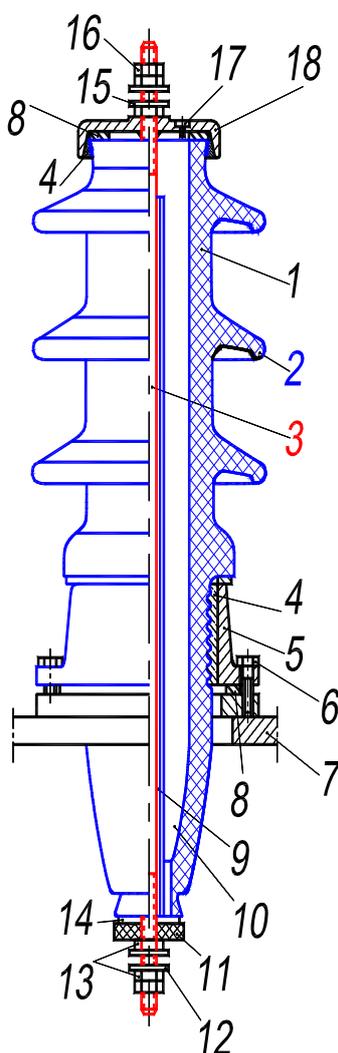


Рис. 10.9. Ввод для наружной установки на напряжение 35 кВ при токе до 250 А с токоведущей шпилькой, присоединяемой к отводу (поз. 23 и 24 на рис. 10.1):

1 – фарфоровый изолятор; 2 – рёбра изолятора; 3 – медная токоведущая шпилька с изолирующей трубкой; 4 – цемент; 5 – фланец; 6 – болт; 7 – крышка бака; 8 – резиновая прокладка; 9 – бумажно-бакелитовая трубка; 10 – масло; 11 – резиновое уплотнение; 12 и 15 – металлические шайбы; 13 и 16 – гайки; 17 – винт; 18 – колпак

Токоведущий стержень ввода (поз. 3 и 9 на рис.10.9; поз. 1 на рис. 10.10) должен быть надежно изолирован от заземленной крышки бака как со стороны масла, так и со стороны воздуха. На рис. 10.9 показан ввод на напряжение 35 кВ для наружной установки в собранном виде. Фарфоровый изолятор 1 вмазан при помощи магнезиального цемента 4 в чугунный фланец. Токоведущая медная шпилька 3 припаяна к металлическому колпаку 18, который скреплен с изолятором также посредством магнезиального цемента. В верхней части шпилька имеет гайки 16 и шайбы 15 для подсоединения к сети; в нижней части па нее надеты электрокартонная шайба 14 с вырезом и гетинаксовая шайба 11, затянутая гайками 13 и шайбами 12 для присоединения отвода от обмотки.

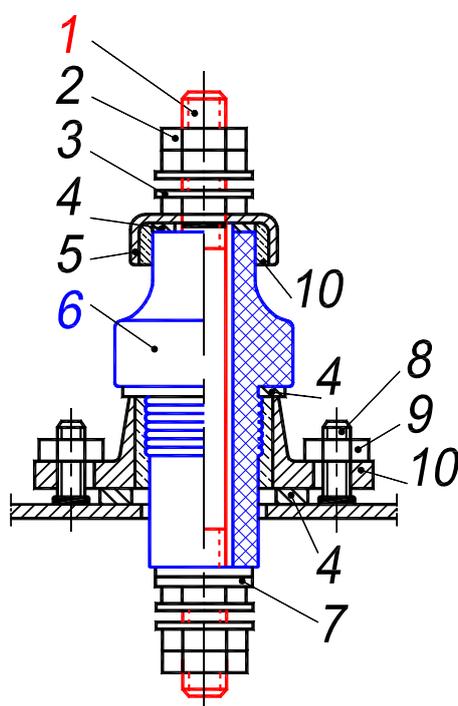


Рис. 10.10. Ввод на напряжение 230 – 525 В для наружной установки, номинальные токи 275, 400 или 600 А:

1 – шпилька медная; 2 – гайка низкая латунная; 3 – шайба медная; 4 – шайба резиновая; 5 – колпак: а – стальной на ток 275 и 400 А; б – латунный на ток 600 А; 6 – изолятор фарфоровый; 7 – шайба из электрокартона; 8 – шпилька стальная М12; 9 – гайка стальная М12; 10 – фланец чугунный (ток 275 и 400 А) или обойма латунная; 11 – магнезиальный цемент; При применении обоймы резиновая прокладка на крышке овальная с отверстиями для шпилек

Внутренняя изоляция ввода состоит из бумажно-бакелитовой трубки 9, надетой на токоведущую шпильку, масла 10, заполняющего внутреннюю полость ввода, и изолятора. Внешняя изоляция ввода усилена зонтообразными ребрами 2. В колпаке 18 имеется отверстие с резьбой, закрытое винтом 17 с шайбой

с асбестовым уплотнителем. При заливке трансформатора маслом этот винт частично отвертывают, чтобы выпустить воздух, вытесняемый из внутренней полости ввода маслом, поступающим через вырез в шайбе 14.

Недостатком конструкции этого ввода является то, что на крышке приходится делать люки для присоединения к вводу отводов обмотки. Кроме того, при замене поврежденного ввода из трансформатора приходится сливать значительную часть масла, что в эксплуатации часто затруднительно. Более удобны съемные вводы, для монтажа которых на заводе и замены (в случае повреждения) в эксплуатации не требуется люков и значительного слива масла.

С увеличением напряжения размеры вводов увеличиваются, а их конструкция усложняется.

К. Переключающие устройства. Переключающие устройства предназначены для переключения регулировочных ответвлений обмоток трансформаторов. Регулировочные ответвления на обмотках ВН (или СН) служат обычно для поддержания напряжения у потребителей электрической энергии на одном уровне при колебаниях нагрузки. У понижающих трансформаторов при необходимости повысить или понизить напряжение на вторичной стороне НН следует на первичной стороне ВН переходить соответственно на меньшее или большее число витков (разд. 15.5, с. 267, сл.).

Различают переключающие устройства: ПБВ (переключение без возбуждения) и РПН (регулирование под нагрузкой) (рис. 10.26). Изменение напряжения трансформатора без снятия нагрузки и напряжения особенно важно, когда технологический режим потребителя не допускает перерыва в электроснабжении.

Устройство, предназначенное для переключения ответвлений обмотки одной фазы, называют *однофазным*, а предназначенное для переключения ответвлений обмоток трехфазного трансформатора одним переключающим устройством — *трехфазным*.

Переключающее устройство, являясь ответственной частью трансформатора, представляет собой коммутационное изделие, включающее большое количество различных по назначению контактов и деталей изоляции, механизм привода и другие вспомогательные части. Его устанавливают внутри трансформатора с выводом привода на крышку бака трансформатора (см. поз. 26 на рис. 10.1, лист 2) или боковую стенку бака.

На рис. 10.11 представлен трёхфазный переключатель ПБВ для регулирования напряжения, за счёт переключения регулировочных витков, расположенных вблизи нейтральной точки обмотки (разд. 15.5, с. 267, сл.). Отводы от регулировочных витков каждой фазы подсоединены к неподвижным контактам 5 согласно маркировке, показанной на рисунке. Принцип действия переключателя следующий: при повороте привода переключателя рукояткой 3 на угол, соответствующий ступени переключения, подвижные контакты 7 соединяют ответвления (отводы) фазных обмоток с одинаковыми индексами в нейтраль на желаемой ступени. На рисунке соединены отводы X_3 , Y_3 и Z_3 на ступени III, соответствующей номинальному напряжению.

Для перехода с одной ступени напряжения на другую отключают трансформатор от сети, вывинчивают из рукоятки 3 переключателя стопорный болт 10 и устанавливают поворотом рукоятки контактную систему на желаемую ступень I, II, III, IV или V, на которую должна показывать стрелка рукоятки. Затем ввинчивают болт 10 в резьбовое отверстие, соответствующее выбранной ступени, и включают трансформатор в работу.

На рис. 10.12 – 10.27 представлены различные этапы процесса изготовления элементов трансформатора.

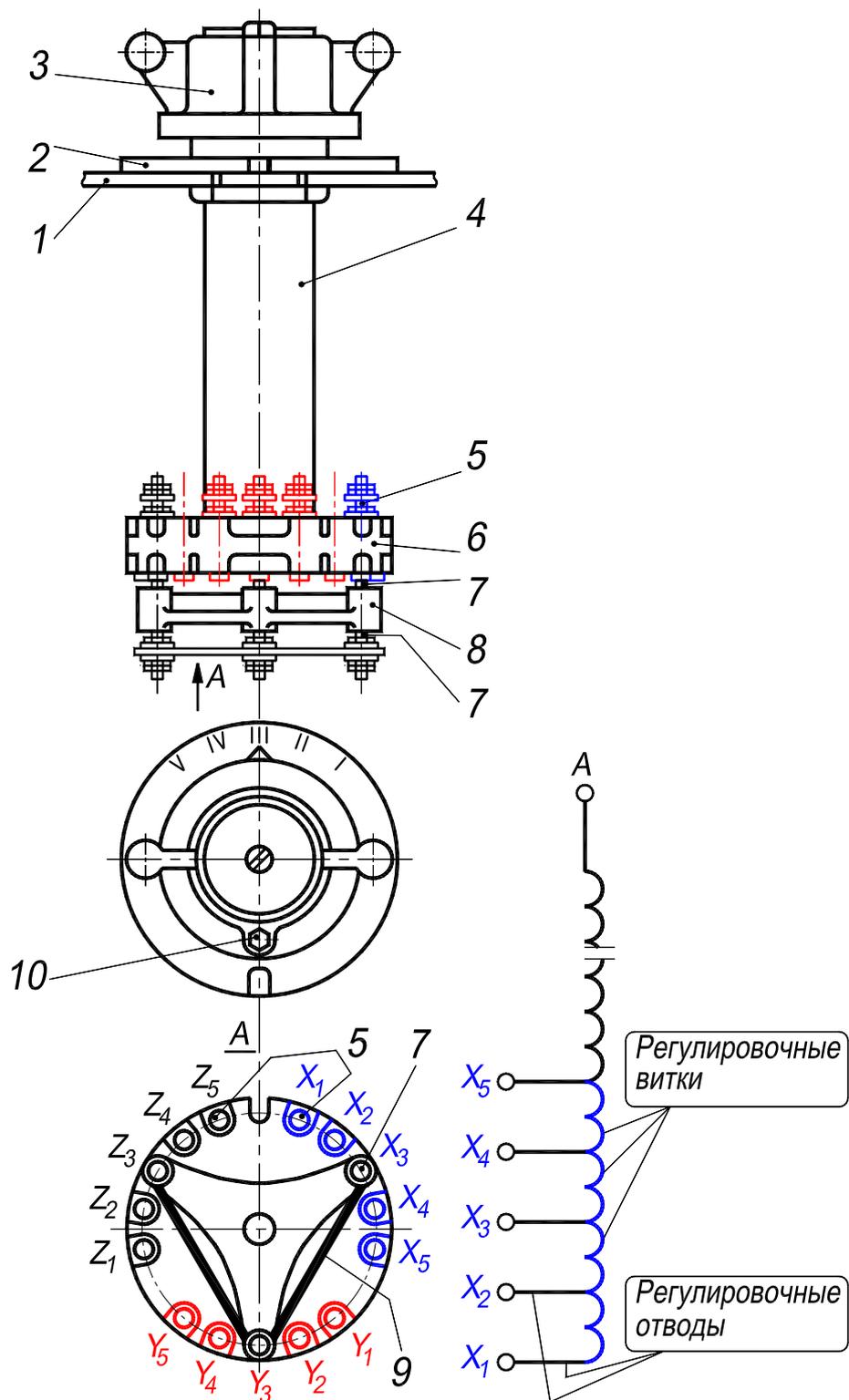
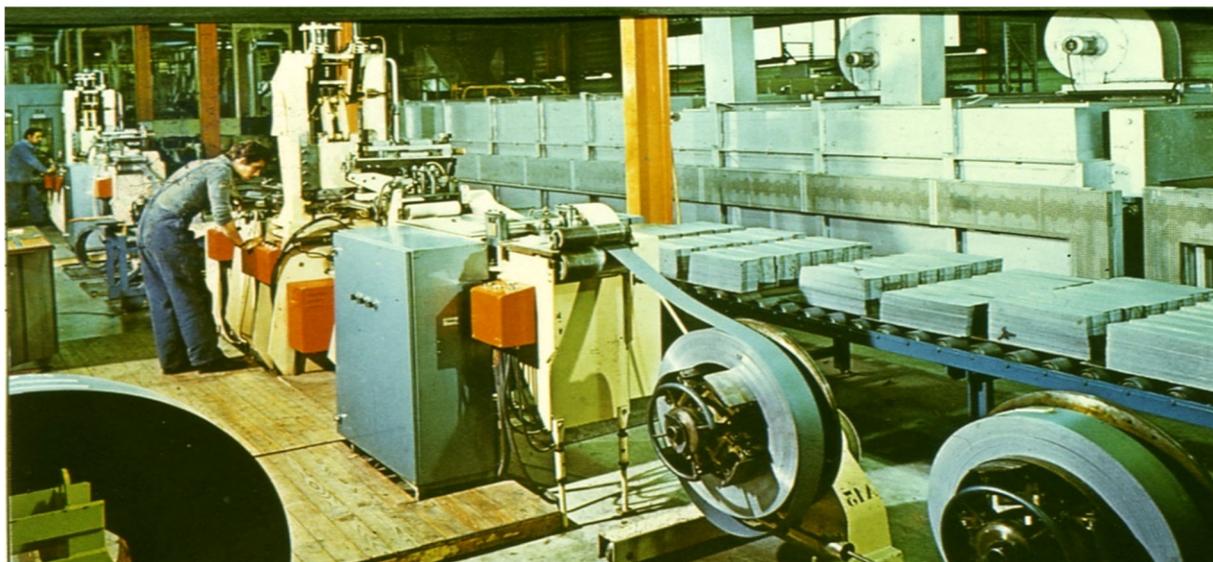


Рис. 10.11. Трёхфазный переключатель ПВВ для регулирования напряжения при токе до 50 А класса напряжения 35 кВ:

- 1 – крышка бака трансформатора; 2 – крышка переключателя; 3 – рукоятка;
 4 – бумажно-бакелитовый цилиндр; 5 – неподвижные контакты; 6 – диск;
 7 – подвижные контакты; 8 – держатель; 9 – медная лента; 10 – стопорный болт



**Рис. 10.12. Автоматическая линия резки
рулонной электротехнической стали на пластины**



**Рис. 10.13. Шихтовка «в переплет» стержневого магнитопровода трансформатора
(стыки – косые)**



Рис. 10.14. Участок изготовления обмоток трансформатора



Рис. 10.15. Осевая опрессовка и сушка обмоток НН и ВН трансформатора



Рис. 10.16. Насадка обмотки на стержень магнитопровода трансформатора



Рис. 10.17. Зашихтовка верхнего яра магнитопровода трансформатора (косые стыки)



Рис. 10.18. Распайка выводов обмоток трансформатора

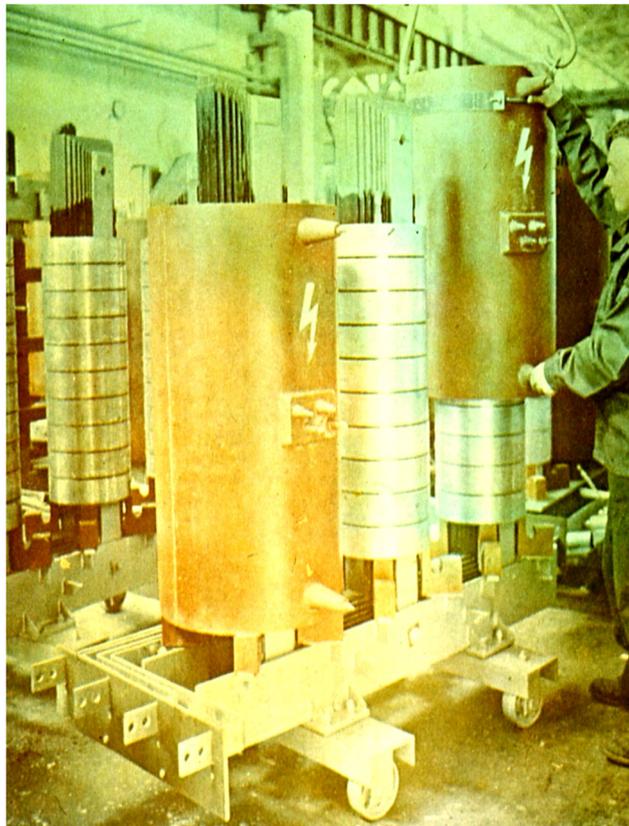
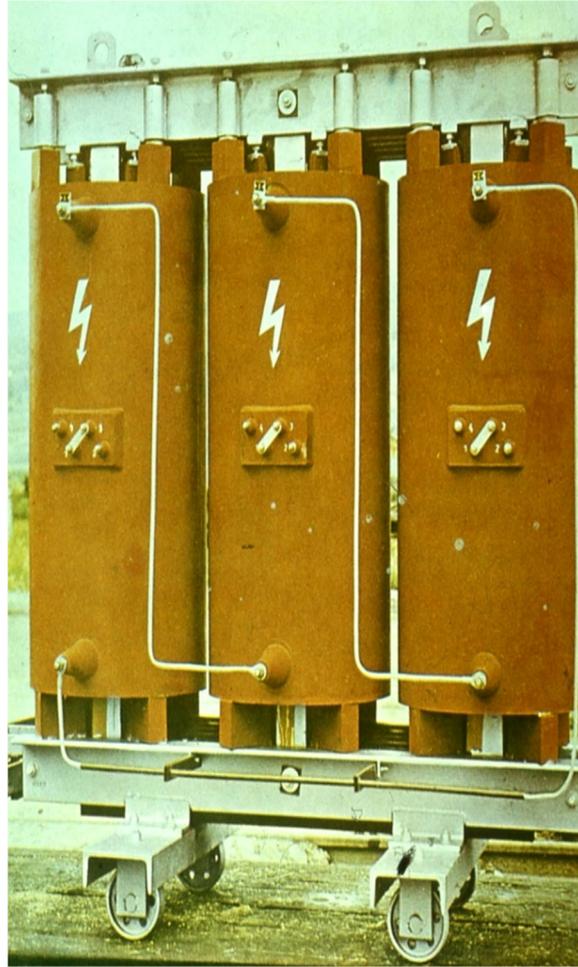
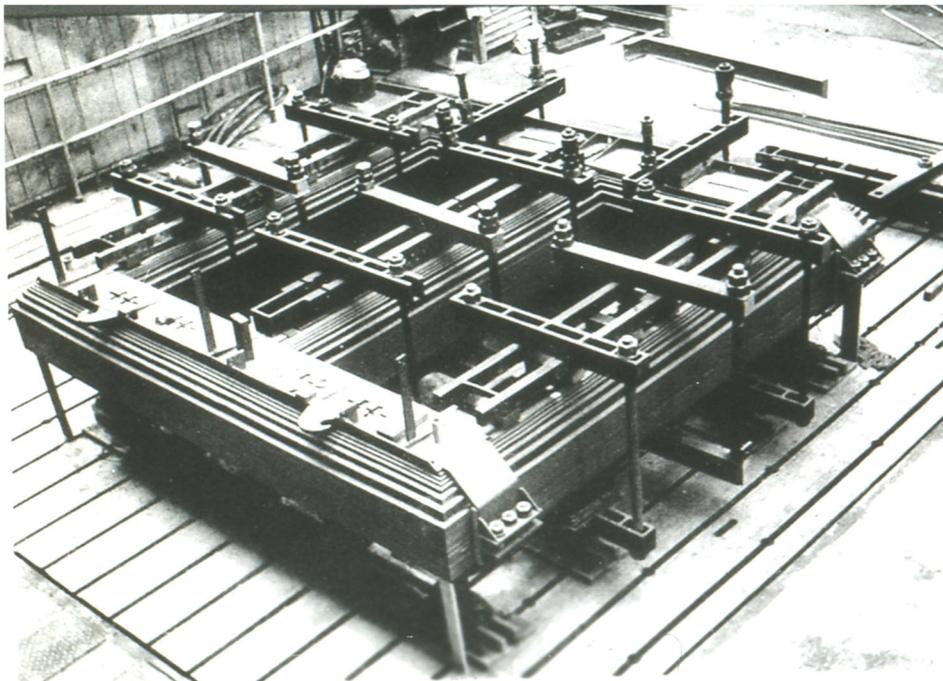


Рис. 10.19. Сборка сухого трансформатора: обмотка ВН залита в эпоксидную смолу



**Рис. 10.20. Активная часть (остов) сухого трансформатора:
обмотка ВН залита в эпоксидную смолу**



**Рис. 10.21. Стержневой магнитопровод мощного трехфазного масляного
трансформатора на сборочном стенде**

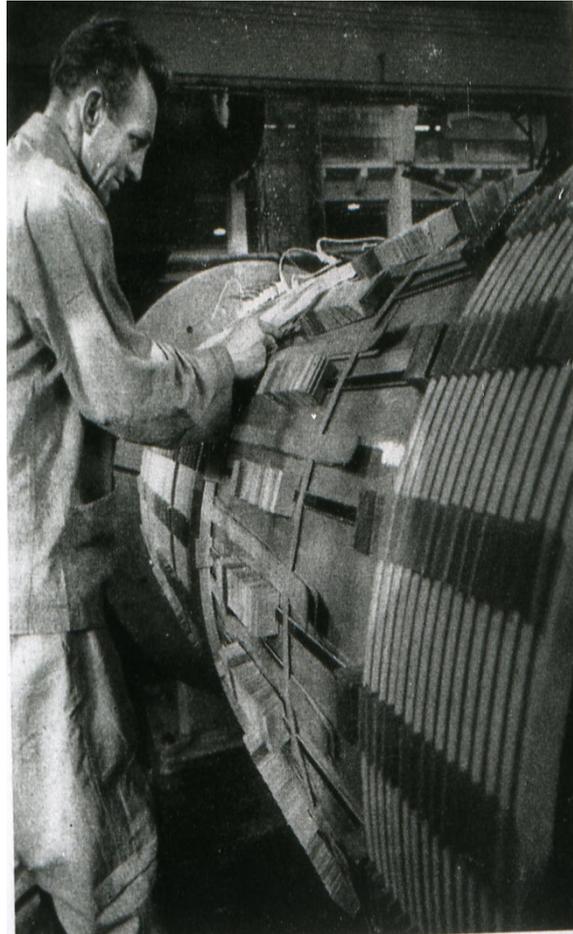


Рис. 10.22. Навивка обмотки ВН (110 кВ) мощного трехфазного трансформатора

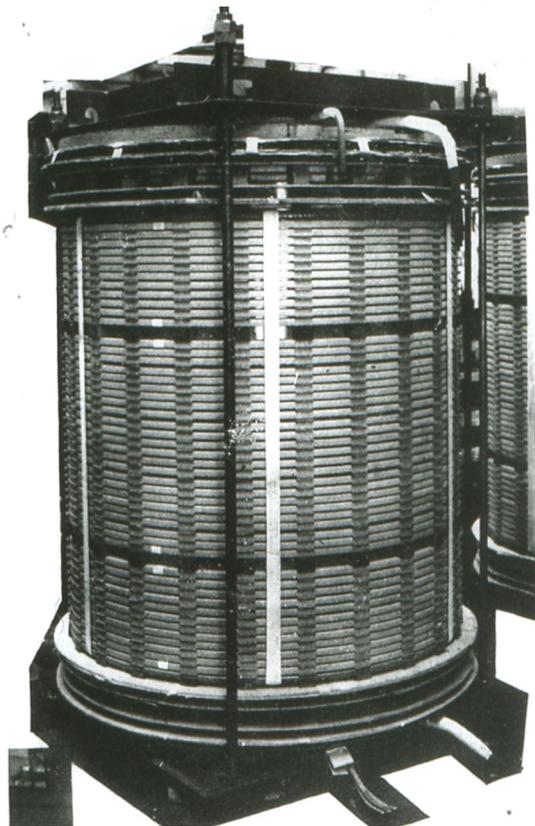


Рис. 10.23. Обмотка ВН (110 кВ) мощного трехфазного трансформатора

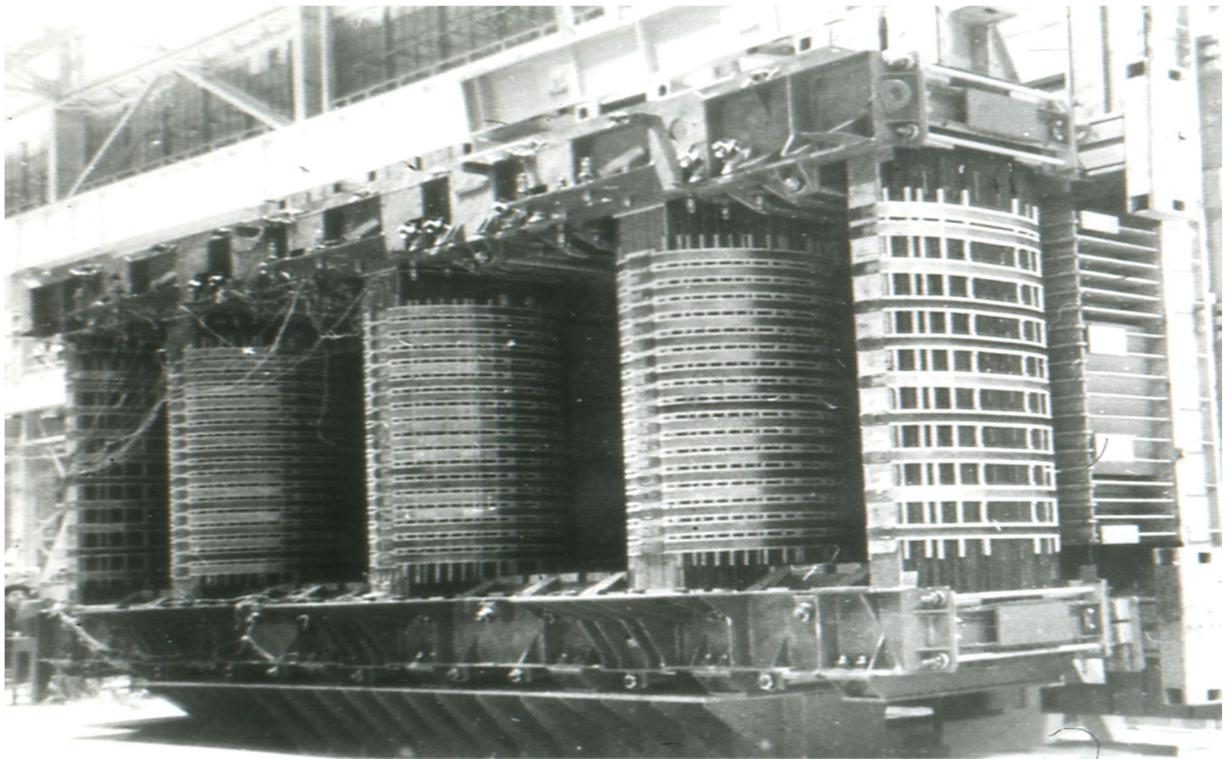


Рис. 10.24. Бронестержневой магнитопровод мощного трехфазного масляного трансформатора

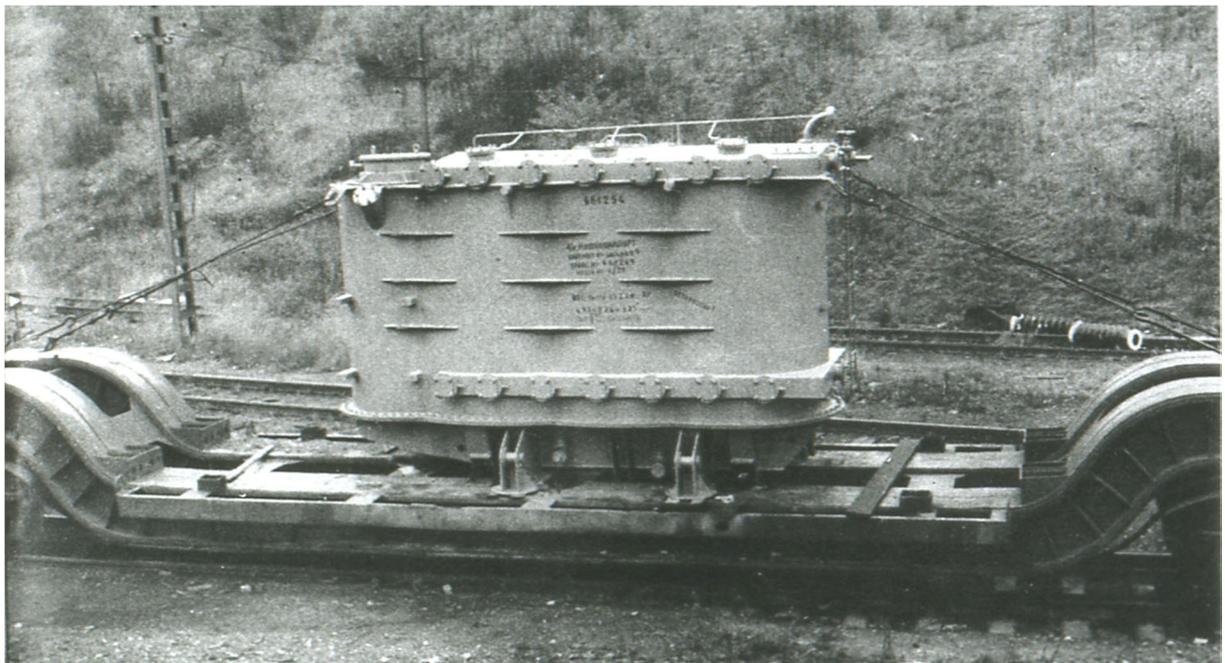


Рис. 10.25. Трансформатор на специальной железнодорожной платформе

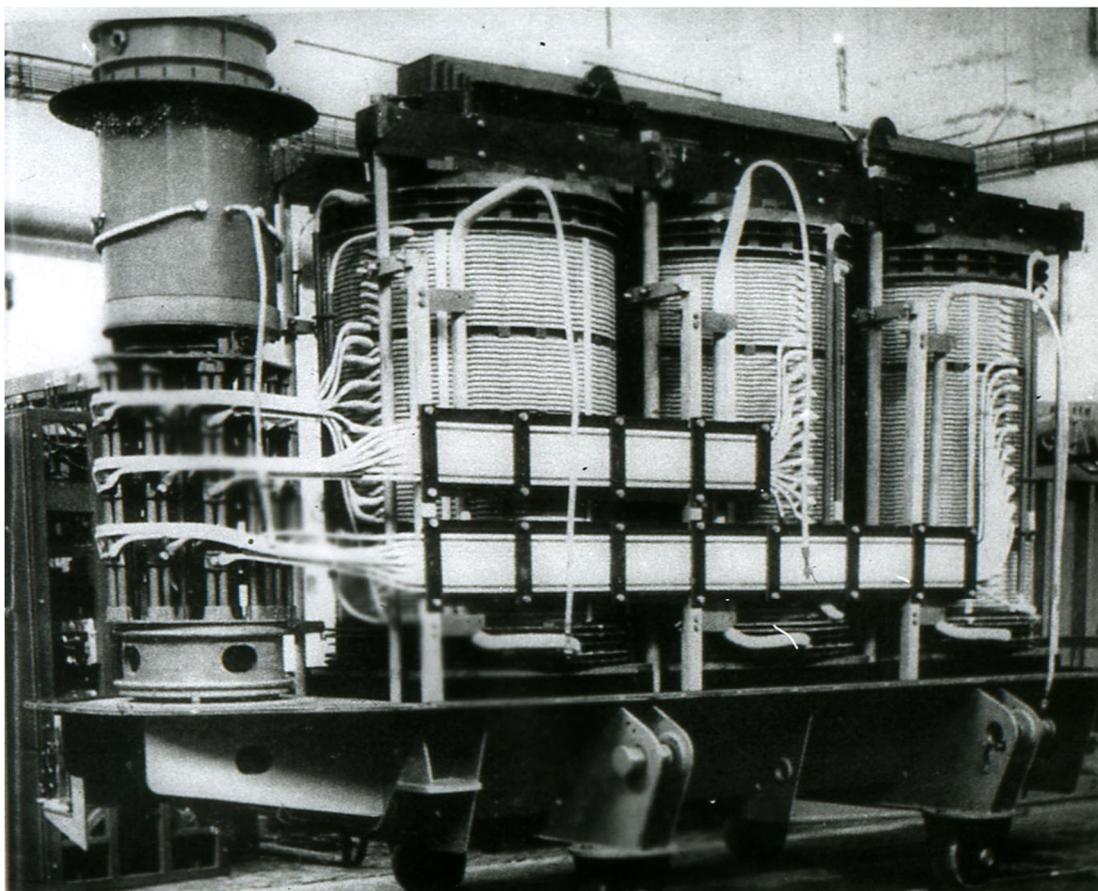


Рис. 10.26. Активная часть мощного трехфазного трансформатора с РПН, напряжение 110 кВ

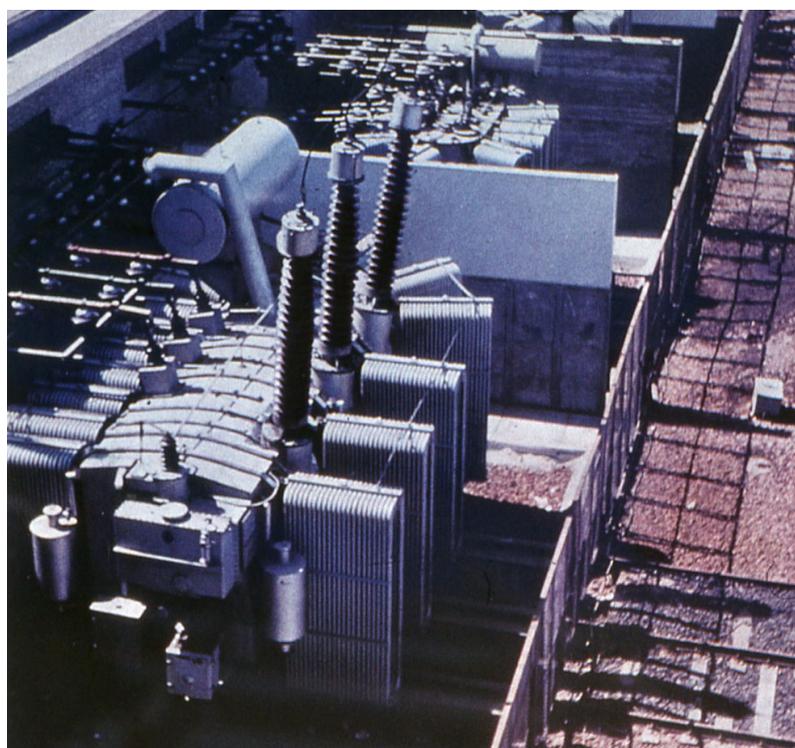


Рис. 10.27. Открытая установка мощных трёхфазных трансформаторов на электростанции

11. Метод изучения работы трансформатора

Изучение работы трансформатора под нагрузкой основывается на изучении двух предельных режимов его работы: холостого хода и короткого замыкания.

Под холостым ходом трансформатора понимают такой режим его работы, при котором к зажимам первичной обмотки подводится напряжение, а вторичная обмотка разомкнута, т. е. вторичный ток равен нулю, $I_2 = 0$.

Под коротким замыканием трансформатора понимают такой режим работы, при котором его вторичная обмотка замкнута накоротко и вторичное напряжение равно нулю, $U_2 = 0$.

Изучение режимов холостого хода и короткого замыкания трансформатора важно в двух отношениях. *Во-первых*, можно рассматривать любой нагрузочный режим трансформатора как промежуточный между двумя предельными режимами его работы и получить этот нагрузочный режим путем наложения одного предельного режима на другой, например режима короткого замыкания на режим холостого хода. В этом состоит теоретическая ценность этих режимов.

Во-вторых, холостой ход и короткое замыкание трансформатора позволяют определить ряд величин, имеющих весьма важное значение для эксплуатации трансформатора. Так, например, чтобы определить одну из важнейших эксплуатационных величин трансформатора – его КПД – нужно располагать потерями при холостом ходе трансформатора и при его коротком замыкании. В этом состоит практическая ценность указанных предельных режимов.

Изучение режима холостого хода позволяет определить расчетным или опытным путем следующие характерные для трансформаторов величины: потери холостого хода (магнитные потери в магнитопроводе), ток холостого хода, коэффициент трансформации, сопротивление взаимной индукции X_m между первичной и вторичной обмотками.

Изучение режима короткого замыкания позволяет определить расчетным или опытным путем следующие характерные для трансформаторов величины: потери короткого замыкания (электрические потери в обмотках), напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие, сопротивление короткого замыкания (собственные суммарные сопротивления обмоток R_k, X_k, Z_k).

12. Режим холостого хода однофазного трансформатора

12.1. Уравнение напряжений и ЭДС при холостом ходе трансформатора

Пусть к зажимам $A-X$ первичной обмотки трансформатора (рис. 12.1) приложено напряжение $u_1 = u_x$, синусоидально изменяющееся во времени с частотой f . Зажимы вторичной обмотки $a-x$, согласно условию, разомкнуты. Под действием напряжения u_x по первичной обмотке трансформатора течет ток i_x , называемый током холостого хода. Этот ток создает магнитодвижущую силу $i_x w_1$, где w_1 – количество последовательно соединенных между собой витков первичной обмотки.

Магнитодвижущая сила $i_x w_1$ вызывает появление магнитного потока, большая часть которого замыкается по стали сердечника (линия 1) и, будучи сцеплена с обеими обмотками трансформатора, образует *основной магнитный поток* Φ . Другая, значительно меньшая часть потока, замыкается главным образом вне сердечника и сцепляется только с первичной обмоткой. Эта часть потока образует *первичный поток рассеяния* $\Phi_{\sigma 1}$: он показан на рис. 12.1 линиями 2 и 3, к этому же потоку могут быть отнесены и линии 4 и 5, частично сцепленные со вторичной обмоткой.

Основной поток Φ наводит в первичной обмотке основную ЭДС e_1 и во вторичной обмотке ЭДС e_2 . Поток $\Phi_{\sigma 1}$ рассеяния создает ЭДС $e_{\sigma 1}$ рассеяния только в первичной обмотке. Первичная обмотка имеет активное сопротивление R_1 , при протекании по этой обмотке тока i_x напряжение на активном сопротивлении равно $i_x R_1$.

При выяснении взаимозависимости между величинами, определяющими режим холостого хода трансформатора, исходят из второго закона Кирхгофа, согласно которому сумма подведенного к первичной обмотке трансформатора напряжения и ЭДС в ней в любой момент времени равны напряжению на активном сопротивлении этой обмотки, т. е.

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_x R_1, \text{ или } u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + i_x R_1.$$

При переходе от мгновенных значений ЭДС к действующим необходимо полученное равенство написать в виде суммы векторов, т. е.

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{\sigma 1} + \underline{I}_x R_1. \quad (12.1)$$

При холостом ходе силового трансформатора величина $I_x R_1 - \underline{E}_{\sigma 1}$ обычно не превышает 0,5 % от U_1 . На этом основании ею можно пренебречь, и тогда

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1, \quad (12.2)$$

т. е. при холостом ходе трансформатора подведенное к его обмотке напряжение u_1 уравнивается практически только ЭДС e_1 , создаваемой в этой обмотке основным магнитным потоком Φ .

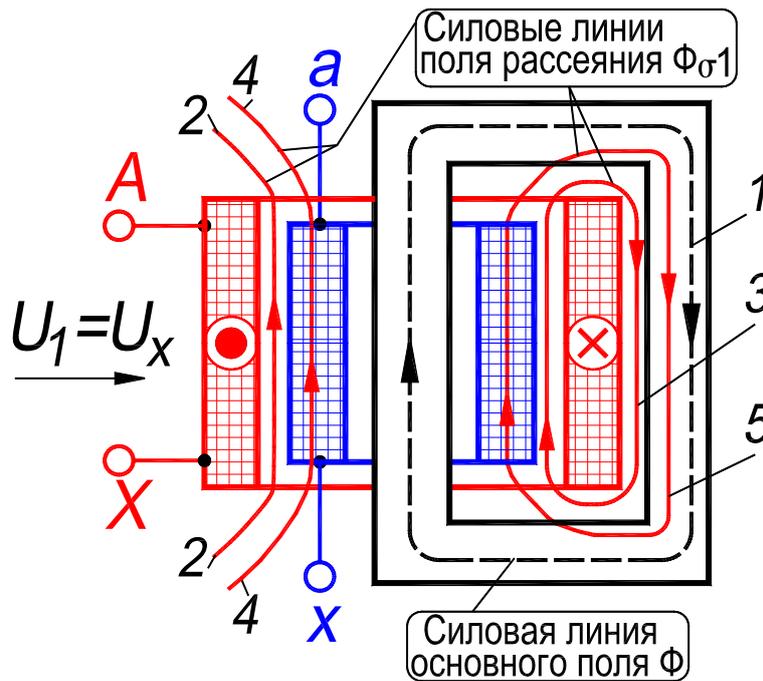


Рис. 12.1. Магнитный поток при холостом ходе трансформатора

12.2. Векторная диаграмма напряжений и ЭДС холостого хода

А. ЭДС первичной обмотки. Так как, согласно условию, напряжение u_1 изменяется во времени синусоидально (рис. 12.2,а), то, согласно формуле (12.2), ЭДС e_1 представляет собой тоже синусоиду, повернутую относительно первой на 180° .

На рис. 12.2,в напряжение и ЭДС изображены на векторной диаграмме двумя векторами \underline{U}_1 и \underline{E}_1 , равными друг другу по величине, но направленными в противоположные стороны, т. е. находящимися в противофазе.

Б. Основной поток. Зависимость между ЭДС e_1 и создающим ее основным потоком Φ устанавливается на основании закона электромагнитной индукции. Пусть первичная обмотка состоит из w_1 последовательно соединенных между собой витков и все эти витки пронизываются одним и тем же потоком Φ , тогда по формуле (В.1), с. 31,

$$e_1 = -w_1 d\Phi/dt. \quad (12.3)$$

ЭДС e_1 изменяется во времени синусоидально. Но если при дифференцировании получается синусоидальная величина, то дифференцируемая величина представляет собой косинусоидальную величину, т. е.

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t. \quad (12.4)$$

При этом знак минус в формуле (12.3) показывает, что ЭДС e_1 отстает от потока Φ на четверть периода, т. е. вектор потока $\underline{\Phi}_m$ опережает вектор ЭДС \underline{E}_1 на $\pi/2$.

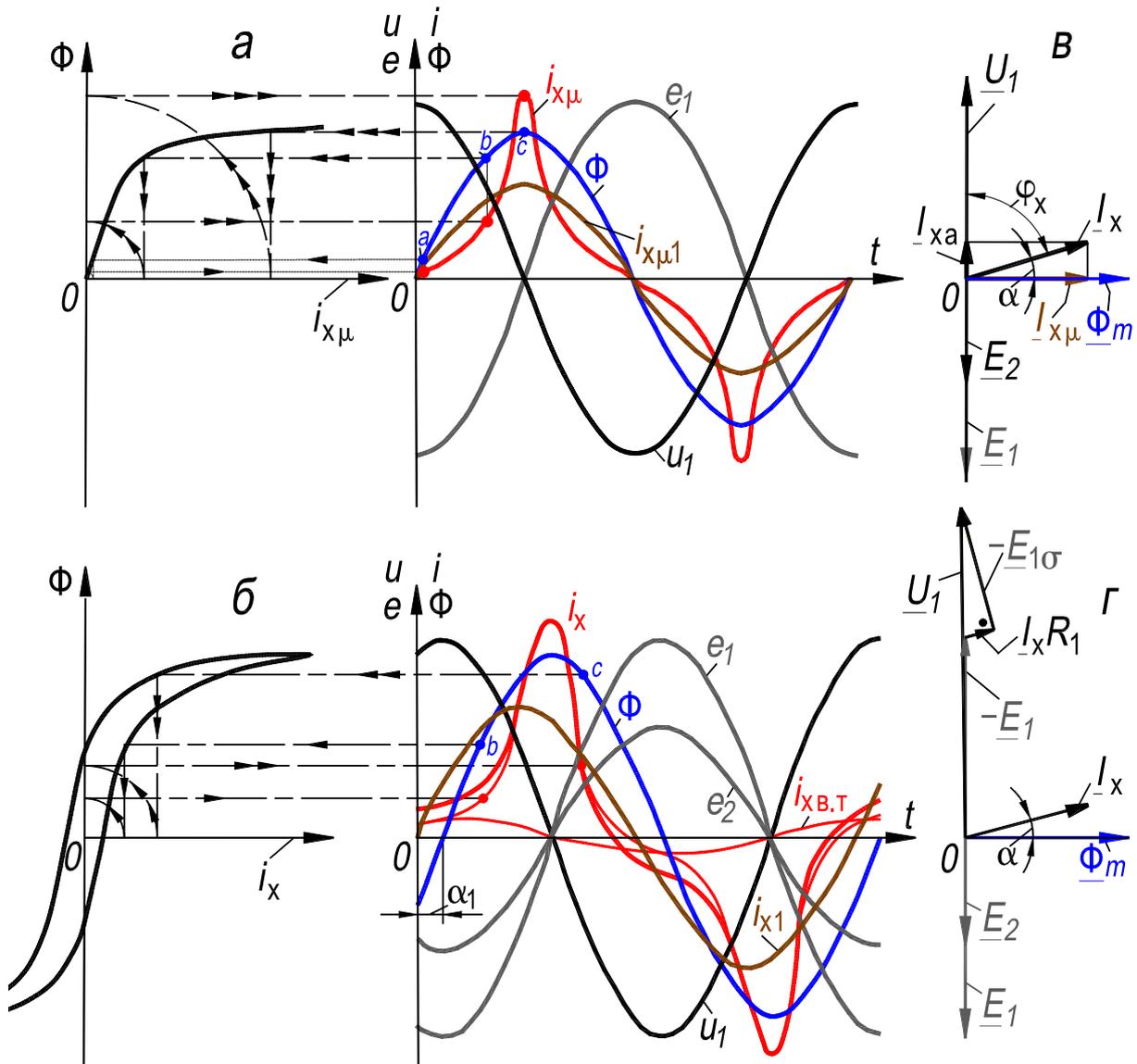


Рис. 12.2. Холостой ход трансформатора: *а* – намагничивающий ток $i_{x\mu}$,

б – ток холостого хода i_x , *в* – упрощенная векторная диаграмма,

г – полная векторная диаграмма

В соответствии со сказанным изображена зависимость $\Phi = f(t)$ на рис. 12.2,*а* и вектор $\underline{\Phi}_m$ этого потока на рис. 12.2,*в*.

После подстановки в формулу (12.3) значения потока Φ из формулы (12.4) мгновенное значение первичной ЭДС

$$e_1 = -w_1 d(\Phi_m \cos \omega t)/dt = \omega w_1 \Phi_m \sin \omega t. \quad (12.5)$$

Амплитуда первичной ЭДС

$$E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m = 2\pi f w_1 \Phi_m \quad (12.6)$$

и действующее значение первичной ЭДС

$$E_1 = E_{1m}/\sqrt{2} = 2\pi f w_1 \Phi_m/\sqrt{2} = \pi\sqrt{2} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (12.7)$$

Аналогично выражается действующее значение ЭДС вторичной обмотки, имеющей w_2 последовательно соединенных витков,

$$E_2 = E_{2m}/\sqrt{2} = 2\pi f w_2 \Phi_m/\sqrt{2} = \pi\sqrt{2} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (12.8)$$

ЭДС e_2 , так же как и ЭДС e_1 отстает от потока Φ на четверть периода (рис. 12.2,*б*).

Из формул (12.2) и (12.7) видно, что при заданных значениях напряжения U_1 частоты f и количества витков w_1 в трансформаторе должен существовать такой по величине основной поток с амплитудой Φ_m , который мог бы создать ЭДС E_1 , необходимую для уравновешивания напряжения U_1 .

В. Намагничивающий ток. Чтобы создать поток Φ , нужна магнитодвижущая сила $i w_1$ или, если считать количество витков w_1 заданным, намагничивающий ток $i_{x\mu}$. Ток $i_{x\mu}$ является главной составляющей тока холостого хода i_x , причем вектор тока $\underline{I}_{x\mu}$ совпадает по фазе с вектором потока $\underline{\Phi}_m$ (рис. 12.2,*в*).

По закону полного тока (разд. В.5.2, с. 44)

$$\Phi = B \cdot S = i_{x\mu} G_M,$$

где G_M – проводимость магнитной цепи трансформатора, а S – поперечное сечение сердечника трансформатора.

Пока поток Φ и соответствующая ему индукция B малы (рис. 12.2,*а*), сталь трансформатора не насыщена и $G_M = \text{const}$; затем сталь начинает насы-

щаться, и проводимость G_M уменьшается. Соответственно этому ток $i_{x\mu}$ изменяется пропорционально потоку Φ , т. е. синусоидально, лишь до тех пор, пока $G_M = \text{const}$, при уменьшении G_M требуется значительное увеличение намагничивающего тока $i_{x\mu}$, чтобы получить необходимый магнитный поток Φ .

Построение намагничивающего тока произведено на рис. 12.2,*а* по магнитной характеристике трансформатора. На синусоиде потока Φ взяты три точки a, b, c и графически определены соответствующие этим точкам значения намагничивающего тока, как это показано стрелками.

Форма намагничивающего тока $i_{x\mu}$ в насыщенном трансформаторе отличается от синусоиды и имеет пикообразный характер. Но на векторной диаграмме могут быть показаны только синусоидальные величины. Поэтому функцию тока $i_{x\mu} = f(t)$ на рис. 12.2,*а* разлагают в ряд и принимают в расчет только первую гармоническую $i_{x\mu 1}$ с действующим значением $i_{x\mu}$. Ток $i_{x\mu}$ является индуктивным током, поскольку он отстает от напряжения u_1 на четверть периода.

Приведенный выше ход рассуждения – от напряжения U_1 к ЭДС E_1 , затем от E_1 к потоку Φ_m и, наконец, к току $i_{x\mu}$ имеет важное значение для определения взаимной связи величин, характеризующих работу трансформатора.

Пример. Пусть в однофазном трансформаторе увеличился зазор в стыке между стержнем и ярмом, вследствие чего магнитная проводимость G_M на пути потока Φ в сердечнике уменьшилась.

Требуется выяснить, как при этом изменяется поток Φ_m и $I_{x\mu}$, если предполагать, что напряжение U_1 и частота f сети, питающей трансформатор, остались без изменения?

При заданном напряжении U_1 по условию равновесия напряжений и ЭДС E_1 не может измениться; точно так же при заданной частоте f не может измениться и поток Φ_m [формула (12.7)], а так как $\Phi_m = I_{x\mu} G_M$, то ток $I_{x\mu}$ должен возрасти.

Г. Ток холостого хода. Построение намагничивающего тока с учетом потерь от гистерезиса показано на рис. 12.2,*б*. Для этой цели используется восходящая и нисходящая ветви магнитной характеристики. Зависимость намагничивающего тока получается несимметричной относительно оси ор-

динат. Кроме того, должна быть учтена составляющая тока $i_{хв.т}$, необходимая для покрытия потерь от вихревых токов. Результирующий ток холостого хода i_x показан на рис. 12.2,б. Для возможности построения векторной диаграммы необходимо выделить первую гармоническую тока холостого хода i_x , действующее значение которой

$$I_x = (I_{x\mu}^2 + I_{xa}^2)^{1/2}. \quad (12.9)$$

Активная составляющая тока холостого хода, соответствующая мощности холостого хода P_x , равна $I_{xa} = P_x/U_1$.

Вектор тока I_{xa} совпадает по фазе с вектором \underline{U}_1 (рис. 12.2,в).

Вектор тока I_x отстает от вектора \underline{U}_1 на угол φ_x . Обычно $I_{xa}/I_x = 0,1$, поэтому угол φ_x близок к 90° (рис. 12.2,в). В силовых трансформаторах ток I_x небольшой, не превышает 10 % номинального тока в трансформаторах малой мощности и 1 – 3 % в трансформаторах большой мощности (Работа №1, с. 353,сл.). Это объясняется тем, что сердечник силового трансформатора не имеет зазора, подобного зазору вращающейся машины, а из расчета магнитной цепи машины [11] следует, что даже при весьма небольшом зазоре магнитодвижущая сила F_δ , расходуемая на проведение магнитного потока через зазор δ , составляет главную часть магнитодвижущей силы всей машины (разд. В.9.11, с. 96,сл.).

Эксплуатационное значение тока i_x определяется тем, что по своему характеру он является почти чисто индуктивным током, содержащим ряд высших гармонических. При заданных условиях работы энергосистемы индуктивный ток уменьшает коэффициент мощности системы и этим снижает долю активной мощности, передаваемой или распределяемой системой, а высшие гармонические тока i_x могут оказать неблагоприятное влияние на работу системы. Поэтому вопрос о величине и форме тока i_x имеет существенное значение. Значение тока i_x для силовых трансформаторов задаётся стандартом (разд. 13.3, с. 237,сл.).

Д. Векторная диаграмма. Упрощенная векторная диаграмма напряжений и ЭДС в соответствии с уравнением (12.2) представлена на рис. 12.2,в.

После того как определены составляющие тока холостого хода и взаимное положение векторов I_x и Φ_m при необходимости может быть учтено напряжение $i_x R_1$ на активном сопротивлении обмотки и ЭДС $e_{\sigma 1}$, вызванная потоком

рассеяния первичной обмотки. Вектор $I_x R_1$ совпадает по направлению с вектором I_x , а вектор $\underline{E}_{\sigma 1}$ отстает от вектора I_x на $\pi/2$. Согласно уравнению (12.1), для того чтобы получить вектор U_1 , необходимо произвести сложение векторов $-\underline{E}_1$, $I_x R_1$ и $-\underline{E}_{\sigma 1}$. Полная векторная диаграмма напряжений и ЭДС трансформатора в режиме холостого хода приведена на рис. 12.2,з.

12.3. Потери холостого хода

При холостом ходе трансформатор не совершает полезной работы, поэтому подведенная мощность P_x затрачивается только на покрытие потерь холостого хода, которые состоят из потерь в первичной обмотке $P_{\Sigma 1}$, основных потерь в стали $P_{ст}$ и добавочных потерь холостого хода P_d . В силовых трансформаторах потерями $P_{\Sigma 1}$ при х. х. можно пренебречь, с этим видом потерь следует считаться только в трансформаторах малой мощности (до 100 В·А). Таким образом, мощность холостого хода практически равна только потерям в стали, т. е.

$$P_x = P_{ст} + P_d. \quad (12.10)$$

Основные потери в стали трансформаторов и способы их уменьшения рассмотрены в разд. 9, Г, с. 178, сл. Магнитопроводы трансформаторов изготавливаются из холоднокатаной анизотропной электротехнической стали, обладающей лучшими магнитными характеристиками в направлении проката стального листа, но худшими в направлении поперечном прокату. Поэтому при сборке сердечника применяются особые приемы, которые приводят к уменьшению зон в которых поток не совпадает с направлением проката (рис. 9.15, с. 180).

В трансформаторе частота перемагничивания сердечника равна частоте приложенного напряжения и является величиной неизменной, поэтому в соответствии с формулой (В.56), с. 129, потери в стали зависят от амплитудного значения B_m индукции во второй степени. Так как в выполненном трансформаторе сечение S сердечника не подвергается изменению, то $B_m = \Phi_m/S$ зависит только от Φ_m .

Согласно уравнению (12.7), амплитуда магнитного потока пропорциональна действующему значению ЭДС, таким образом,

$$P_{ст} \equiv B_m^2 \equiv \Phi_m^2 \equiv E_1^2 \quad (12.11)$$

т. е. основные потери в стали трансформатора пропорциональны ЭДС во второй степени.

Добавочные потери холостого хода P_d возникают: в стали, вследствие изменения структуры листов при механической обработке; в местах стыков и в местах расположения шпилек вследствие неравномерного распределения индукции; в конструктивных деталях от потоков рассеяния и в изоляции трансформаторов высокого напряжения.

Добавочные потери холостого хода не поддаются точному расчету. Исследования показывают, что в сердечниках трансформаторов из горячекатаной стали добавочные потери холостого хода значительно возрастают при индукции свыше 1,5 Тл. При индукции 1,45 – 1,47 Тл эти потери составляют 15 – 20 % от основных потерь $P_{ст}$.

По сравнению с номинальной мощностью трансформатора мощность холостого хода P_x невелика (Работа №1, с. 353, сл.), и тем не менее она имеет очень важное эксплуатационное значение. Это объясняется тем, что, как будет показано дальше (разд. 15.6, с. 272, сл.), потери в стали почти не зависят от нагрузки трансформатора, т. е. они имеют место все время, пока трансформатор включен на сеть, независимо от того, нагружен трансформатор, или он работает вхолостую. Так как силовые трансформаторы отключаются от сети только в редких случаях и трансформация электроэнергии обычно происходит в несколько ступеней (например, от Волховской ГЭС к потребителю в Санкт-Петербурге в три – четыре ступени), то потери в стали, если не принять мер к их ограничению, могут существенно ухудшить работу энергосистемы.

12.4. Опыт холостого хода

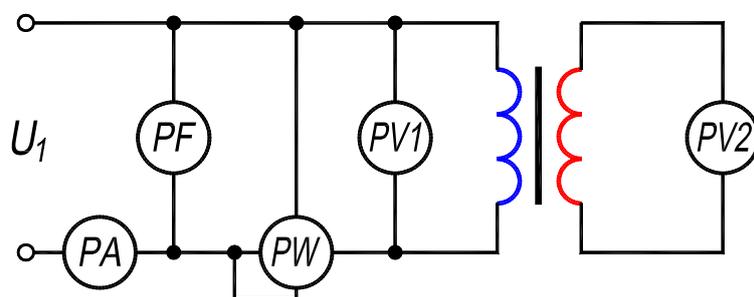


Рис. 12.3. Схема для опыта холостого хода трансформатора

Опыт производится по схеме рис. 12.3. Обычно синусоидальное напряжение подводится к обмотке низшего напряжения. Посредством вольтметров PV_1 и PV_2 , амперметра PA и ваттметра PW измеряется первичное

и вторичное напряжения U_1 и U_{2x} , ток холостого хода I_x и мощность холостого хода P_x ; частотомер PF служит для контроля частоты. Если изменять U_1 от нуля до 1,1 номинального значения, то можно получить ряд значений I_x и P_x и по ним построить характеристики холостого хода трансформатора $I_x, P_x = f(U_1)$, которые приведены на рис. 12.4.

Зависимость $I_x = f(U_1)$ при малых значениях U_1 носит прямолинейный характер вследствие постоянства магнитной проводимости сердечника, затем, начиная с $(0,6 - 0,8)U_{1ном}$ наблюдается значительное увеличение тока I_x , так как магнитная проводимость уменьшается. Зависимость $P_x = f(U_1)$ имеет параболический характер, так как, согласно формуле (12.11), $P_x \equiv E_1^2$, а при холостом ходе $E_1 \approx U_1$, следовательно, $P_x \equiv U_1^2$.

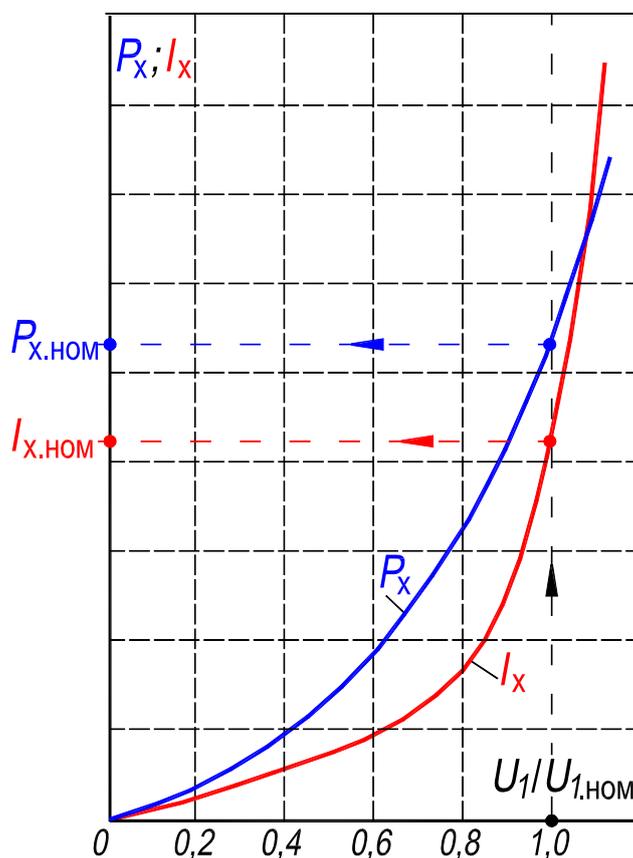


Рис. 12.4. Зависимость тока и мощности от напряжения при холостом ходе трансформатора

Построенные характеристики используются для определения значения тока холостого хода I_x и мощности P_x соответствующих номинальному напряжению $U_{1ном}$.

Из опыта холостого хода может быть определен также коэффициент трансформации k трансформатора, равный отношению ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения. Если обмотка высшего напряжения является первичной, а обмотка низшего напряжения – вторичной, то, согласно уравнениям (12.7) и (12.8)

$$k = E_1/E_2 = (4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m)/(4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m) = w_1/w_2. \quad (12.12)$$

Так как при холостом ходе $E_1 \approx U_1$ и $E_2 = U_{2x}$, то

$$k = E_1/E_2 \approx U_1/U_{2x}, \quad (12.13)$$

т. е. коэффициент трансформации однофазного трансформатора определяется отношением количества витков обмоток высшего и низшего напряжения или отношением напряжений на зажимах его обмоток при холостом ходе.

Холостой ход трёхфазного трансформаторов исследуется в Работе № 1 (с. 353,сл.).

13. Магнитные системы и способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Холостой ход трехфазного трансформатора

13.1. Магнитные системы трехфазных трансформаторов

Трехфазный трансформатор может быть образован из трех однофазных (рис. 9.2, с. 170), если их обмотки определенным образом соединить между собой (например, обе обмотки *звездой*). Такой трансформатор называют трансформаторной группой или *групповым трансформатором*. Однако можно выполнить трехфазный *трансформатор с общей магнитной системой* для трех фаз с тремя стержнями, или так называемый *трёхстержневой трансформатор* (рис. 9.3, с. 171).

Группа из трех однофазных трансформаторов несколько дороже трехфазного трансформатора на ту же мощность, имеет несколько более низкий КПД и занимает больше места, хотя каждый однофазный трансформатор группы (так называемая «фаза») меньше по габаритам и по весу, чем трёхстержневой трансформатор на полную мощность группы, что имеет большое значение при установке и перевозке мощных единиц. Кроме того, при группе однофазных трансформаторов в качестве резерва обычно достаточно иметь всего одну фазу (треть мощности группы), так как повреждение одновременно двух фаз трансформатора маловероятно. При трехфазном трансформаторе приходится иметь в резерве другой трансформатор на полную мощность. Таким образом, групповой трансформатор имеет преимущества при больших мощностях, где условия перевозки и надежность при эксплуатации имеют особенно важное значение. Наоборот, трансформаторы средней и особенно малой мощности выполняются главным образом как трёхстержневые. В РФ трёхстержневые трансформаторы стандартизованы на мощности до 60 000 кВ·А, а групповые – начиная с мощности 3х600 кВ·А и выше.

В отношении магнитной системы разница между групповым и трёхстержневым трансформатором та, что магнитные цепи первого совершенно независимы друг от друга, тогда как у второго они связаны. Пути магнитного потока в каждом трансформаторе показаны на рис. 9.2 и 9.3 штриховыми линиями.

В групповом трансформаторе длины магнитных цепей всех трех фаз одинаковы, тогда как в трехстержневом – различны, причем магнитная проводимость для потоков крайних фаз меньше, чем для средней. Так как к фазам трансформатора подводятся нормально симметричные напряжения, т. е. равные по величине и сдвинутые на 120° , то ЭДС E_1 и, следовательно, магнитные потоки всех трех фаз тоже симметричны. Поэтому магнитодвижущие силы этих фаз и, стало быть, намагничивающие токи I_x трехстержневого трансформатора образуют несимметричную систему, а именно, токи двух крайних фаз A и C больше, чем ток средней фазы B . В групповом трансформаторе такой асимметрии нет, так как все три фазы имеют одинаковые магнитные цепи (см. Работа №1, с. 353, сл.).

Асимметрия токов холостого хода трехстержневого трансформатора не имеет большого практического значения, так как уже при очень небольшой нагрузке она сглаживается.

13.2. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов и их обозначения

Каждая из обмоток трансформатора как первичная, так и вторичная, может быть соединена звездой или треугольником. При соединении звездой концы обмоток образуют общую точку (рис. 13.1,*a*). При соединении треугольником начало первой фазной обмотки соединяется с концом третьей, начало второй – с концом первой и начало третьей – с концом второй (рис. 13.2,*a*). В первом случае все начала, а во втором случае общие точки обмоток присоединяются к сети. Кроме того, обмотка низшего напряжения масляных трансформаторов средней мощности может иметь соединение зигзаг, при котором каждая фаза вторичной обмотки располагается на двух различных стержнях, по половине общего количества витков фазы на каждом стержне (рис 13.3,*a*).

Следует отметить, что понятия начала и конца обмоток условны, однако они необходимы для правильного соединения фазных обмоток. В трехфазных трансформаторах положительному направлению тока от начала к концу обмотки должно соответствовать определенное направление магнитного потока в стержнях; в стержневых трансформаторах это направление должно быть одинаковым (рис. 9.3, с. 171).

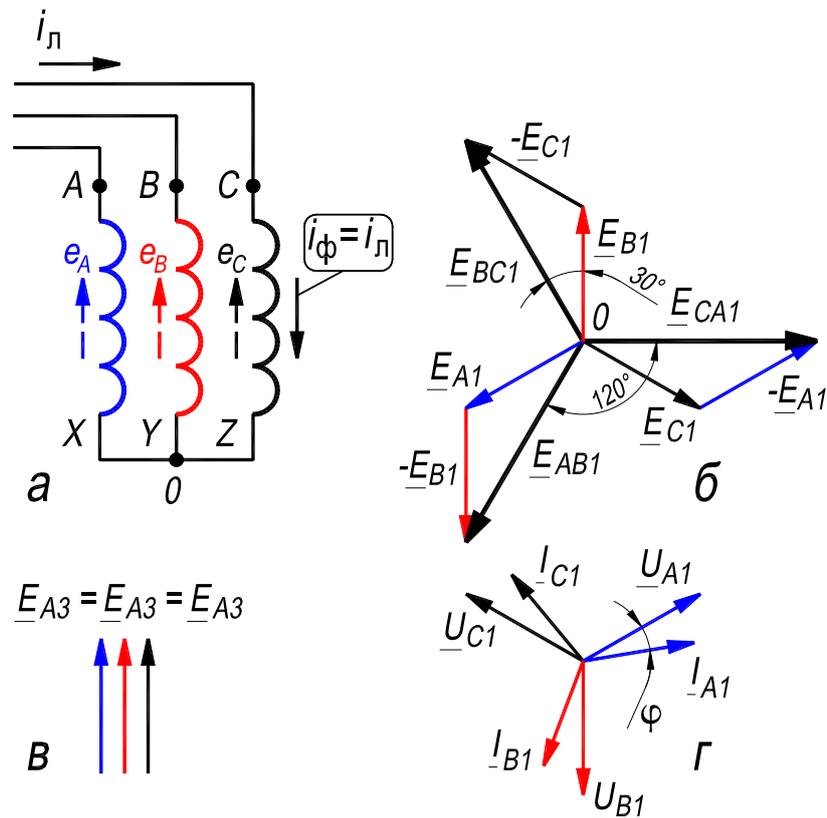


Рис. 13.1. Соединение обмоток звездой: а – схема, б – векторы ЭДС \underline{E}_1 , в – векторы ЭДС \underline{E}_3 , г – векторы напряжений и токов

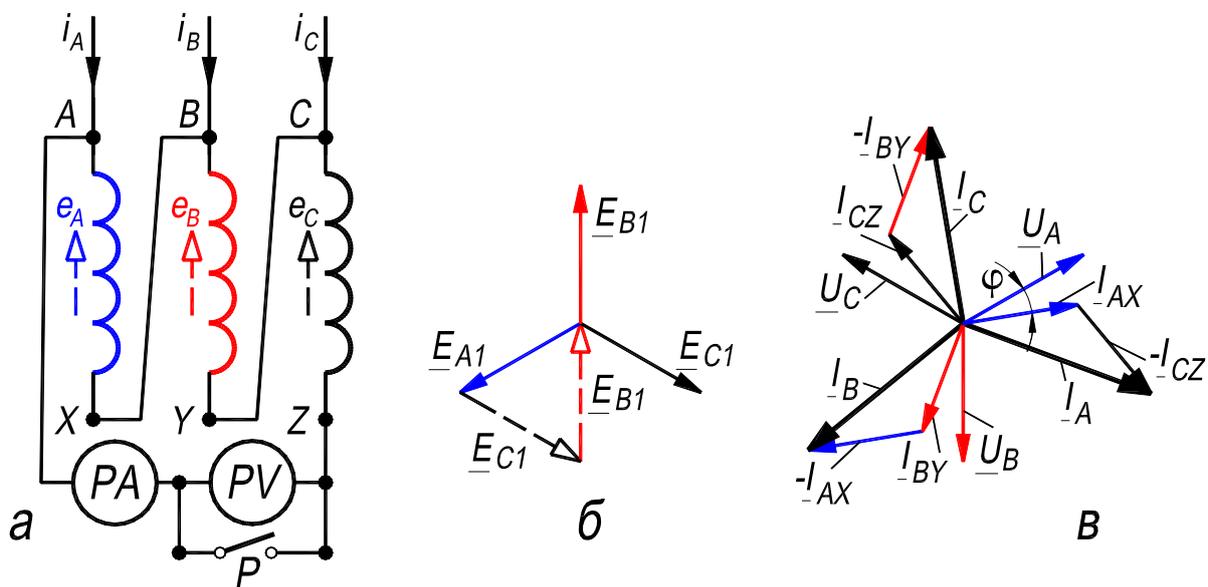


Рис. 13.2. Соединение обмоток треугольником: а – схема, б – векторы ЭДС \underline{E}_1 , в – векторы токов

Начала фазных обмоток высшего напряжения было принято обозначать согласно устаревшей маркировке прописными буквами A, B и C , а концы их – буквами X, Y и Z , причем для обмотки фазы используются буквы $A-X, B-Y$ и $C-Z$

Начала и концы обмоток низшего напряжения было принято обозначать согласно устаревшей маркировке соответственно строчными буквами: a, b, c и x, y, z . В дальнейшем, для краткости, каждой фазе приписывается буква начала её обмотки.

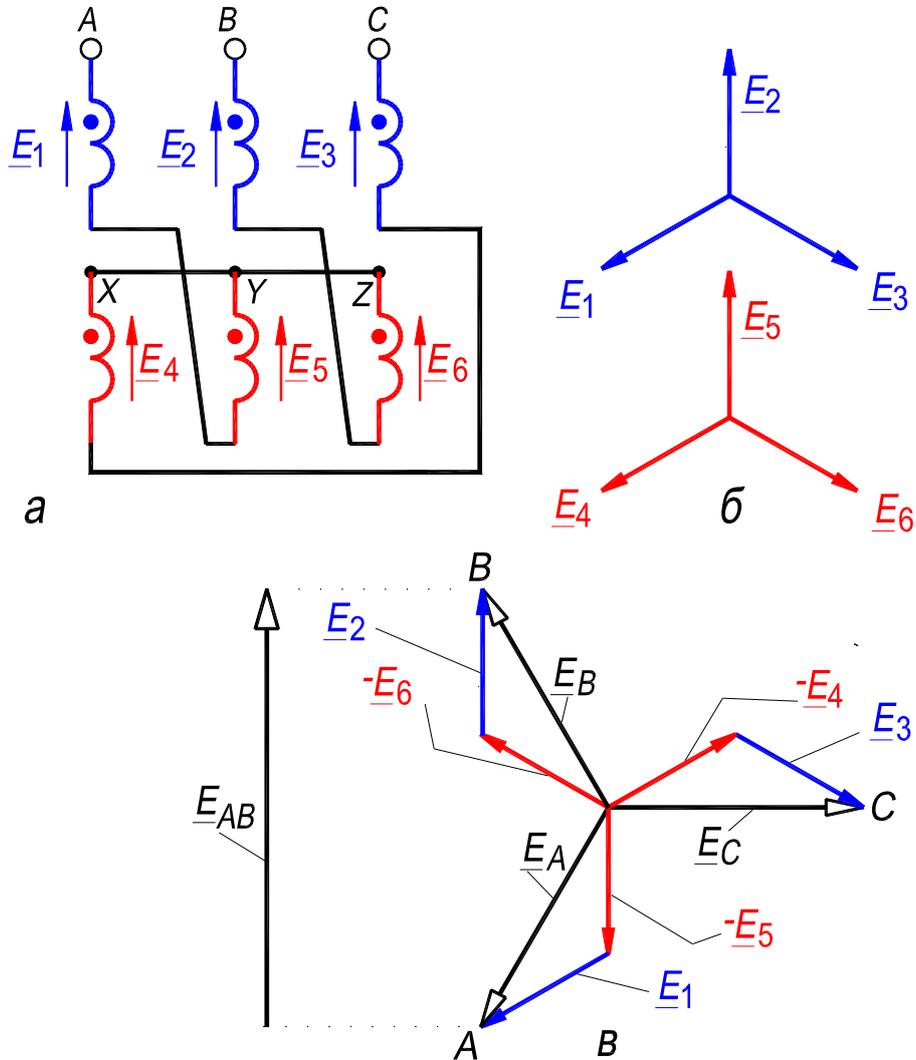


Рис 13.3. Соединение обмоток зигзагом:
 a – схема; b – звезды векторов ЭДС полуфаз;
 v – векторная диаграмма ЭДС схемы обмотки зигзаг

Согласно новой маркировке (ГОСТ 11677-85) при обозначении фаз и их зажимов используются прописные буквы U, V, W (разд. 4 и рис. 4.1, с. 150). В книге сохранена прежняя маркировка с целью совместимости с изданными ранее книгами и в связи с более простым представлением её на рисунках (рис. 13.1 – 13.3).

Соединение обмоток в звезду обозначается знаком Y и буквой Y , соединение в треугольник – знаком Δ и буквой Δ , соединение зигзаг – буквой Z и знаком ⋈ . Сначала указывают соединение обмотки высшего напряжения, а затем

через наклонную черту – обмотки низшего напряжения. Для обозначения обмотки, соединенной в звезду с выведенной нейтральной точкой, применяется знак Y или буква U_n , а для вывода нейтральной точки обмоток – N .

Ниже приводятся основные закономерности трехфазных ЭДС и токов. В общем случае ЭДС и токи трехфазной обмотки не синусоидальны. Здесь рассматриваются только первая и третья гармонические ЭДС и тока, так как в работе трехфазного трансформатора они имеют наибольшее значение. Под первой гармонической ЭДС или тока понимают синусоиду, имеющую основную частоту и, следовательно, период $T = 1/f$. Третья гармоническая ЭДС или тока имеет частоту $f_3 = 3f$ и период $T_3 = 1/f_3$ (см. рис. 13.8, с. 238).

А. Соединение трехфазной обмотки звездой. На рис. 13.1,а представлена схема соединений первичной обмотки трансформатора звездой. Под действием приложенного напряжения u_1 в обмотках протекает ток i_1 , возникает магнитный поток Φ и наводится ЭДС, первые гармонические которой в фазах будут:

$$e_{A1} = E_{m1} \sin \omega t, \quad (13.1a)$$

$$e_{B1} = E_{m1} \sin (\omega t - 120^\circ), \quad (13.1б)$$

$$e_{C1} = E_{m1} \sin (\omega t - 240^\circ). \quad (13.1в)$$

Действующие значения этих ЭДС изображаются тремя векторами \underline{E}_{A1} , \underline{E}_{B1} и \underline{E}_{C1} , сдвинутыми относительно друг друга на $2\pi/3$ и образующими симметричную трёхлучевую звезду (рис. 13.1,б).

Чтобы определить линейные ЭДС, нужно иметь в виду, что, обходя любой из трех контуров, образуемых звездой, например контур $(A - X) - (Y - B)$, перемещаются по обмотке A от ее начала A к концу X , а по обмотке B – от ее конца Y к началу B , т. е. изменяют направление обхода обмотки B относительно обмотки A . В этом случае производится вычитание векторов; так, например, чтобы получить линейную ЭДС \underline{E}_{AB1} , нужно повернуть вектор \underline{E}_{B1} на 180° и провести вектор $-\underline{E}_{B1}$ из конца вектора \underline{E}_{A1} . Точно так же $\underline{E}_{BC1} = \underline{E}_{B1} - \underline{E}_{C1}$ и $\underline{E}_{CA1} = \underline{E}_{C1} - \underline{E}_{A1}$.

Из рис. 13.1,б следует, что векторы линейных ЭДС опережают векторы фазных ЭДС на угол 30° , а линейная ЭДС трехфазной системы

$$\underline{E}_{л1} = \underline{E}_{\phi 1} \sqrt{3}. \quad (13.2)$$

Для третьей гармонической ЭДС можно написать:

$$e_{A3} = E_{m3} \sin 3\omega t, \quad (13.3a)$$

$$e_{B3} = E_{m3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = E_{m3} \sin 3\omega t, \quad (13.3б)$$

$$e_{C3} = E_{m3} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = E_{m3} \sin 3\omega t. \quad (13.3в)$$

Из этих уравнений следует, что третьи гармонические во всех фазах в любой момент времени равны между собой, т. е. направлены к нейтральной точке N или от нее. Действующие значения этих ЭДС изображаются тремя векторами \underline{E}_{A3} , \underline{E}_{B3} и \underline{E}_{C3} , совпадающими по фазе (рис. 13.1,в). Поэтому по каждому из трех образованных звездой контуров, а именно $(A - X) - (Y - B)$, $(B - Y) - (Z - C)$ и $(C - Z) - (X - A)$, третьи гармонические ЭДС взаимно уравновешиваются. Следовательно, при соединении обмотки звездой в линейном напряжении нет третьей гармонической ЭДС

Сказанное справедливо и для всех гармонических, кратных трем: девятой, пятнадцатой и т. д.

Все сказанное относительно ЭДС справедливо и для напряжения, только нужно иметь в виду, что в первичной обмотке трансформатора ЭДС и напряжение сдвинуты по отношению друг к другу почти на половину периода. Звезда векторов первой гармонической напряжения изображена на рис. 13.1,г.

При соединении обмоток звездой фазные токи являются одновременно и линейными (рис. 13.1,а); поэтому

$$I_{л} = I_{ф}. \quad (13.4)$$

Так как третьи гармонические отсутствуют в линейном напряжении, то они отсутствуют так же и в линейном (и фазном) токе.

Если все три обмотки равномерно нагружены током $I_{ф1}$, смещенным относительно напряжения $U_{ф1}$ на угол φ , то мощность трехфазной системы будет:

$$P = 3U_{ф1}I_{ф1} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{л1}I_{л1} \cos \varphi. \quad (13.5)$$

Б. Соединение трехфазной обмотки треугольником. Схема соединения представлена на рис. 13.2,а. Первые гармонические фазных ЭДС этих обмоток образуют, так же как при соединении обмоток звездой, симметричную трехлучевую звезду векторов \underline{E}_{A1} , \underline{E}_{B1} и \underline{E}_{C1} (рис. 13.2,б). При соединении обмоток треугольником образуется замкнутый контур, который нужно

обходить в одном направлении – от начала к концу каждой обмотки; поэтому для выяснения действия ЭДС e_{A1} , e_{B1} и e_{C1} по замкнутому контуру треугольника, нужно векторы этих ЭДС геометрически сложить. Такое сложение, показано на рис. 13.2,б штриховыми линиями и из него следует, что сумма всех трех ЭДС равна нулю, или, другими словами, при соединении обмоток треугольником первые гармонические фазных ЭДС в замкнутом контуре треугольника находятся во взаимном равновесии.

Третьи гармонические ЭДС действуют в замкнутом контуре треугольника все в одном направлении (см. рис. 13.1,в), либо от начала каждой фазной обмотки к ее концу, либо в обратном направлении. Сумму этих ЭДС можно измерить, если разомкнуть какой-нибудь узел треугольника, например узел $A - Z$ (рис. 13.2,а) и в рассечку включить вольтметр PV .

Под действием ЭДС $\underline{E}_{Az} + \underline{E}_{Bz} + \underline{E}_{Cz}$ в замкнутом контуре треугольника течет ток третьей гармонической I_3 , который можно измерить амперметром PA при замкнутом рубильнике P .

Между каждыми двумя линейными проводами, отходящими от зажимов A, B, C , действуют соответствующие первые гармонические фазных ЭДС. Таким образом, при соединении обмоток треугольником

$$E_{л1} = E_{ф1}. \quad (13.6)$$

Третьи гармонические ЭДС E_3 в линейных напряжениях не появляются, так как в замкнутом треугольнике они целиком затрачиваются на преодоление падения напряжения от тока I_3 . Это же относится и ко всем гармоническим, кратным трем: девятой, пятнадцатой и т. д.

Первые гармонические линейных токов I_A, I_B и I_C определяются, согласно первому закону Кирхгофа. Так, например, от узла A течет ток I_{AX} и подходит ток I_{CZ} . Следовательно, $\underline{I}_A = \underline{I}_{AX} - \underline{I}_{CZ}$, т. е. чтобы получить линейный ток \underline{I}_A , нужно произвести вычитание векторов \underline{I}_{AX} и \underline{I}_{CZ} . Соответствующая векторная диаграмма построена на рис. 13.2,в. Из диаграммы следует, что

$$\underline{I}_{л1} = \underline{I}_{ф1} \sqrt{3}. \quad (13.7)$$

Мощность системы при соединении обмоток треугольником составляет:

$$P = 3U_{ф1}I_{ф1}\cos \varphi = \sqrt{3}U_{л1}I_{л1}\cos \varphi, \quad (13.8)$$

где φ – угол между $U_{ф1}$ и $I_{ф1}$.

В. Соединение трехфазной обмотки зигзагом. В соответствии с ГОСТ 11677-85 применяется также соединение обмоток по схеме зигзага (рис. 13.3,*а*), когда фаза обмотки разделяется на две части (на две полуфазы с одинаковым числом витков в каждой), которые располагаются на разных стержнях и соединяются последовательно и встречно (то есть соединяются одноимёнными зажимами, конец с концом; начала полуфаз обозначены знаком «•»). В этом случае ЭДС фазы будет в $\sqrt{3}$ раза больше (рис. 13.3,*б*), чем ЭДС полуфазы (при согласном включении ЭДС фазы будет равна ЭДС полуфазы). Однако при встречном включении половин обмотки ЭДС фазы ($E_A = \sqrt{3} \cdot E_1$) будет все же в $2/\sqrt{3} = 1,15$ раза меньше, чем при расположении обеих половин на одном стержне ($E_A = 2 \cdot E_1$). Поэтому расход обмоточного провода при соединении зигзагом увеличивается на 15 % по сравнению со схемой звезда при равных фазных напряжениях, $E_{ф.У} = E_{ф.З}$. Соединение зигзаг используется в случаях, когда возможна неравномерная нагрузка фаз с наличием токов нулевой последовательности (см. Работа №3, с.398,сл.).

Г. Группа соединений обмоток трансформатора. Большое эксплуатационное значение при включении трансформаторов на параллельную работу имеет взаимное направление векторов первичной и вторичной ЭДС; поэтому, кроме указания соединения первичной и вторичной обмоток, вводится обозначение угла между этими векторами.

На рис. 13.4,*а* представлена одна фаза трансформатора, в котором первичная обмотка A – высшего напряжения, а вторичная a – низшего напряжения. По условию обе обмотки намотаны в одну и ту же сторону и их верхние зажимы A и a приняты за начала, а нижние зажимы X и x – за концы обмоток. Так как обе обмотки располагаются на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же потоком, то наводимые в этом случае в обмотках ЭДС имеют в любой момент времени одинаковое относительно зажимов обмоток направление, например от конца X к началу A в одной обмотке и от конца x к началу a – в другой. Соответственно этому ЭДС на зажимах обмоток \underline{E}_1 и \underline{E}_2 совпадают по фазе и изображаются двумя векторами XA и xa , одинаково направленными.

Если обмотки намотаны в разные стороны (рис. 13.4,*б*), но сохраняют то же обозначение зажимов, что и на рис. 13.4,*а*, то ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 относительно начала обмоток направлены в разные стороны, например от X к A

и от a к x . Соответственно этому, ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 должны быть изображены векторами XA и xa , направленными в противоположные стороны.

Такое же расположение векторов может быть получено путем изменения обозначения концов и при одинаковом направлении намотки катушек (рис. 13.4,в). Таким образом, угол сдвига фазной вторичной ЭДС относительно первичной зависит от направления намотки обмоток и от принятого обозначения зажимов обмоток (маркировки). При расположении обмоток на одном стержне этот угол может быть или равным нулю, или 180° .

Угол сдвига линейной ЭДС трёхфазного трансформатора будет зависеть еще от способа соединения фазных обмоток.

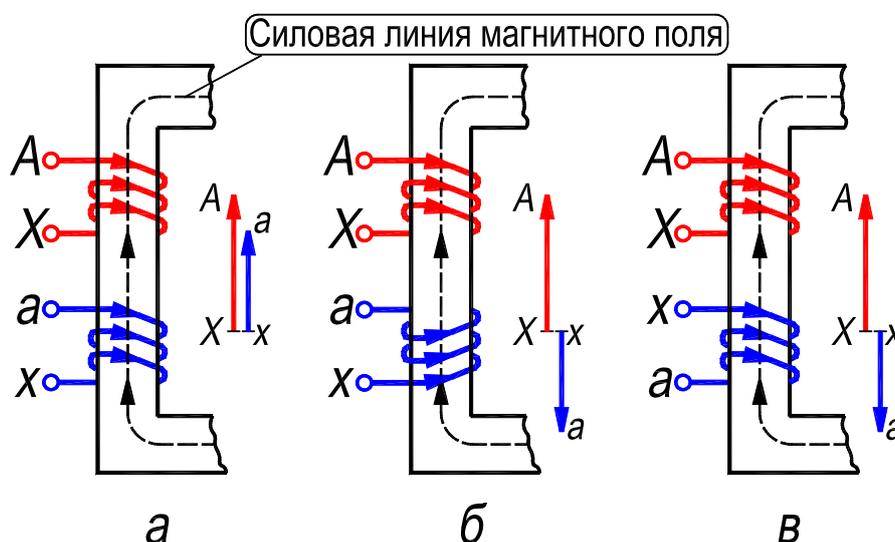


Рис. 13.4. Угол сдвига векторов ЭДС в зависимости от направления намотки и обозначения зажимов: a и $в$ – направления намотки совпадают, $б$ – направления намотки встречные

Пусть обе обмотки трансформатора соединены звездой, намотаны в одну и ту же сторону и имеют одинаковые обозначения зажимов, согласно схеме на рис. 13.5,а. Обмотка высшего напряжения по прежнему принята первичной, а обмотка низшего напряжения – вторичной. Системы линейных и фазных первичных и вторичных ЭДС предполагаются симметричными. Так как вторичная обмотка как бы повторяет собой первичную, то треугольник abc вторичных линейных ЭДС и звезда Oa , Ob и Oc вторичных фазных ЭДС совпадают соответственно по фазе с треугольником ABC и звездой OA , OB и OC линейных и фазных первичных ЭДС (рис. 13.5,б), и угол сдвига вторичной линейной ЭДС относительно первичной равен нулю.

На практике принято выражать этот угол не в градусах, а в более крупных условных единицах, равных 30° каждая. Совпадающим по фазе векторам соответствует угол равный нулю и в условных угловых единицах. Полученная группа соединения обмоток обозначается следующим образом: $Y/Y-0$.

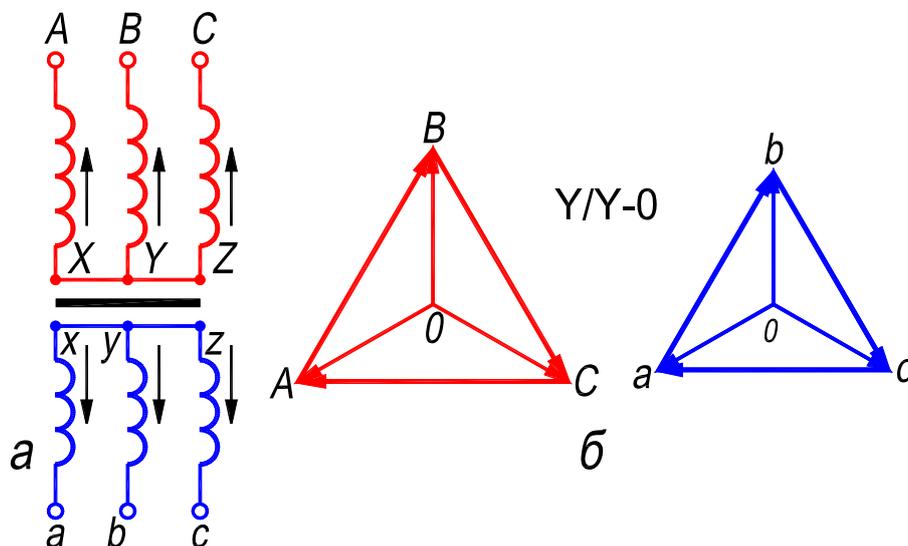


Рис. 13.5. Диаграммы линейных и фазных ЭДС в группе соединений обмоток $Y/Y-0$: a – схема, b – векторная диаграмма

При обмотках, намотанных в противоположных направлениях (рис. 13.6, a), векторы вторичных фазных и линейных ЭДС должны быть повернуты на 180° относительно положения их на рис. 13.5, b , и тогда угол между вторичными и первичными линейными ЭДС равен шести условным угловым единицам (рис. 13.6, b). Полученная группа соединения обмоток обозначается $Y/Y-6$.

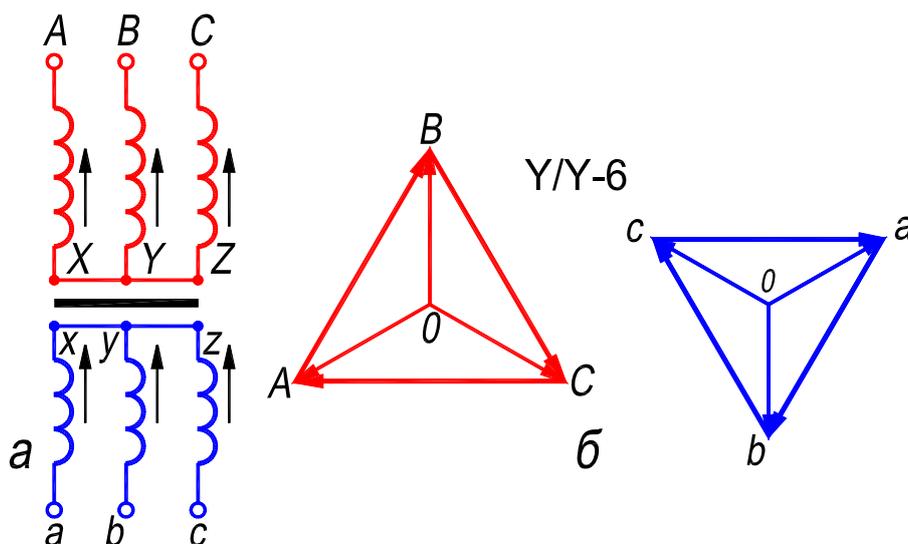


Рис. 13.6. Диаграммы линейных и фазных ЭДС в группе соединений обмоток $Y/Y-6$: a – схема, b – векторная диаграмма

Если изменить маркировку зажимов вторичной обмотки, то можно получить ряд других групп: Y/Y-2; Y/Y-4 и т. д. (см. Работа №2, с. 372,сл.).

На рис. 13.7,*а* представлены обмотки трансформатора, из которых первичная соединена звездой, а вторичная – треугольником по схеме $ax - cz - by$. Обмотки намотаны в одну и ту же сторону. В этом случае фазные ЭДС полностью совпадают с рис. 13.5,*б*. ЭДС между зажимами *A* и *B* равна линейной ЭДС $\underline{E}_{AB} = \underline{E}_B - \underline{E}_A$, которая отстает от фазной ЭДС \underline{E}_B на 30° ; ЭДС между зажимами *ab* равна фазной ЭДС \underline{E}_b (рис. 13.7,*б*). Из сопоставления треугольников *ABC* и *abc* видно, что угол между векторами соответствующих вторичных и первичных линейных ЭДС равен 330° , т. е. 11 условных угловых единиц, следовательно, данная группа соединения обмоток должна иметь обозначение: Y/Δ-11.

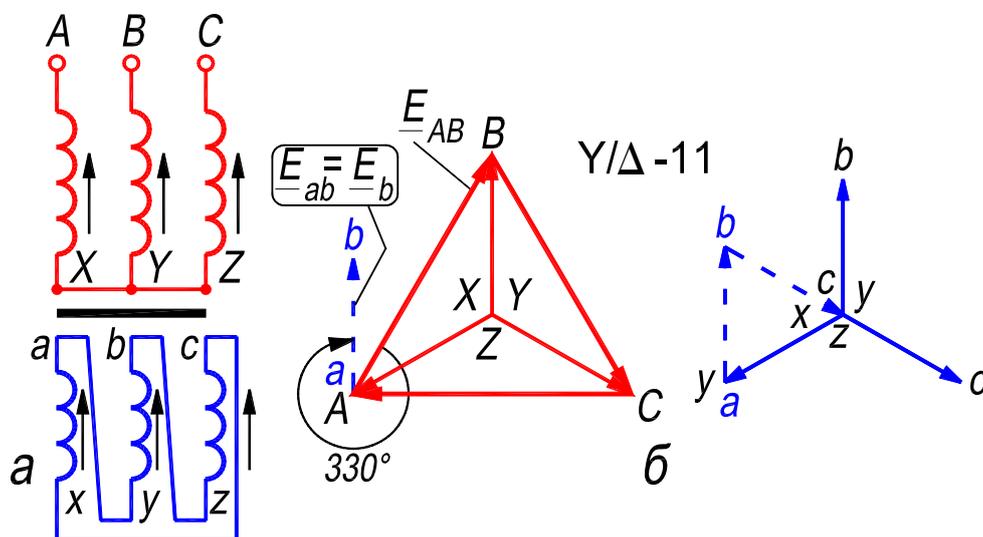


Рис. 13.7. Диаграмма линейных и фазных ЭДС в группе соединений обмоток Y/Δ-11:
а – схема, *б* – векторная диаграмма

Если бы обмотки были намотаны в противоположные стороны, но маркировка зажимов осталась прежняя, то треугольник *abc* повернулся бы относительно положения, которое он занимает на рис. 13.7,*б*, на 180° . В этом случае угол между вектором *AB* и вектором *ab* был бы 150° , соответственно, чему группа соединения обозначалась бы: Y/Δ-5. Если вторичная обмотка соединена треугольником по схеме $ax - by - cz$, то при одинаковом направлении намотки получается группа соединений Y/Δ-1.

Согласно ГОСТ 11677-85, приняты следующие группы соединений трехфазных трансформаторов:

Y/Y_H-0, Y_H/Y-0, Y/Δ -11, Y_H/Δ-11, Y/Z_H-11, Δ/Y_H -11, Δ/Δ -0.

Группы соединения обмоток исследуются в Работе № 2 (с. 372,сл.).

13.3. Холостой ход трансформатора при соединении обмоток Y/Y

При изучении режима холостого хода однофазного трансформатора было установлено, что при подведенном синусоидальном напряжении первичная ЭДС и основной поток также синусоидальны, а ток содержит наряду с первой гармонической сильно выраженную третью гармоническую (см. рис. 12.2,а и б, с. 218).

Если обмотки трехфазного трансформатора соединены звездой, то третьи гармонические в любой момент времени равны между собой и направлены одновременно к нейтральной точке или от нее (см. рис. 13.1), для третьих гармонических тока холостого хода не существует путей, по которым они могли бы замыкаться. Отсутствие третьей гармонической в кривой тока холостого хода искажает форму магнитного потока и это по-разному сказывается в трансформаторах с независимой и связанной магнитными системами.

Ниже рассматривается холостой ход трехфазной трансформаторной группы. На рис. 13.8,а изображены ток i_x и поток Φ при наличии третьей гармонической i_{x3} , а на рис. 13.8,б – при отсутствии i_{x3} в токе i_x . Выпадение третьей гармонической i_{x3} можно представить себе как наложение на ток i_x на рис. 13.8,а третьей гармонической, но обратно направленной, т. е. наложение $-i_{x3}$. Соответственно, на синусоидальный поток Φ_1 нужно наложить поток Φ_3 , создаваемый током i_{x3} (линии красного цвета на рис. 13.8,б). Результирующий поток Φ становится уплощенным или даже седлообразным. Так как в групповом трансформаторе магнитные цепи независимы, то третья гармоническая потока, так же как и первая, замыкается по сердечнику (рис. 9.1, с. 169), вследствие чего амплитуда Φ_3 достигает значительной величины 15 – 20 % от Φ_1 .

Каждая составляющая потока создает ЭДС, отстающую от соответствующего потока на четверть периода (рис. 13.8,в). При обычном насыщении стали третья гармоническая ЭДС e_3 достигает 45 – 60 % от первой гармонической ЭДС e_1 . При этом, как видно из рис. 13.8,в, амплитуды этих гармонических складываются, что повышает на те же 45 – 60 % наибольшее значение фазной ЭДС и на 10 – 17 % ее действующее значение. Такое повышение ЭДС нежелательно и в ряде случаев опасно. Поэтому в групповых трансформаторах соединение Y/Y, как правило, не применяется.

С ростом насыщения стали магнитопровода амплитуды третьих гармонических увеличиваются (Работа №4, с. 418,сл.).

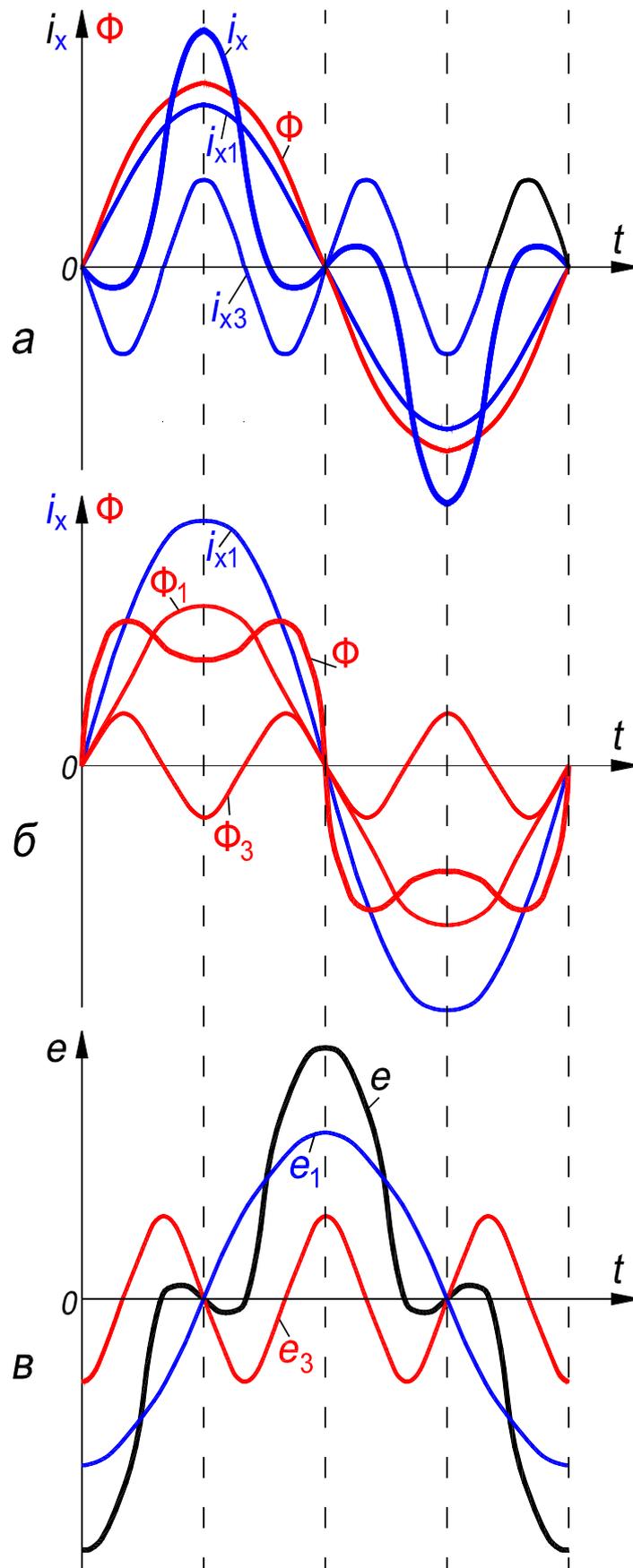


Рис. 13.8. Первая и третьи гармонические:
 а – тока холостого хода; б – магнитного потока; в – ЭДС

Несмотря на резкое искажение формы фазных ЭДС, линейные ЭДС остаются синусоидальными, так как при соединении обмоток звездой третьи гармонические не появляются в линейной ЭДС

Иначе обстоит дело в трёхстержневых трансформаторах, в которых магнитные цепи фаз связаны между собой. Третьи гармонические потока во всех трех фазах, так же как и токи, совпадают во времени; это значит, что третьи гармонические потоки в каждый момент времени равны друг другу по величине и в стержнях трансформатора направлены все в одну сторону, например вверх, как это показано на рис. 13.9. Следовательно, эти потоки не могут замыкаться через стержни, а должны частично проходить от ярма к ярму за пределами стержней (рис. 23.11, с. 433).

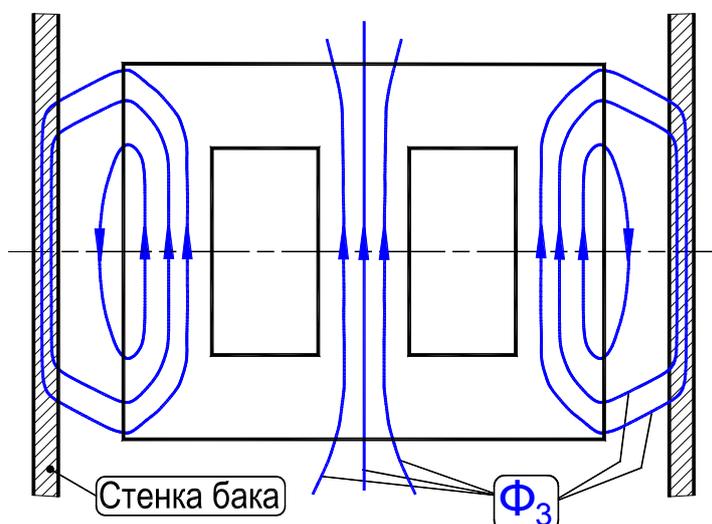


Рис. 13.9. Третьи гармонические Φ_3 потока трёхстержневого трансформатора при соединении обмоток Y/Y

Путь этот проходит по маслу, воздуху, стенкам бака, стяжным болтам и т. д. Этот путь обладает малой магнитной проводимостью, вследствие чего третья гармоническая потока выражена слабо и практически не искажает формы ЭДС. Но во всех металлических частях, по которым идет поток третьей гармонической, возникают вихревые токи, что может повести к чрезмерному нагреванию этих частей и понижает КПД трансформатора. Опыт показывает, что при значениях индукции в сердечнике (1,4 – 1,45) Тл эти добавочные потери составляют около 10 % от основных потерь холостого хода, но при увеличении индукции очень быстро растут.

Из сказанного следует, что соединение Y/Y имеет ограниченную область применения. Согласно ГОСТ 11920 – 85, это соединение применяется в трансформаторах мощностью до 2500 кВ·А включительно.

13.4. Холостой ход трансформатора при соединении обмоток Δ/Y или Y/Δ

Выше было установлено, что при соединении обмоток треугольником все три тока третьей гармонической текут в одном направлении (рис. 13.2,а). Но если в токе холостого хода имеется третья гармоническая, то форма магнитного потока и соответственно первичная и вторичная ЭДС приближаются к синусоиде, т. е. отпадают все те неблагоприятные явления, о которых было сказано в предыдущем разд. 13.3. Это составляет весьма ценное преимущество соединения обмоток Δ/Y перед соединением Y/Y .

При соединении обмоток Y/Δ , в противоположность соединению Δ/Y , треугольник выполнен на вторичной стороне, однако это не меняет существенно форму магнитного потока.

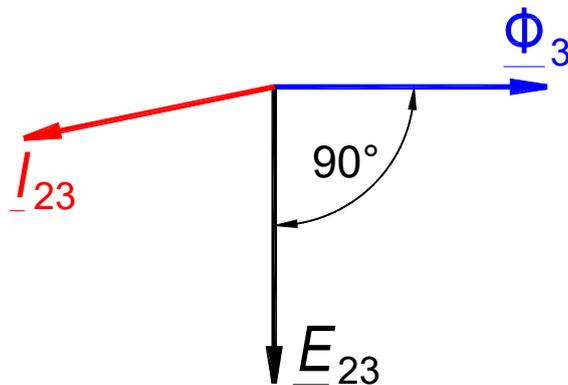


Рис. 13.10. Третья гармоническая магнитного потока и тока при соединении обмоток Δ/Y

Действительно, при соединении первичной обмотки звездой из тока холостого хода выпадает третья гармоническая, и поток приобретает уплощенную форму (рис. 13.8,б), соответственно чему возникает наряду с первой третьей гармонической потока Φ_3 . Эта гармоническая наводит в каждой из фаз вторичной обмотки третью гармоническую ЭДС e_{23} , отстающую от потока Φ_3 на четверть периода. В свою очередь ЭДС e_{23} создает во вторичной обмотке ток i_{23} , замыкающийся по вторичному треугольнику и отстающий от ЭДС e_{23} почти на четверть периода, так как контур вторичной обмотки имеет значительное индуктивное сопротивление. На рис. 13.10 показано взаимное расположение векторов потока Φ_3 , ЭДС E_{23} и тока I_{23} . Так как вектор тока I_{23} направлен почти встречно вектору потока Φ_3 , то создаваемый этим током магнитный поток уравновешивает поток Φ_3 ,

вследствие чего форма результирующего потока и соответственно ЭДС приближаются к синусоиде. Таким образом, соединение Y/Δ , так же как и соединение Δ/Y , предохраняет трансформатор от вредных воздействий третьих гармонических потока и ЭДС.

Потери при холостом ходе P_x – это потери в стали магнитопровода трансформатора. Ток холостого хода в силовых трансформаторах составляет 0,8 – 10 % от номинального значения $I_{\text{ном}}$. В трансформаторах 200 000 – 630 000 кВ·А ток холостого хода составляет 0,5 – 0,4 %. Поэтому электрические потери при холостом ходе в 10^2 – $5 \cdot 10^4$ раз меньше электрических потерь при номинальном режиме. Считают, что потери при холостом ходе – потери в стали.

Необходимо подчеркнуть, что третьи гармоники могут выполнять и полезную функцию, например, в умножителях частоты (Прил. П4.1, с. 495, сл.).

Исследование явлений, возникающих при намагничивании магнитопровода трансформатора (термин 50, с. 145) – Работа № 4 (с. 418, сл.).

14. Короткое замыкание трансформатора

14.1. Режимы короткого замыкания

Различают: 1) внезапное короткое замыкание трансформатора, происходящее в эксплуатационных условиях и сопровождающееся резкими всплесками тока, и 2) короткое замыкание трансформатора при его испытании (опыт к. з.) для получения необходимых данных короткого замыкания. В настоящем разд. 14 изучается второй тип короткого замыкания трансформаторов, тогда как первый рассматривается в разд. 17, с. 297, сл.

Кроме того, говоря о трехфазных трансформаторах, следует различать симметричное или трёхфазное короткое замыкание и несимметричные короткие замыкания: однофазное, двухфазное и двухфазное на нейтраль. Здесь прежде всего рассматривается симметричное короткое замыкание трехфазного трансформатора. Так как все три короткозамкнутые обмотки совершенно одинаковы, то при симметричном коротком замыкании в трансформаторе имеется система токов, равных по величине и сдвинутых относительно друг друга на $2\pi/3$. Асимметрия магнитных цепей в случае трёхстержневого трансформатора не имеет существенного значения, так как она касается только весьма небольшого намагничивающего тока. Поэтому достаточно рассмотреть короткое замыкание только одной фазы трехфазного трансформатора, распространив полученные выводы на две другие фазы.

14.2. Напряжение короткого замыкания

Чтобы ограничить ток короткого замыкания при испытании трансформатора, напряжение, подводимое к трансформатору, должно быть значительно уменьшено до такого значения $U_{1к}$, при котором в обмотках трансформатора токи равны номинальным. Если выразить это напряжение в процентном отношении от номинального напряжения соответствующей обмотки, приведя его к рабочей температуре $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, то получится так называемое напряжение короткого замыкания u_k . Таким образом,

$$u_k = 100 \cdot U_{1к} / U_{1ном}. \quad (14.1)$$

Напряжение короткого замыкания имеет важное значение и задаётся стандартом для силового трансформатора. Соответствующие примерные данные приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1. Значение напряжения короткого замыкания трансформаторов

Мощность, кВ·А	Номинальное напряжение, кВ	u_k , %
От 5 до 5600	6,3 и 10	5,5
От 5 до 2400	35	6,5
3200 и 4200	35	7,0
5600 – 10 000	35 – 38,5	7,5
15 000 – 40 500	100 – 121	10,5
60000	121	11,5

14.3. Физические условия работы трансформатора при симметричном коротком замыкании

Схема одной из фаз при симметричном трёхфазном коротком замыкании изображена на рис. 14.1. Здесь $A - X$ зажимы первичной обмотки, к которой подводится напряжение $U_{1к}$; $a - x$ – зажимы вторичной обмотки, замкнутой накоротко; l – линия основного потока Φ_k ; 2 и 3 – линии первичного потока рассеяния, создаваемого током i_1 и сцепленного только с первичной обмоткой; 4 и 5 – линии вторичного потока рассеяния, создаваемого током i_2 и сцепленного только со вторичной обмоткой. Так как потоки рассеяния проходят главным образом по маслу или воздуху, т. е. в среде с постоянной магнитной проницаемостью, то можно считать, что каждый из этих потоков пропорционален соответствующему току и совпадает с ним по фазе.

Основной поток наводит в первичной и вторичной обмотках трансформатора ЭДС $e_{1к}$ и $e_{2к}$, отстающие от потока Φ_k на четверть периода. Действующие значения этих ЭДС по формулам (12.7) и (12.8)

$$E_{1к} = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_{mk}, \quad (14.2a)$$

$$E_{2к} = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_{mk}, \quad (14.26)$$

где Φ_{mk} – амплитуда основного потока при коротком замыкании.

Поток $\Phi_{\sigma 1}$ рассеяния первичной обмотки наводит в ней ЭДС $e_{\sigma 1}$ рассеяния и поток $\Phi_{\sigma 2}$ наводит ЭДС $e_{\sigma 2}$ рассеяния во вторичной обмотке. Эти ЭДС отстают от соответствующих потоков на четверть периода,

а так как потоки рассеяния совпадают с вызвавшими их токами, то ЭДС рассеяния отстают от токов в обмотках на те же четверть периода.

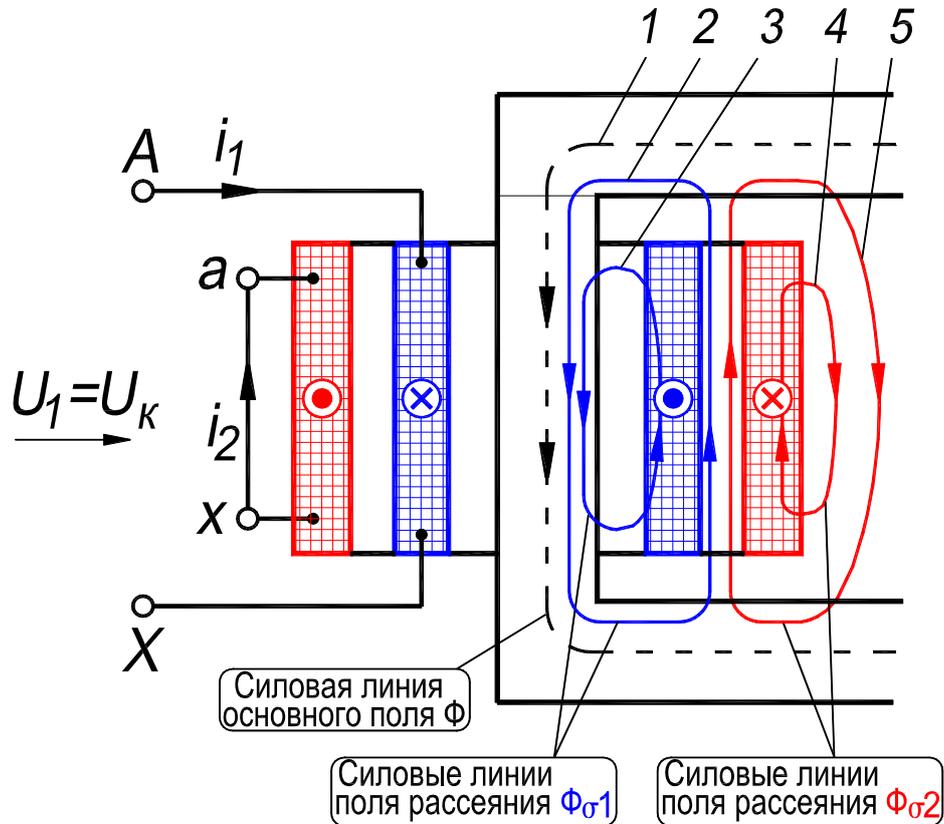


Рис. 14.1. Поток рассеяния в трансформаторе при коротком замыкании

Первичная обмотка с первичным потоком рассеяния и вторичная обмотка с вторичным потоком рассеяния представляют собой катушки с индуктивностями рассеяния $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$, которым соответствуют индуктивные сопротивления рассеяния

$$X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1} = 2\pi f L_{\sigma 1} \text{ и } X_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2} = 2\pi f L_{\sigma 2}.$$

Напряжения на индуктивных сопротивлениях в обмотках, вызванные потоками рассеяния,

$$i_1 X_{\sigma 1} = i_1 2\pi f L_{\sigma 1} \text{ и } i_2 X_{\sigma 2} = i_2 2\pi f L_{\sigma 2}$$

и их действующие значения

$$I_1 X_{\sigma 1} = I_1 2\pi f L_{\sigma 1} \text{ и } I_2 X_{\sigma 2} = I_2 2\pi f L_{\sigma 2}.$$

Напряжения на индуктивных сопротивлениях должны в любой момент времени уравновешивать ЭДС, наведенные потоками рассеяния (разд. 6.3, с. 156, сл.), следовательно,

$$I_1 X_{\sigma 1} = -E_{\sigma 1} \text{ и } I_2 X_{\sigma 2} = -E_{\sigma 2}.$$

Таким образом, напряжения на индуктивных сопротивлениях рассеяния обмоток опережают токи в этих обмотках на четверть периода. Соответственно векторы ЭДС, наводимых потоками рассеяния, отстают от векторов потоков на $\pi/2$, а векторы напряжения на индуктивных сопротивлениях рассеяния опережают соответственно векторы токов на $\pi/2$.

С учетом правил записи векторов, изображенных на комплексной плоскости, повороту вектора на угол $\pi/2$ в сторону опережения соответствует умножение этого вектора на j , а поворот на $\pi/2$ в сторону отставания – умножению на $-j$ (рис. 6.6, с. 160).

Векторы напряжений на индуктивном сопротивлении рассеяния имеют обозначения: $j\underline{I}_1 X_1, j\underline{I}_2 X_2$ и векторы ЭДС рассеяния соответственно

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -j\underline{I}_1 X_1, \quad (14.3a)$$

$$\underline{E}_{\sigma 2} = -j\underline{I}_2 X_2. \quad (14.36)$$

Напряжения на активных сопротивлениях R_1 и R_2 первичной и вторичной обмоток равны $i_1 R_1$ и $i_2 R_2$.

Векторы напряжений на активных сопротивлениях обмоток $\underline{I}_1 R_1$ и $\underline{I}_2 R_2$ совпадают по направлению с векторами токов в этих обмотках.

А. Уравнение напряжений и ЭДС первичной обмотки. В первичной обмотке, кроме приложенного напряжения $u_{1к}$, имеется ЭДС $e_{1к}$, наведенная основным магнитным потоком, ЭДС $e_{\sigma 1}$, наведенная потоком рассеяния первичной обмотки, и напряжение на активном сопротивлении обмотки, равное $i_1 R_1$.

Таким образом, при коротком замыкании трансформатора в первичной обмотке имеются те же напряжения и ЭДС, что и при холостом ходе, но другой величины. Поэтому уравнение (12.1) справедливо также и для режима короткого замыкания с соответствующей заменой обозначений векторов, т. е.

$$\underline{U}_{1к} = -\underline{E}_{1к} - \underline{E}_{\sigma 1} + \underline{I}_1 R_1. \quad (14.4)$$

Если, согласно уравнению (14.3a), заменить вектор ЭДС $\underline{E}_{\sigma 1}$ противоположно направленным векторам $-j\underline{I}_1 X_1$, то уравнение (14.4) примет вид:

$$\underline{U}_{1к} = -\underline{E}_{1к} + \underline{I}_1 R_1 + j\underline{I}_1 X_1. \quad (14.5)$$

Б. Уравнение напряжений и ЭДС вторичной обмотки. Во вторичной обмотке наводится ЭДС $e_{2к}$ основным магнитным потоком и ЭДС $e_{\sigma 2}$ – потоком рассеяния этой обмотки. Напряжение на активном сопротивлении равно $i_2 R_2$, напряжение на зажимах вторичной обмотки $u_2 = 0$.

По второму закону Кирхгофа получается следующее уравнение равновесия напряжений и ЭДС

$$e_{2к} + e_{\sigma 2} = i_2 R_2, \text{ или } e_{2к} = -e_{\sigma 2} + i_2 R_2,$$

а действующее значение ЭДС

$$\underline{E}_{2к} = -\underline{E}_{\sigma 2} + \underline{I}_2 R_2 = \underline{I}_2 R_2 + j \underline{I}_2 X_{\sigma 2}. \quad (14.6)$$

Таким вектор ЭДС $\underline{E}_{2к}$ имеет две составляющие: одна составляющая $\underline{I}_2 R_2$ расходуется на активном сопротивлении, вторая составляющая $j \underline{I}_2 X_{\sigma 2}$ – на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки.

В. Уравнение магнитодвижущих сил. Соотношение токов в обмотках трансформатора устанавливается на основании магнитной связи между обмотками. Ток первичной обмотки создает первичную магнитодвижущую силу $f_{1к} = i_1 w_1$ и ток вторичной обмотки создает вторичную магнитодвижущую силу $f_{2к} = i_2 w_2$. Магнитодвижущая сила $f_{1к}$ обеспечивает наличие магнитного потока Φ_k и уравновешивает размагничивающее действие вторичной обмотки, т. е. магнитодвижущую силу $f_{2к}$. Составляющая магнитодвижущей силы, необходимая для существования магнитного потока Φ_k , обозначается f_k , а составляющая тока первичной обмотки – i_k .

Амплитудные значения этих магнитодвижущих сил

$$F_{1к} = \sqrt{2} I_1 w_1, \quad (14.7а)$$

$$F_{2к} = \sqrt{2} I_2 w_2, \quad (14.7б)$$

$$F_k = \sqrt{2} I_k w_1. \quad (14.7в)$$

Напряжение $U_{1к}$ составляет несколько процентов от номинального напряжения $U_{1ном}$ (табл. 14.1, с. 243), в соответствии с этим также малы ЭДС $E_{1к}$ и поток Φ_k (14.2а). Таким образом, при коротком замыкании магнитодвижущей силой F_k можно пренебречь и считать, что $F_{1к}$ и $F_{2к}$ уравновешивают друг друга, т. е.

$$\underline{E}_{1к} + \underline{E}_{2к} = 0, \quad (14.8)$$

или

$$\sqrt{2}I_1w_1 + \sqrt{2}I_2w_2 = 0. \quad (14.9)$$

Уравнение (14.9) позволяет установить соотношение между действующими значениями первичного и вторичного тока

$$I_1/I_2 = w_2/w_1$$

или с учетом уравнения (12.12)

$$I_1 = I_2w_2/w_1 = I_2/k. \quad (14.10)$$

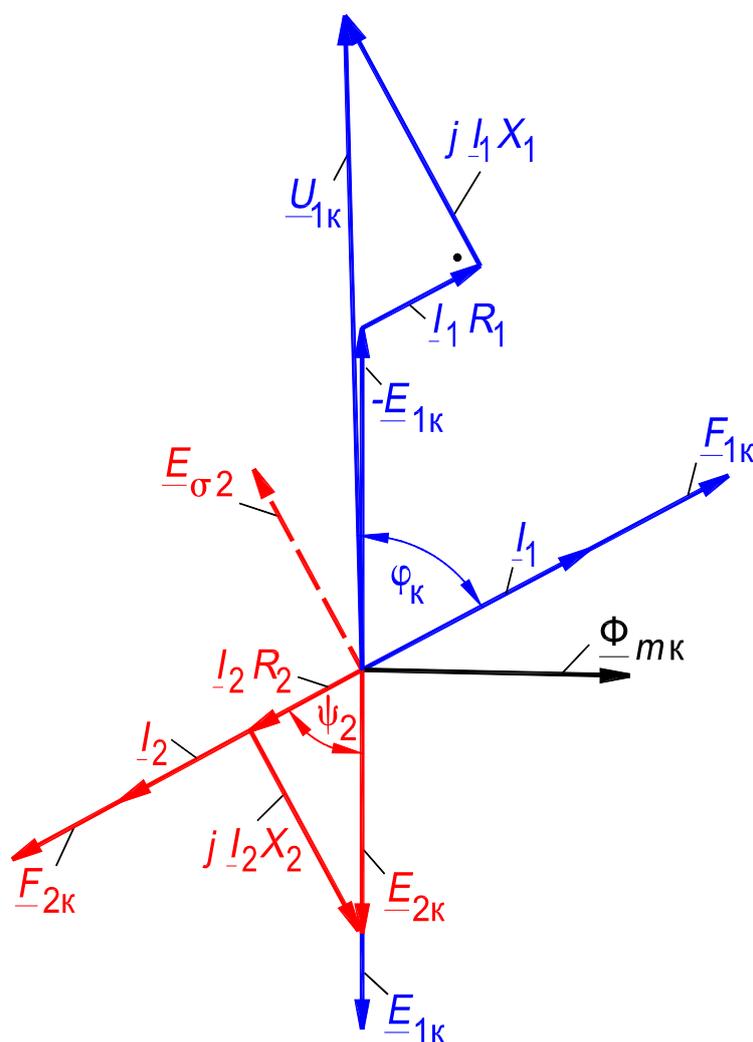


Рис. 14.2. Векторная диаграмма для трансформатора при коротком замыкании

Г. Векторная диаграмма. При построении векторной диаграммы вектор основного магнитного потока $\Phi_{тк}$ принято изображать в положительном направлении оси абсцисс (рис. 14.2). Векторы ЭДС $\underline{E}_{1к}$ и $\underline{E}_{2к}$ отстают от вектора магнитного потока на угол $\pi/2$. Вектор тока \underline{I}_2 отстает от вектора ЭДС $\underline{E}_{2к}$ на угол $\psi_2 = \arctg(X_2/R_2)$. Вектор $\underline{E}_{2к}$ магнитодвижущей

силы вторичной обмотки совпадает с вектором тока \underline{I}_2 . Поток $\Phi_{\sigma 2}$ рассеяния вторичной обмотки совпадает по фазе с магнитодвижущей силой вторичной обмотки и, следовательно, с током i_2 . ЭДС $e_{\sigma 2}$ рассеяния вторичной обмотки отстает от магнитного потока $\Phi_{\sigma 2}$ на четверть периода, поэтому вектор ЭДС $\underline{E}_{\sigma 2}$ отстает от вектора тока \underline{I}_2 на $\pi/2$. Согласно уравнению (14.6), вектор ЭДС $\underline{E}_{2к}$ имеет две составляющие: вектор напряжения $\underline{I}_2 R_2$ на активном сопротивлении обмотки, совпадающий по фазе с вектором тока \underline{I}_2 , и вектор напряжения $j\underline{I}_2 X_2$ на индуктивном сопротивлении рассеяния обмотки, опережающий вектор тока \underline{I}_2 на $\pi/2$ и равный $-\underline{E}_{\sigma 2}$.

Для того чтобы перейти к векторной диаграмме первичной обмотки, необходимо установить взаимное расположение векторов, токов \underline{I}_2 и \underline{I}_1 пользуясь наличием магнитной связи между обмотками. Исходя из уравнения (14.8), вектор первичной магнитодвижущей силы $\underline{F}_{1к}$ необходимо направить в противоположную сторону по отношению к вектору $\underline{F}_{2к}$ и отложить совпадающий с ним по направлению вектор тока \underline{I}_1 . Для того чтобы получить вектор приложенного напряжения $\underline{U}_{1к}$, необходимо в соответствии с уравнением (14.5) произвести сложение векторов: $-\underline{E}_{1к}$, $\underline{I}_1 R_1$ и $j\underline{I}_1 X_1$, как это выполнено на рис. 14.2.

Угол φ_k определяет сдвиг фаз между током \underline{I}_1 и напряжением $\underline{U}_{1к}$ в режиме короткого замыкания трансформатора.

14.4. Приведенный трансформатор

Так как в общем случае $w_1 \neq w_2$, то $E_1 \neq E_2$ и $I_1 \neq I_2$. Различным по величине ЭДС и токам соответствуют различные параметры обмоток, т. е. их активные и индуктивные сопротивления. Это затрудняет непосредственное сопоставление и количественный учет процессов, происходящих в трансформаторе, в особенности при больших коэффициентах трансформации. Если, например, $U_1 = 6000 \text{ В}$, $U_2 = 230 \text{ В}$, то $k = 6000 : 230 = 26$. В этом случае пришлось бы изобразить ЭДС E_1 и E_2 векторами, длины которых – при одном и том же масштабе для ЭДС – находились бы в отношении $26 : 1$, или же выбрать разные масштабы для ЭДС, что представляло бы несомненные неудобства. Кроме того, падение напряжения, возникающее в нагруженном трансформаторе, нельзя получить путем простого сложения падений напряжения, возникающих в каждой из обмоток, поскольку

последние, как это было уже указано, имеют разное количество витков, разные сопротивления и рассчитаны на разные токи.

Чтобы избежать всех этих затруднений пользуются способом, при котором обе обмотки трансформатора приводятся к одному числу витков. Обычно вторичную обмотку приводят к первичной. Для этого пересчитывают вторичную обмотку, имеющую w_2 витков, на эквивалентную ей приведенную обмотку, имеющую такое же количество витков как и первичная обмотка, с условием, чтобы эта операция приведения вторичной обмотки к первичной не отразилась на режиме работы первичной цепи, т. е. магнитный поток и мощность трансформатора сохранились без изменений. Все величины, относящиеся к приведенной вторичной обмотке, называются приведенными и обозначаются теми же символами, что и действительные величины, но со штрихом сверху: E'_2, I'_2, R'_2, X'_2 и т. д.

А. Приведенная вторичная ЭДС. ЭДС наведенная во вторичной обмотке основным магнитным потоком с амплитудой Φ_m , согласно уравнению (12.8), с. 219, $E_2 = 4,44w_2f\Phi_m$.

При замене действительной вторичной обмотки с количеством витков w_2 приведенной обмоткой с количеством витков $w'_2 = w_1$ основной магнитный поток наводит в ней ЭДС $E'_2 = 4,44w'_2f\Phi_m = E_1$.

Таким образом, с учетом уравнения (12.12),

$$E'_2 = E_2w_1/w_2 = E_2k. \quad (14.11a)$$

В таком же отношении изменяются и другие величины, имеющие размерность ЭДС

$$E'_{2\sigma} = E_{2\sigma}k, \quad (14.11б)$$

$$I'_2X'_2 = I_2X_2k, \quad (14.11в)$$

$$I'_2R'_2 = I_2R_2k, \quad (14.11г)$$

$$U'_2 = U_2k. \quad (14.11д)$$

Б. Приведенный вторичный ток. При приведении вторичной обмотки к первичной амплитуда магнитного потока должна оставаться без изменения, следовательно, должна сохраняться неизменной амплитуда вторичной магнитодвижущей силы, т. е. $F_2 = \sqrt{2}I'_2w_1 = \sqrt{2}I_2w_2$, откуда

$$I'_2 = I_2w_2/w_1 = I_2/k. \quad (14.12)$$

В. Приведенные сопротивления вторичной обмотки. Так как при приведении вторичной обмотки к первичной не изменяются мощности, то потери в проводниках действительной и приведенной вторичных обмоток должны быть одинаковы, т. е. $(I'_2)^2 R'_2 = I_2^2 R_2$, откуда

$$R'_2 = (I_2/I'_2)^2 R_2 = k^2 R_2. \quad (14.13a)$$

Таким образом, чтобы получить R'_2 , нужно изменить сопротивление R_2 пропорционально коэффициенту трансформации во второй степени. Физически это можно представить себе так, что при изменении, например увеличении, количества витков вторичной обмотки в k раз длина обмотки увеличивается в k раз, а ее сечение, если предполагать постоянную плотность тока, уменьшается в k раз, вследствие чего активное сопротивление обмотки увеличивается в k^2 раз.

Из уравнений (14.11) и (14.12) следует, что

$$X'_2 = (I_2/I'_2)^2 X_2 = k^2 X_2, \quad (14.13б)$$

т. е. чтобы получить X'_2 , нужно изменить X_2 , так же как и R_2 , пропорционально коэффициенту трансформации во второй степени.

Полное сопротивление

$$\underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2 = k^2 R_2 + jk^2 X_2 = \underline{Z}_2 k^2. \quad (14.13в)$$

14.5. Электрическая схема замещения трансформатора

Наличие магнитной связи между обмотками затрудняет исследование работы трансформатора, поэтому для определения изменения вторичных величин при нагрузке используется электрическая схема замещения трансформатора. В основе такой схемы лежит представление о том, что действие потоков рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ эквивалентно действию индуктивных сопротивлений X_1 и X_2 , по которым текут токи i_1 и i_2 . В соответствии с этим можно представить трансформатор в виде схемы рис. 14.3,а. Здесь каждая из обмоток трансформатора заменена обмоткой без потока рассеяния и без активного сопротивления и реактивной катушкой, имеющей активное и индуктивное сопротивление действительной обмотки. Таким образом первичная обмотка заменена обмоткой CD и последовательно соединенными с нею сопротивлениями R_1 и X_1 , вторичная обмотка заменена обмоткой cd и последовательно соединенными сопротивлениями R_2 и X_2 . Обмотки CD и cd связаны между собой магнитным потоком Φ , который наводит в них ЭДС e_1 и e_2 .

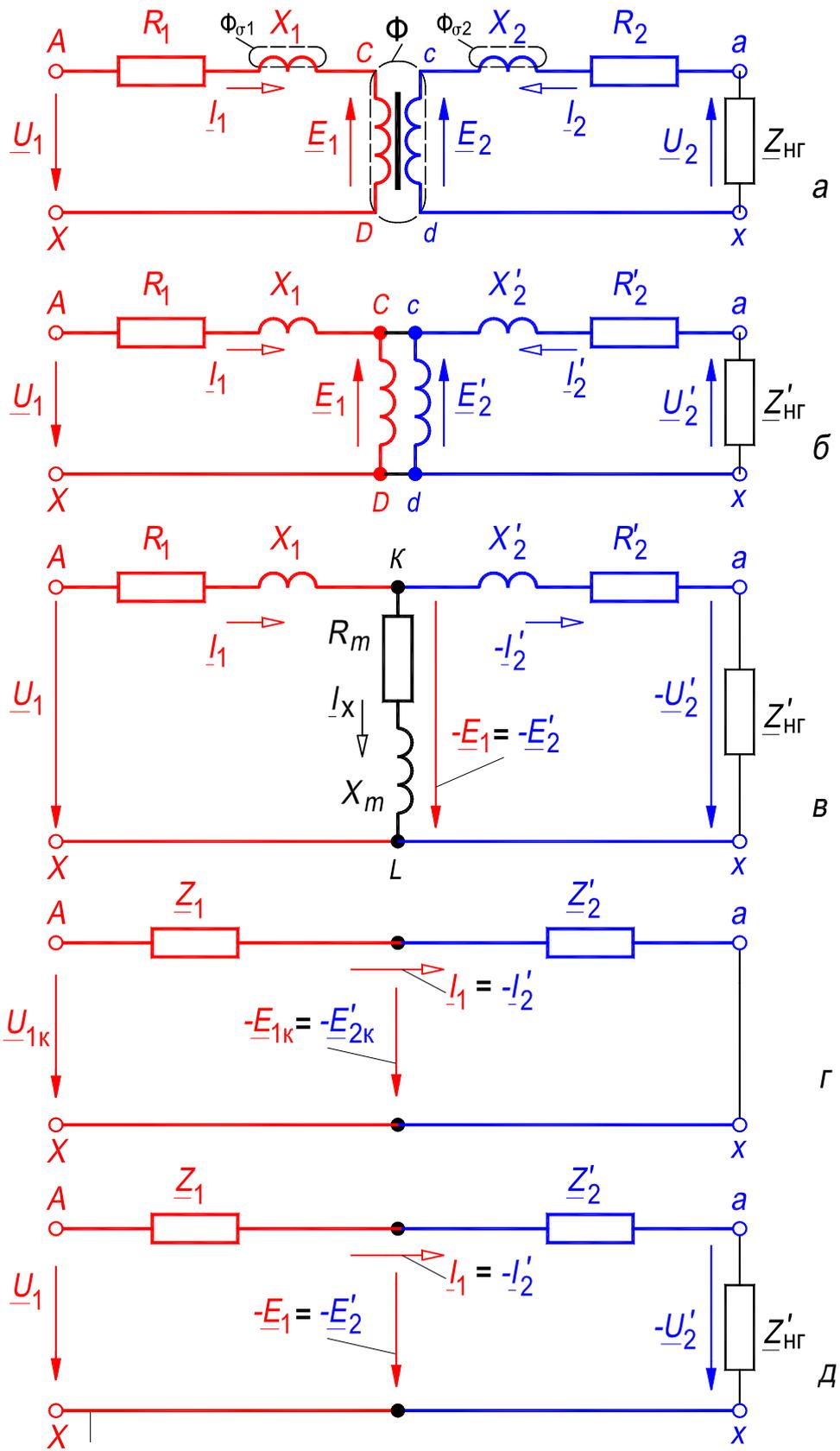


Рис. 14.3. Схемы замещения трансформатора: *а* – схема замещения отдельных обмоток; *б* – схема замещения обмоток, приведенного трансформатора; *в* – *T*-образная схема замещения; *г* – схема замещения при коротком замыкании; *д* – упрощенная схема замещения при нагрузке

Условное положительное направление напряжений, ЭДС и токов устанавливается из следующих соображений. Положительное направление приложенного напряжения U_1 выбирается от зажима A к зажиму X . Ток в первичной обмотке направлен также от зажима A к зажиму X . ЭДС E_1 уравнивающая приложенное напряжение, направлена от конца обмотки D к ее началу C . При одинаковом направлении намотки катушек и одинаковой маркировке зажимов ЭДС E_2 направлена также от конца обмотки d к ее началу c . Под влиянием этой ЭДС ток I_2 во вторичной цепи будет, направлен от зажима x к зажиму a и также будет направлено напряжение U_2 .

Для указанной схемы можно выполнить приведение вторичной обмотки к первичной (рис. 14.3,б), в результате этого будут уравнены ЭДС E'_2 и E_1 теперь можно соединить начала C и c обмоток и их концы D и d .

Две обмотки CD и cd между общими точками можно объединить в одну обмотку KL (рис. 14.3,в). Чтобы не изменилось соотношение токов в этой обмотке, должен быть ток с действующим значением $I_x = I_1 + I'_2$, создающий магнитный поток Φ . Часть электрической цепи (обмотка) KL с током i_x называется намагничивающей ветвью схемы замещения. В схеме рис. 14.3,в все элементы имеют электрическое соединение между собой и ток во вторичной цепи является частью тока I_1 , поэтому он имеет противоположное направление по отношению к току I'_2 (рис. 14.3,б).

При холостом ходе вторичная цепь трансформатора разомкнута и схема замещения в этом случае состоит из последовательно соединенных активного и индуктивного сопротивлений R_1 и X_1 первичной обмотки и намагничивающей ветви, т. е. ограничивается частью схемы $AKLX$ (рис. 14.3,в).

При коротком замыкании основной магнитный поток Φ_k мал, в соответствии с этим мал и ток $i_{x.k}$, необходимый для создания этого потока. Поэтому можно считать, что намагничивающая ветвь KL разомкнута, схема при этом значительно упрощается и состоит только из последовательно соединенных активных и индуктивных сопротивлений первичной и вторичной обмотки: R_1 , X_1 , R'_2 и X'_2 (рис. 14.3,г).

В некоторых случаях и при нагрузке трансформатора для упрощения исследования можно не учитывать намагничивающий ток, т. е. пользоваться упрощенной схемой замещения (рис. 14.3,д).

14.6. Треугольник короткого замыкания

Векторная диаграмма напряжений и ЭДС трансформатора в режиме короткого замыкания при вторичной обмотке, приведенной к первичной, изображена на рис. 14.4,а. Отличие этой диаграммы от изображенной на рис. 14.2 заключается в изменении величин векторов вторичных ЭДС, напряжений и токов, в соответствии с уравнениями (14.11,а-д) и (14.12).

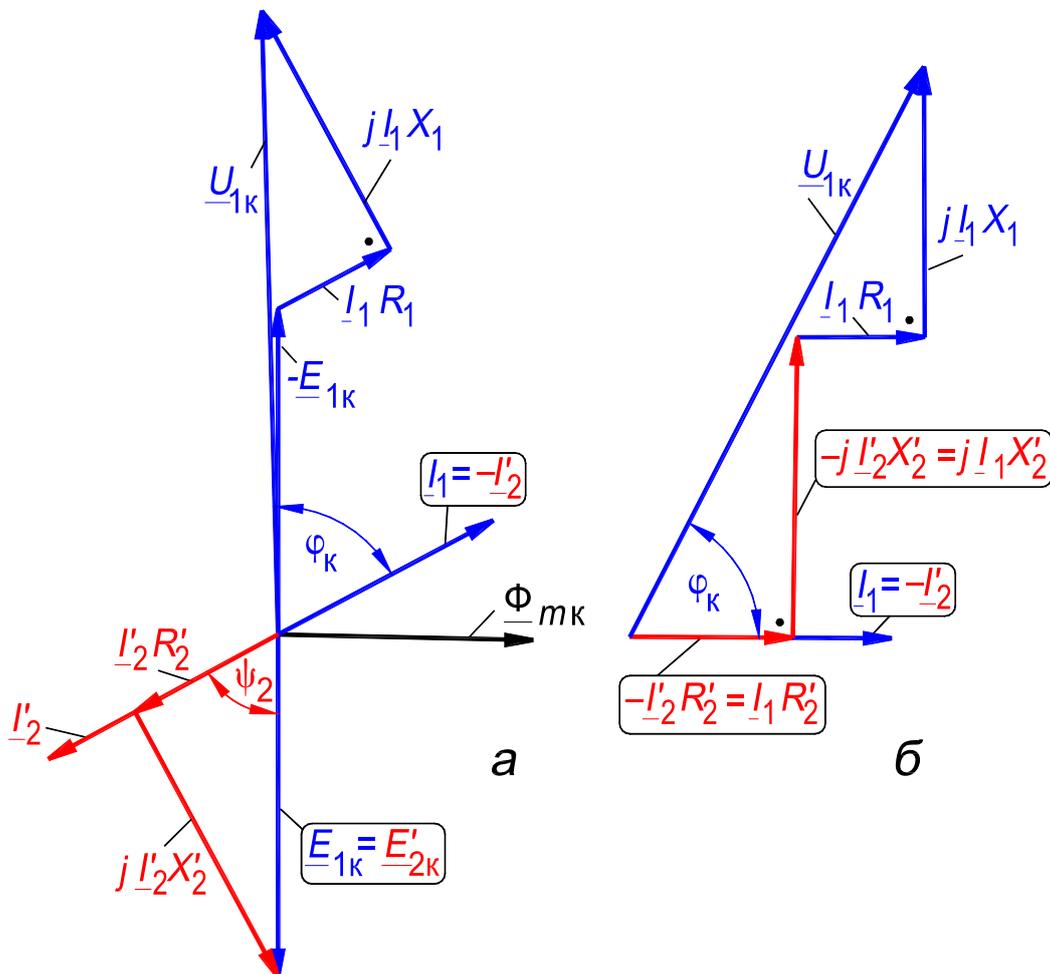


Рис. 14.4. Векторная диаграмма: а – для приведенного трансформатора при коротком замыкании, б – для схемы замещения трансформатора при коротком замыкании

Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания показана на рис. 14.3,з. Для этой схемы замещения может быть также построена векторная диаграмма. Вектор тока $I_1 = -I'_2$ направлен в сторону положительного

направления оси абсцисс (рис. 14.4,б). Вектор $-\underline{I}'_2 R'_2 = \underline{I}_1 R'_2$ совпадает с вектором тока \underline{I}_1 , а вектор $-j\underline{I}'_2 X'_2 = j\underline{I}_1 X'_2$ опережает вектор тока \underline{I}_1 на $\pi/2$ и в соответствии с последовательным соединением сопротивлений R'_2 и X'_2 складывается с вектором $\underline{I}_1 R'_2$. Далее необходимо сложить векторы напряжений $\underline{I}_1 R_1$ и $j\underline{I}_1 X_1$ на активном и индуктивном сопротивлениях R_1 и X_1 .

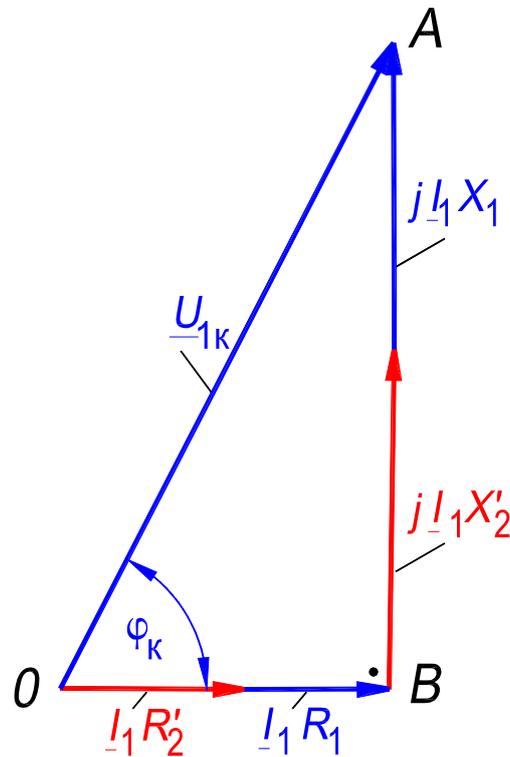


Рис. 14.5. Треугольник короткого замыкания

Сумма перечисленных четырех векторов равна вектору приложенного напряжения $\underline{U}_{1к}$.

Вектор тока \underline{I}_1 отстает от вектора напряжения $\underline{U}_{1к}$ на угол $\varphi_к$.

Если изменить порядок сложения векторов $j\underline{I}_1 X'_2$ и $\underline{I}_1 R_1$, то вместо двух треугольников получается один треугольник короткого замыкания OAB (рис. 14.5), в котором катеты соответственно равны

$$\underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_1 R'_2 = \underline{I}_1 (R_1 + R'_2) = \underline{I}_1 R_к, \quad (14.14а)$$

$$\underline{I}_1 X_1 + \underline{I}_1 X'_2 = \underline{I}_1 (X_1 + X'_2) = \underline{I}_1 X_к, \quad (14.14б)$$

Сопротивления $R_к$ и $X_к$ называются активным и индуктивным сопротивлением короткого замыкания трансформатора. Обычно

$$R_1 \approx R'_2 \approx 0,5R_к, \quad (14.15а)$$

$$X_1 \approx X'_2 \approx 0,5X_к. \quad (14.15б)$$

Угол

$$\varphi_k = \arctg(I_1 X_k) / (I_1 R_k) = \arctg(X_k / R_k). \quad (14.15в)$$

Для практических целей строят треугольник короткого замыкания для номинального тока и стороны этого треугольника выражают не в единицах напряжения, а в долях номинального напряжения или в процентах, т. е. напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} / U_{1ном} = u_k, \quad (14.16а)$$

активная составляющая его

$$I_{1ном} R_k / U_{1ном} = u_{к.а}, \quad (14.16б)$$

индуктивная составляющая его

$$I_{1ном} X_k / U_{1ном} = u_{к.р}. \quad (14.16в)$$

14.7. Опыт короткого замыкания трансформатора

Для построения треугольника короткого замыкания (рис. 14.5) надо знать параметры короткого замыкания трансформатора Z_k , R_k и X_k . В исполненном трансформаторе они определяются из опыта короткого замыкания, при котором измеряют подведенное к трансформатору напряжение $U_{1к}$, ток короткого замыкания I_1 и мощность короткого замыкания P_k . Так как $U_{1к}$ идет только на преодоление сопротивления Z_k (рис. 14.3,з), то

$$Z_k = U_k / I_k. \quad (14.17)$$

Мощность P_k практически тратится только на покрытие потерь $P_{э1}$ и $P_{э2}$ в первичной и вторичной обмотках, так как при коротком замыкании трансформатор не совершает полезной работы, а потерями в стали при $\Phi_{х.к} \approx 0$ можно пренебречь. Потери в обмотках состоят из основных потерь $I_1^2 R_{10}$ и $I_2^2 R_{20}$, где R_{10} и R_{20} – сопротивления обмоток при постоянном токе, и добавочных потерь в проводниках, обусловленных главным образом действием потоков рассеяния. В обычных случаях добавочные потери составляют 5 – 15 % от основных.

Таким образом,

$$P_k = P_{э1} + P_{э2} = I_1^2 (R_1 + R'_2) = I_1^2 R_k.$$

Следовательно,

$$R_k = P_k / I_1^2, \quad (14.18)$$

$$X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = \sqrt{[(U_{1k}/I_1)^2 - (P_k/I_1^2)^2]}. \quad (14.19)$$

При определении параметров короткого замыкания трехфазного трансформатора все величины относятся к одной фазе.

Зная параметры Z_k , R_k и X_k , можно определить u_k , $u_{k.a}$, и $u_{k.p}$ [формулы (14.16, a – в)] и построить основной треугольник короткого замыкания. Но можно воспользоваться для этой цели данными короткого замыкания, а именно, напряжением u_k и мощностью короткого замыкания $P_{k.ном}$, которые обычно приводятся для номинального тока $I_{ном}$. Тем самым задается сторона OA основного треугольника короткого замыкания u_k . Сторона $OB = u_{k.a}$ определяется следующим образом:

$$u_{k.a} = \frac{I_{ном} R_k}{U_k} 100 = \frac{I_{ном}^2 R_k \cdot 100}{\frac{U_{ном} I_{ном}}{1000}} = \frac{P_{k.ном}}{10 \cdot S_{ном}}, \text{ ВТ/кВ}\cdot\text{А}. \quad (14.20)$$

Эта формула справедлива и для трехфазных трансформаторов, так как в этом случае потери в обмотках (числитель) и мощность (знаменатель) одновременно увеличиваются втрое.

Таблица 14.2. Относительные значения потерь короткого замыкания при номинальной мощности трансформатора

$S_{ном}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$P_{k.ном}/S_{ном}, \%$
5 – 20	3,7 – 3
30 – 240	3 – 2
320 – 5600	2 – 1
7500 – 60000	1 – 0,5

Мощность (потери) короткого замыкания, так же как и мощность (потери) холостого хода, имеет весьма важное эксплуатационное значение. В табл. 14.2 приводятся примерные данные, определяющие мощность короткого замыкания $P_{k.ном}$ при температуре 75 °С для трех- и однофазных двухобмоточных силовых трансформаторов, выраженную в процентном отношении от номинальной мощности трансформатора. Обычно $P_{х.ном} : P_{к.ном} \approx 1 : (2,5 - 4)$.

Это отношение оказывает большое влияние на форму характеристики КПД трансформатора (разд. В.13, с. 128, сл.; разд. 15.6, с. 272, сл.).

Пример. Трёхфазный трансформатор на 160 кВ·А; 6000/400 В; 9,62/144 А; 50 Гц; Y/Y_н – 0. По паспортным данным $u_k = 4,5 \%$, $P_{к.ном} = 2650$ Вт. Обмотка низшего напряжения приводится к обмотке высшего напряжения. Напряжение, ток и мощность одной фазы:

$$U_{1\phi} = 6000/\sqrt{3} = 3464 \text{ В}; I_{ном} = 9,62 \text{ А};$$

$$P_{к.ф} = 2650/3 = 883 \text{ Вт}.$$

Тогда

$$U_k = U_{1\phi} \cdot u_k / 100 = 3464 \cdot 4,5 / 100 = 156 \text{ В},$$

$$Z_k = U_k / I_{ном} = 156 / 9,62 = 16,2 \text{ Ом},$$

$$R_k = P_{к.ф} / I_{ном}^2 = 883 / 9,62^2 = 9,54 \text{ Ом},$$

$$X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = \sqrt{(16,2^2 - 9,54^2)} = 13,1 \text{ Ом},$$

$$\text{tg } \varphi_k = X_k / R_k = 13,1 / 9,54 = 1,37,$$

$$u_{к.а} = P_{к.ном} / 10 P_{ном} = 2650 / 10 \cdot 160 = 1,66 \%,$$

$$u_{к.р} = \sqrt{(u_k^2 - u_{к.а}^2)} = \sqrt{(4,5^2 - 1,66^2)} = 4,18 \%.$$

Короткое замыкание трёхфазного трансформаторов исследуется в Работе № 1 (с. 353,сл).

15. Работа трансформатора под нагрузкой

15.1. Физические условия работы трансформатора под нагрузкой

Так же как при рассмотрении короткого замыкания, считается, что все три фазы трансформатора нагружены симметрично, поэтому достаточно рассмотреть работу только какой-нибудь одной фазы.

На рис. 15.1 показана принципиальная схема трансформатора, работающего под нагрузкой. Здесь u_1 – подводимое к трансформатору синусоидальное напряжение; Φ – основной поток, сцепленный с обеими обмотками трансформатора; i_1 – ток в первичной обмотке; i_2 – ток во вторичной обмотке; $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ – создаваемые этими токами потоки рассеяния, причем поток $\Phi_{\sigma 1}$ сцеплен только с первичной обмоткой, а поток $\Phi_{\sigma 2}$ – только со вторичной обмоткой; u_2 – напряжение на зажимах вторичной обмотки; $Z_{\text{нг}}$ – сопротивление нагрузки, обеспечивающее нормальные условия работы трансформатора. Вторичная обмотка приведена к первичной ($w_2 = w_1$).

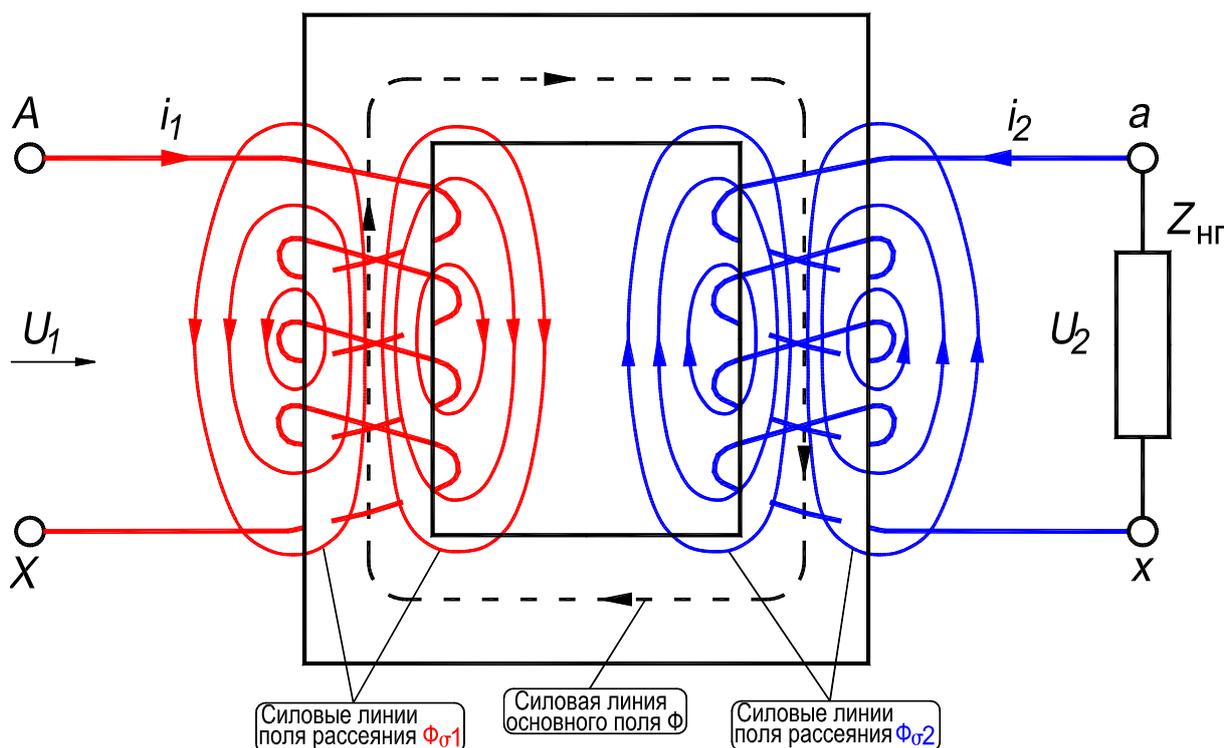


Рис. 15.1. Принципиальная схема нагруженного трансформатора

Работа трансформатора под нагрузкой подчиняется тем же закономерностям, что и работа в режимах холостого хода и короткого замыкания.

Эти зависимости выражаются в форме уравнений напряжений, ЭДС и магнитодвижущих сил, или могут быть изображены с помощью векторных диаграмм.

А. Уравнение напряжений и ЭДС первичной обмотки. Анализ процесса работы трансформатора под нагрузкой показывает, что в этом режиме с первичной обмоткой сцеплены те же магнитные потоки, что и в режимах холостого хода и короткого замыкания, поэтому уравнение напряжения и ЭДС имеет тот же вид, что и ранее полученные уравнения (12.1) и (14.5):

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1. \quad (15.1)$$

Б. Уравнение напряжений и ЭДС вторичной обмотки. При нагрузке трансформатора с вторичной обмоткой связаны те же магнитные потоки, что и в режиме короткого замыкания. Основной магнитный поток наводит ЭДС e_2 и вторичный поток рассеяния наводит ЭДС $e_{\sigma 2}$, имеется также напряжение $i_2 R_2$ на активном сопротивлении обмотки. Но в отличие от режима короткого замыкания к зажимам вторичной обмотки присоединена нагрузка, напряжение на которой равно u_2 .

Таким образом, для вторичной обмотки, приведенной к первичной, может быть написано уравнение напряжений и ЭДС, аналогичное (14.6),

$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_2 R'_2 + j \underline{I}'_2 X'_2 + \underline{I}'_2 \underline{Z}'_{\text{нг}} = \underline{I}'_2 R'_2 + j \underline{I}'_2 X'_2 + \underline{U}'_2. \quad (15.2a)$$

Так как при построении векторной диаграммы обычно приходится определять вектор \underline{U}'_2 то уравнение (15.2a) чаще используется в таком виде:

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 R'_2 - j \underline{I}'_2 X'_2. \quad (15.2b)$$

В. Уравнение магнитодвижущих сил. При работе трансформатора под нагрузкой необходимо учитывать магнитодвижущую составляющую $f_x = i_x w_1$ первичной магнитодвижущей силы, так как она обычно составляет в нормальных условиях 3 – 10 % от f_1 . Поэтому уравнение магнитодвижущих сил записывается в виде:

$$\underline{F}_1 + \underline{F}_2 = \underline{F}_x$$

или

$$\sqrt{2} \underline{I}_1 w_1 + \sqrt{2} \underline{I}_2 w_2 = \sqrt{2} \underline{I}_x w_1$$

и после преобразования

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 w_2 / w_1 = \underline{I}_x. \quad (15.3a)$$

Для приведенного трансформатора

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_x \text{ или } \underline{I}_1 = \underline{I}_x - \underline{I}'_2. \quad (15.36)$$

Иногда для упрощения анализа работы трансформатора можно пользоваться приближенным уравнением $\underline{E}_1 + \underline{E}_2 = 0$ и для приведенного трансформатора

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0. \quad (15.3в)$$

15.2. Векторные диаграммы трансформатора при нагрузке

В соответствии с уравнениями напряжений и ЭДС, а также уравнением магнитодвижущих сил могут быть построены векторные диаграммы. При нормальной работе трансформатора напряжения на сопротивлениях обмоток малы по сравнению с основной ЭДС, поэтому на рис. 15.2 и 15.3 векторы напряжений на обмотках изображены для ясности в значительно большем масштабе, чем векторы основных ЭДС и напряжений.

Трансформатор включен в сеть с синусоидальным напряжением $u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t$ неизменной частоты f . Ко вторичной обмотке присоединена нагрузка $Z_{нг}$, состоящая из активного сопротивления $R_{нг}$ и индуктивного сопротивления $X_{нг}$.

Векторная диаграмма строится для приведенного трансформатора. Вектор основного магнитного потока Φ_m отложен в положительном направлении оси абсцисс (рис. 15.2). В соответствии с вычисленными или определенными опытным путем составляющими тока, создающего основной магнитный поток, строится вектор тока I_x . Векторы наведенных основным магнитным потоком ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}'_2 отстают от вектора основного магнитного потока на $\pi/2$.

Активно-индуктивная нагрузка вызывает отставание тока вторичной обмотки от напряжения на зажимах вторичной обмотки на угол $\varphi_2 = \arctg(X'_{нг}/R'_{нг})$ от вторичной ЭДС на угол $\psi_2 = \arctg[(X'_{нг} + X'_2)/(R'_{нг} + R'_2)]$. Поэтому вектор тока \underline{I}'_2 отложен под углом ψ_2 к вектору ЭДС \underline{E}'_2 .

Последовательность изображения векторов на диаграммах рис. 15.2 представлена в табл. 15.3.

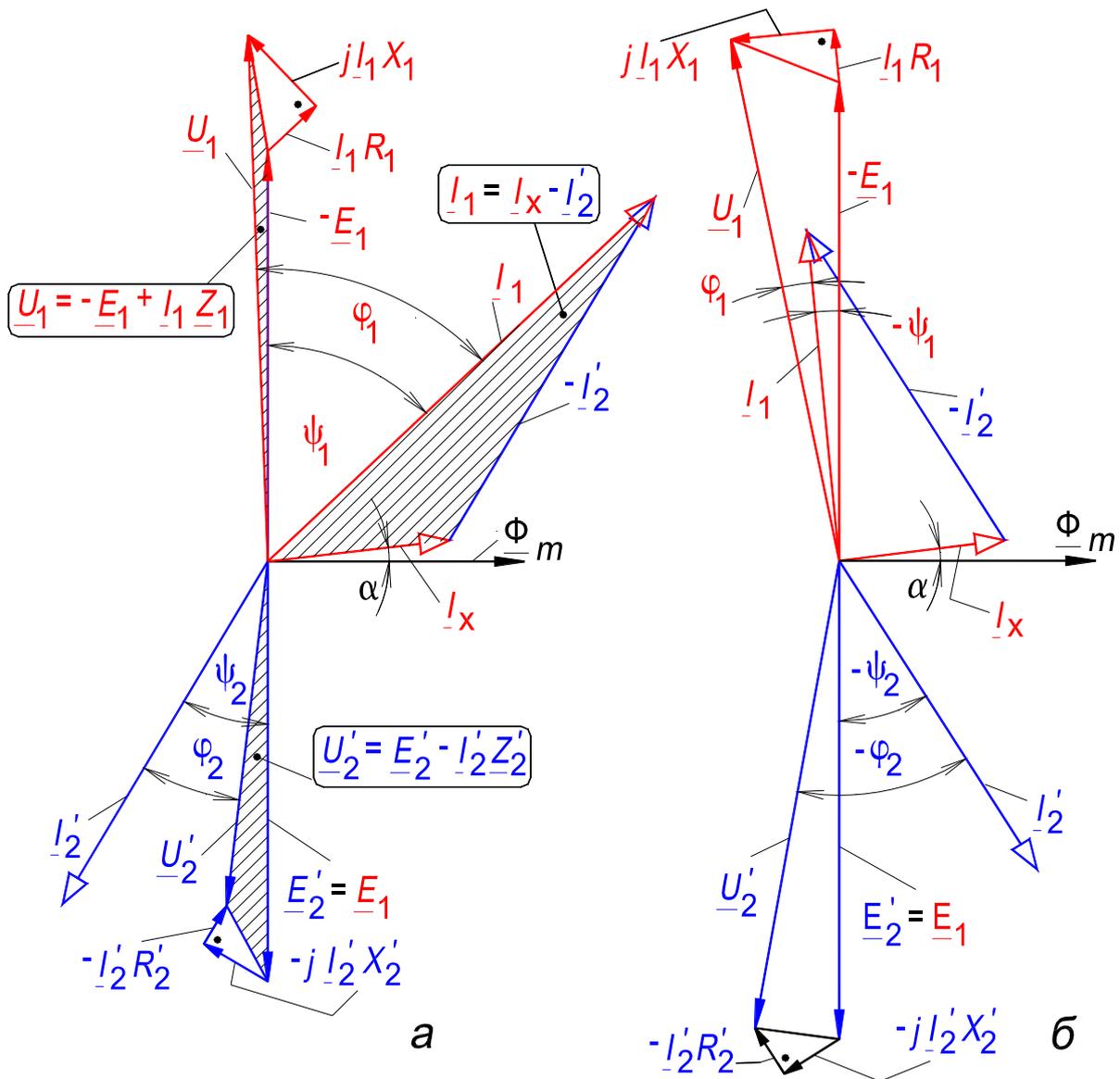


Рис. 15.2. Векторная диаграмма для трансформатора при нагрузке: а – активно-индуктивной, б – активно-ёмкостной

Таблица 15.3. Последовательность изображения векторов на диаграммах рис. 15.2

№ п/п	Вектор	№ п/п	Вектор	№ п/п	Вектор
1	Φ_m	6	I_1	11	$-j I_2' X_2$
2	I_x	7	$-E_1$	12	$-I_2' R_2$
3	$E_1 = E_2'$	8	$I_1 R_1$	13	U_2'
4	I_2'	9	$j I_1 X_1$		
5	$-I_2'$	10	U_1		

Для того чтобы перейти к векторной диаграмме первичной обмотки, необходимо воспользоваться уравнением магнитодвижущих сил (15.3б), согласно которому вектор первичного тока равен сумме векторов I_x и $-I'_2$. Для получения вектора приложенного напряжения U_1 к первичной обмотке, согласно уравнению (15.1), необходимо сложить векторы $-E_1$, $I_1 R_1$ и $jI_1 X_1$. Вектор напряжения опережает вектор тока I_1 , на угол $\varphi_1 > \varphi_2$.

На рис. 15.2,б построена таким же путем векторная диаграмма для смешанной активно-ёмкостной нагрузки.

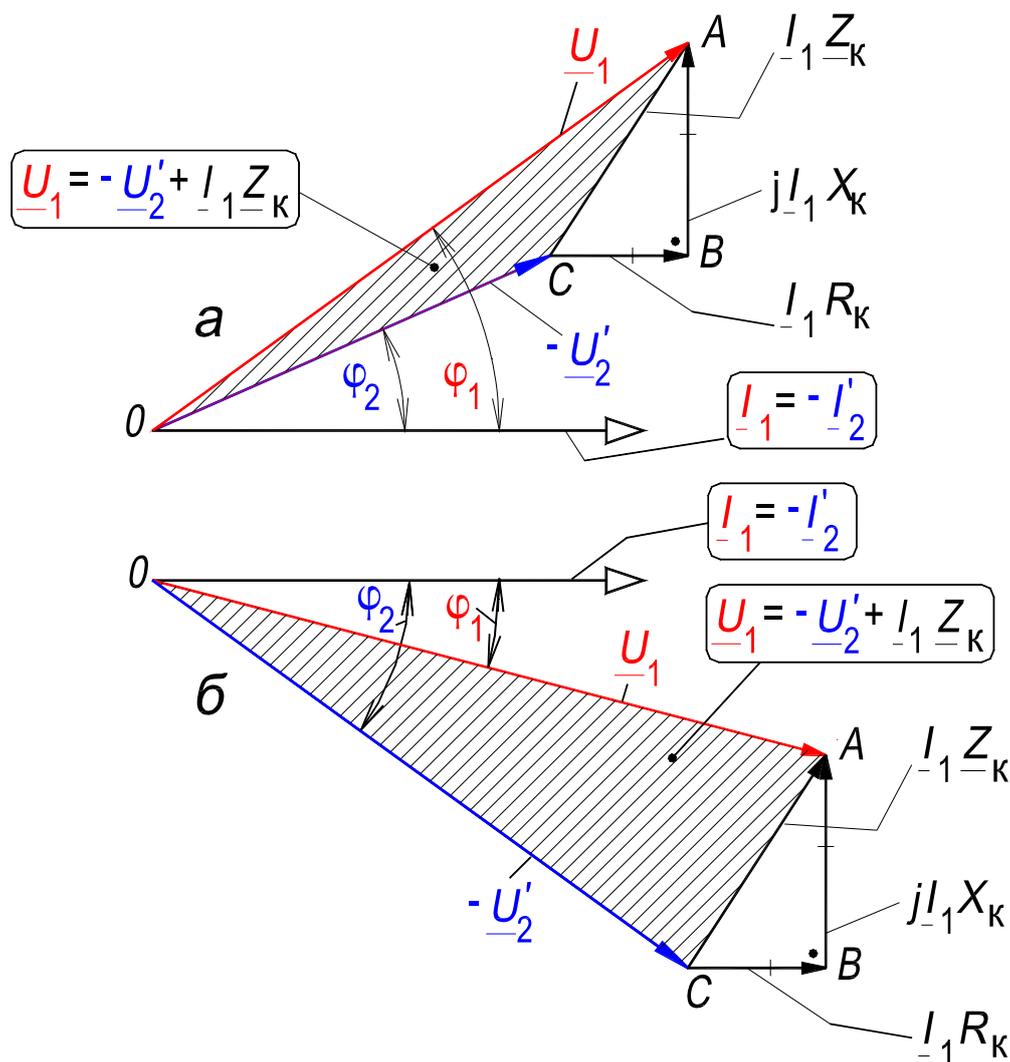


Рис. 15.3. Векторная диаграмма для упрощенной схемы замещения трансформатора при нагрузке: а – активно-индуктивной, б – активно-ёмкостной

Диаграммы рис. 15.2 полностью отражают рабочие процессы, происходящие в трансформаторе, однако производить расчет по этим диаграммам затруднительно. Поэтому для приближенного исследования не учитывают

наличие составляющей первичного тока, необходимой для создания магнитного потока. Это соответствует упрощенной схеме замещения (рис. 14.3,д), в которой намагничивающая ветвь разомкнута, т. е. $I_x = 0$.

Вектор тока $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$ отложен в положительном направлении оси абсцисс (рис. 15.3,а). Из точки O проводится вектор вторичного напряжения $-\underline{U}_2$ под углом φ_2 к вектору тока \underline{I}_1 причем угол φ_2 считается заданным составляющими сопротивления нагрузки: $\varphi_2 = \arctg(X_{\text{нг}}/R_{\text{нг}})$. С вектором $-\underline{U}'_2$ складываются векторы напряжений на обмотках трансформатора $-\underline{I}'_2 R'_2 = \underline{I}_1 R'_2$, $-j\underline{I}'_2 X'_2 = j\underline{I}_1 X'_2$, $\underline{I}_1 R_1$ и $j\underline{I}_1 X_1$.

Сумма всех векторов дает вектор первичного напряжения \underline{U}_1 , опережающий вектор тока \underline{I}_1 на угол φ_1 .

Вместо отдельных векторов напряжений на отдельных обмотках можно откладывать векторы активного и индуктивного напряжения короткого замыкания $\underline{I}_1 R_k$ и $j\underline{I}_1 X_k$.

При заданном первичном напряжении \underline{U}_1 и необходимости определить вектор вторичного напряжения \underline{U}'_2 требуется сначала определить угол $\varphi_1 = \arctg[(X_1 + X'_2 + X'_{\text{нг}})/(R_1 + R'_2 + R'_{\text{нг}})]$, в соответствии с этим углом построить вектор тока \underline{I}_1 и далее из вектора \underline{U}_1 вычесть векторы треугольника короткого замыкания ABC (рис. 14.5, с. 254), соответствующие току нагрузки.

На рис. 15.3,б построена аналогичная диаграмма для активно-ёмкостной нагрузки.

15.3. Изменение напряжения трансформатора

Изменением напряжения двухобмоточного трансформатора при номинальной нагрузке и при заданном коэффициенте мощности называется выраженная в процентах от номинального вторичного напряжения арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением при холостом ходе U_{2x} и напряжением U_2 , т. е.

$$\Delta U = 100(U_{2x} - U_2)/U_{2x}.$$

Так как $U'_2 = k \cdot U_2$ и $U'_{2x} = k \cdot U_{2x} = U_{1\text{ном}}$, то

$$\Delta U = 100(U'_{2x} - U'_2)/U'_{2x} = 100(U_{1\text{ном}} - U'_2)/U_{1\text{ном}}. \quad (15.4)$$

Определение ΔU из векторной диаграммы (например, рис. 15.2) путем непосредственного измерения разности длины двух близких по величине векторов $\underline{U}_{1\text{НОМ}}$ и $-\underline{U}'_2$ не может обеспечить удовлетворительных результатов вследствие значительного влияния небольших ошибок при построении диаграммы и измерении длины векторов.

Точность определения ΔU можно значительно повысить, если воспользоваться основным треугольником короткого замыкания ABC (рис. 15.4). Из прямоугольного треугольника OAP

$$U'_2 = OP - PC = \sqrt{(U_{1\text{НОМ}}^2 - n_k^2)} - m_k = U_{1\text{НОМ}} \{ \sqrt{[1 - (n_k/U_{1\text{НОМ}})^2]} - m_k/U_{1\text{НОМ}} \}.$$

Если разложить слагаемое $\sqrt{[1 - (n_k/U_{1\text{НОМ}})^2]}$ в числовой ряд и пренебречь всеми членами после второго ввиду их малости, то

$$U'_2 = U_{1\text{НОМ}} \{ 1 - [(n_k/U_{1\text{НОМ}})^2]/2 - m_k/U_{1\text{НОМ}} \}$$

$$\Delta U = 100(U_{1\text{НОМ}} - U'_2)/U_{1\text{НОМ}} = 100m_k/U_{1\text{НОМ}} - 100[(n_k/U_{1\text{НОМ}})^2]/2.$$

(15.5)

Таким образом, для определения ΔU вместо построения векторной диаграммы можно построить только основной треугольник короткого замыкания и вспомогательный треугольник APC так, чтобы угол между линиями CB и CP был равен φ_2 . Так как стороны u_k , $u_{k.a}$ и $u_{k.p}$ основного треугольника короткого замыкания выражаются в процентах номинального напряжения $U_{1\text{НОМ}}$, то и все другие отрезки в масштабе сторон этого треугольника также выражаются в процентах $U_{1\text{НОМ}}$, поэтому для определения ΔU достаточно измерить отрезки m_k и n_k и в соответствии с принятым масштабом выразить их в процентах ΔU , тогда

$$\Delta U = m_k - (n_k^2/200). \quad (15.6)$$

Изменение напряжения можно определить также расчетным путем, если выразить отрезки m_k и n_k через катеты $u_{k.a}$ и $u_{k.p}$ треугольника короткого замыкания. Из рис. 15.4 следует, что

$$m_k = CP = ca + ap = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2,$$

$$n_k = AP = Ab - bp = u_{k.p} \cos \varphi_2 - u_{k.a} \sin \varphi_2.$$

Следовательно,

$$\Delta U = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2 + (u_{k.p} \cos \varphi_2 - u_{k.a} \sin \varphi_2)^2/200. \quad (15.7)$$

Последнее слагаемое обычно невелико по сравнению с первым. Поэтому с достаточной точностью можно принять, что

$$\Delta U \approx u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2. \quad (15.8)$$

При ёмкостной нагрузке второе слагаемое становится соизмеримо с первым, и тогда им пренебрегать нельзя.

Изменение напряжения по формулам (15.7) и (15.8) соответствует номинальной нагрузке $I_{2ном}$ и различным коэффициентам мощности $\cos \varphi_2$. Для нагрузки I_2 , отличной от номинальной и определяемой коэффициентом нагрузки $\beta = I_2/I_{2ном}$, изменение напряжения, вычисленное по этим формулам, нужно умножить на β , так как стороны треугольника короткого замыкания пропорциональны величине тока I_2 .

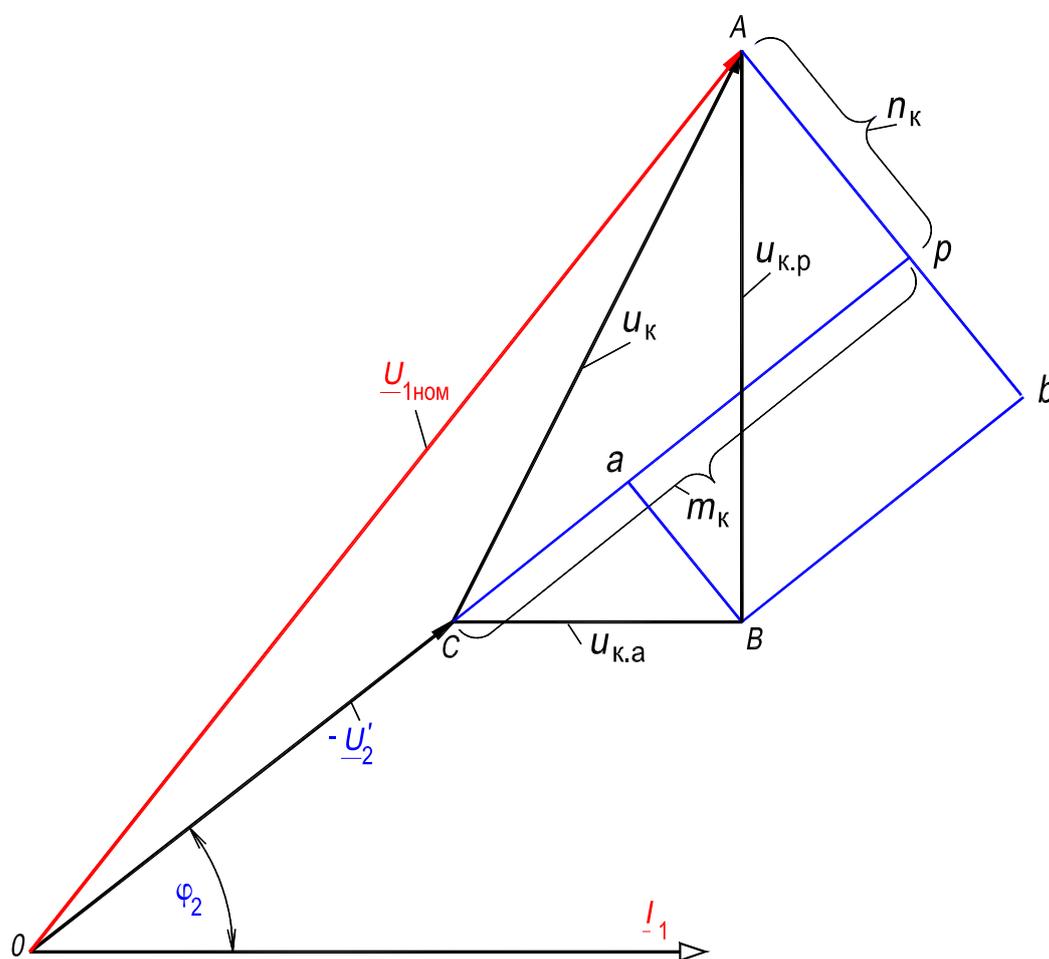


Рис. 15.4. Графическое определение изменения вторичного напряжения

Пример. Трансформатор на 160 кВ·А, 6000/400 В имеет $u_{к.а} = 1,66 \%$ и $u_{к.р} = 4,18 \%$ (см. пример в разд. 14.7, с. 257,сл.). Тогда для номинальной нагрузки и $\cos \varphi_2 = 0,8$ по формуле (15.7)

$$\Delta U = 1,66 \cdot 0,8 + 4,18 \cdot 0,6 + (4,18 \cdot 0,8 - 1,66 \cdot 0,6)^2 / 200 = 3,89 + 0,03 = 3,92 \%$$

По упрощенной формуле (15.8) $\Delta U = 3,86 \%$. Таким образом, при пренебрежении вторым слагаемым формулы (15.7) в данном случае получается ошибка меньше 1 %.

Для иллюстрации зависимости ΔU от характера нагрузки трансформатора на рис. 15.5 построен график зависимости $\Delta U\% = f(\varphi_2)$ при $I_2 = I_{2\text{ном}}$ применительно к данным рассмотренного численного примера. Правый квадрант соответствует смешанной активно-индуктивной нагрузке, а левый квадрант – активно-ёмкостной нагрузке.

На рис. 15.5 видно, что при активно-индуктивной нагрузке $R-X_L$ вторичное напряжение трансформатора падает ($\Delta U > 0$), а в случае активно-ёмкостной нагрузки $R-X_C$ при достаточно большом угле сдвига фаз оно повышается ($\Delta U < 0$). Это обусловлено тем, что при протекании через индуктивное сопротивление индуктивный ток вызывает понижение напряжения, а ёмкостный ток – повышение его (см. векторные диаграммы на рис. 15.2 и 15.3). Чем выше номинальное напряжение трансформатора, тем больше рассеяние трансформатора и напряжение короткого замыкания и поэтому тем больше изменение напряжения трансформатора.

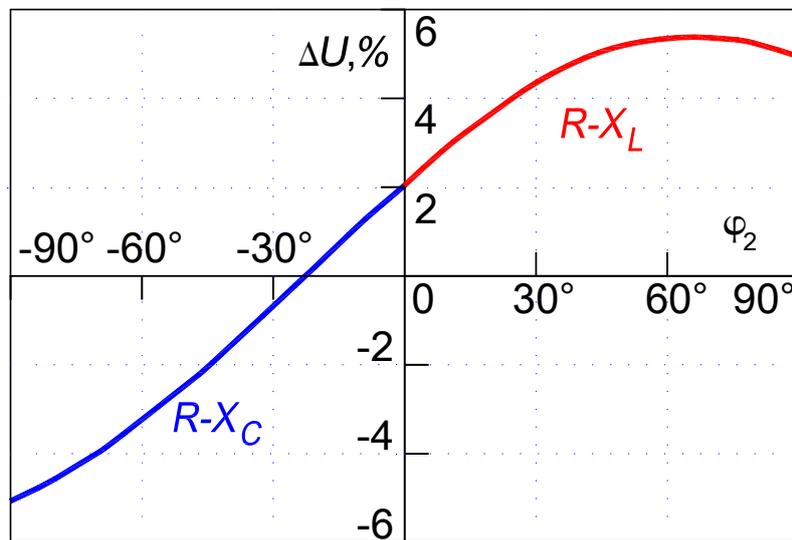


Рис. 15.5. Зависимость изменения падения напряжения от характера нагрузки ($I_2 = \text{const}$)

15.4. Внешняя характеристика трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_{1\text{ном}}$, $f_{1\text{ном}}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$, (рис. 15.6). При $I_2 = I_{2\text{ном}}$, $\cos \varphi_2 = 0,8$ и значениях $u_k = 5,5 - 10,5 \%$ падение напряжения $\Delta U \approx 5 - 8 \%$.

Характеристика анализируется на основе зависимости $\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 R_2 - j \underline{I}_2 X_2$, при условии $\cos \varphi_2 = \text{const}$, а также векторных диаграмм на рис. 15.2 и 15.3 (см. термин 62, с.147).

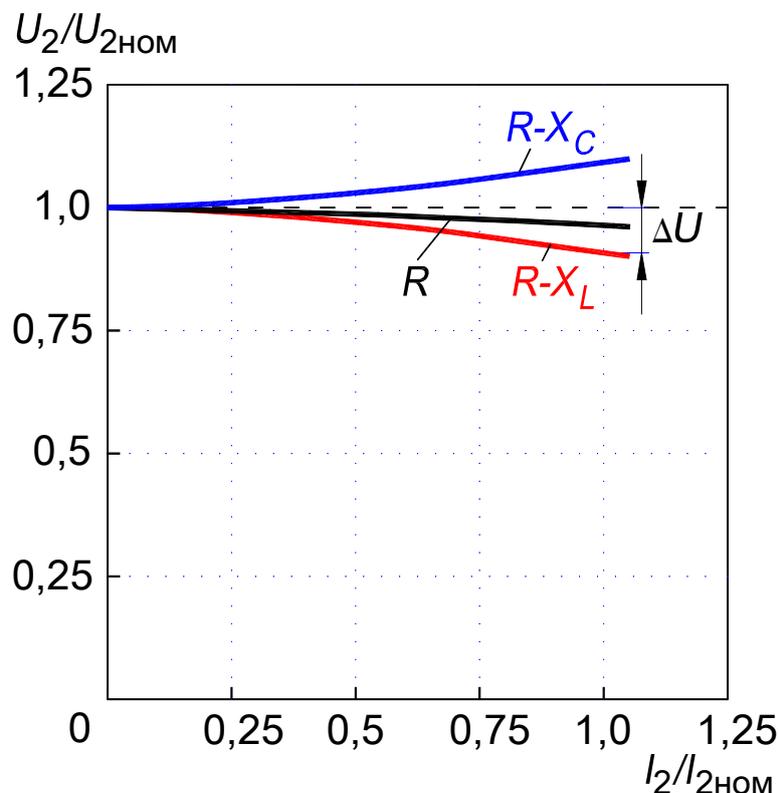


Рис. 15.6. Внешняя характеристика трансформатора ($\cos \varphi_2 = \text{const}$)

15.5. Регулирование напряжения трансформатора

Вследствие падения напряжений в трансформаторе и питающей сети колебания нагрузок потребителей вызывают колебания вторичного напряжения трансформатора. Поэтому возникает необходимость регулирования напряжения трансформаторов, что можно осуществить посредством изменения коэффициента трансформации $k = w_1/w_2$ за счёт изменения числа включенных в работу витков первичной или вторичной обмотки трансформатора.

Для этой цели обмотка выполняется с рядом ответвлений, и для регулирования напряжения производится переключение этих ответвлений с помощью соответствующего переключающего устройства.

Согласно ГОСТ 11677-85 различают трансформаторы:

1) с ПБВ (переключение без возбуждения). Трансформатор перед переключением ответвлений отключается от сети и переключение осуществляется вручную (рис. 10.11, с. 206). Затем трансформатор включается в сеть;

2) с РПН (регулируемые под нагрузкой), переключение регулировочных витков осуществляется автоматически без отключения электропотребителей (рис. 10.26, с.214).

При первом способе переключающее устройство получается проще и дешевле (трансформаторы с ПБВ), однако переключение связано с перерывом энергоснабжения потребителей и не может производиться часто. Поэтому этот способ применяется главным образом для коррекции вторичного напряжения сетевых понижающих трансформаторов в зависимости от уровня первичного напряжения на данном участке сети, а также при сезонных изменениях напряжения сети в связи с сезонным изменением нагрузки. Переключение под нагрузкой требует более сложного и дорогого переключающего устройства и используется в мощных трансформаторах при необходимости частого или непрерывного регулирования напряжения.

А. Трансформаторы с переключением числа витков в отключенном состоянии изготавливаются с регулированием напряжения относительно номинального на $\pm 5\%$ (силовые трансформаторы малой и средней мощности) или на $\pm 2,5\%$ и $\pm 5\%$ (трансформаторы бóльшей мощности). В первом случае трансформатор имеет три ступени, а во втором – пять ступеней напряжения. Ответвления целесообразно выполнять на той стороне, напряжение на которой в процессе эксплуатации подвергается изменениям. При этом магнитный поток трансформатора $\Phi \sim U/w$ при работе на разных ступенях (ответвлениях) меняется мало. Обычно это сторона высшего напряжения. Выполнение ответвлений на стороне высшего напряжения имеет также то преимущество, что при этом ввиду большого количества витков отбор $\pm 2,5\%$ и $\pm 5\%$ количества витков может быть произведен с бóльшей точностью. Кроме того, ток на стороне высшего напряжения меньше и переключатель получается более компактным.

Переключаемые участки обмотки между ответвлениями целесообразно располагать в окне трансформатора по высоте обмотки, в средней ее части, чтобы распределение частей обмотки, нагруженных током, было по отношению к ярмам при работе на разных ответвлениях по возможности симметричным. В противном случае магнитное поле рассеяния по сравнению со случаем, изображенным на рис. 1.2, с. 136, сильно искажается, что приводит к увеличению индуктивных сопротивлений рассеяния и к резкому увеличению усилий, действующих на обмотки при коротких за-

мыканиях (см. разд. 17.2, Б, с. 302, сл.). С другой стороны, ответвления предпочтительно выполнять со стороны заземленной нейтрали обмотки (нейтральной точки), так как изоляция переключателя при этом облегчается.

На рис. 15.7 показаны наиболее характерные схемы выполнения обмоток с ответвлениями. Схема рис. 15.7,а применяется при многослойной цилиндрической обмотке, и ответвления располагаются в крайнем цилиндрическом слое. В схеме рис. 15.7,б обмотки выполняются из двух частей, намотанных в разные стороны, чтобы ЭДС и МДС двух частей обмоток складывались, а не вычитались. В схемах рис. 15.7,а и б применяется общий переключатель для трех фаз (рис. 15.8,а и 10.11, с. 206), а в схемах рис. 15.7,в и г каждая фаза имеет свой переключатель (рис. 15.8,б), так как в этом случае между ответвлениями разных фаз существует напряжение $U \approx 0,5U_{\text{ном}}$. Переключатели располагаются внутри бака трансформатора, а концы осей переключателей выводятся на крышку бака (рис. 10.1, с.191).

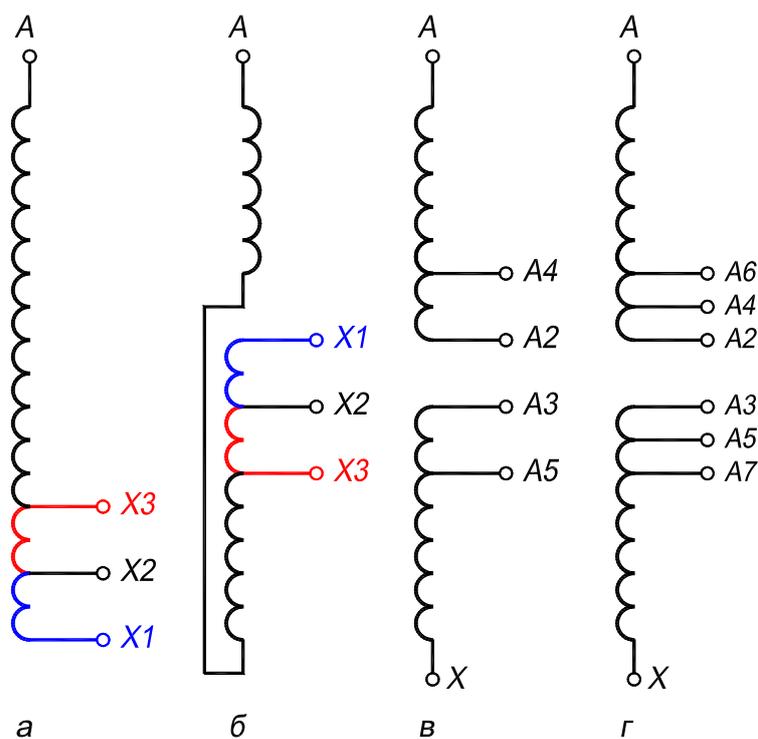


Рис. 15.7. Схемы обмоток с ответвлениями для регулирования напряжения

Б. Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой (трансформаторы с РПН) обычно рассчитаны для регулирования напряжения в пределах 6–10% через 1,25–1,67%. В этих трансформаторах переход с одной ступени на другую должен происходить без разрыва цепи тока. Поэтому в промежуточном положении включены два соседних ответвления обмотки и часть обмотки между ними оказывается замкнутой накоротко. Для ограничения тока короткого замыкания применяются токоограничивающие реактивные или активные сопротивления.

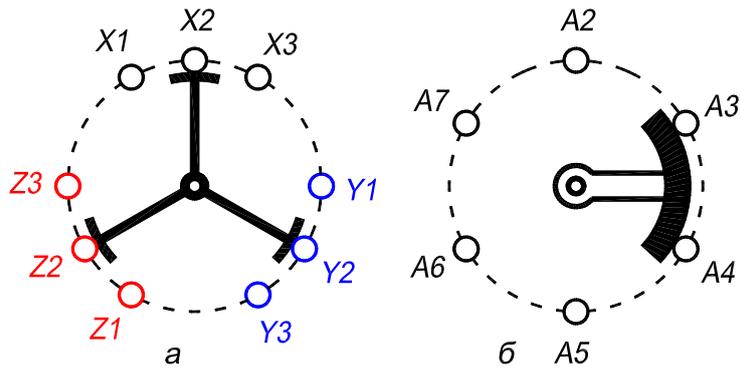


Рис. 15.8. Схемы переключателей для регулирования напряжения

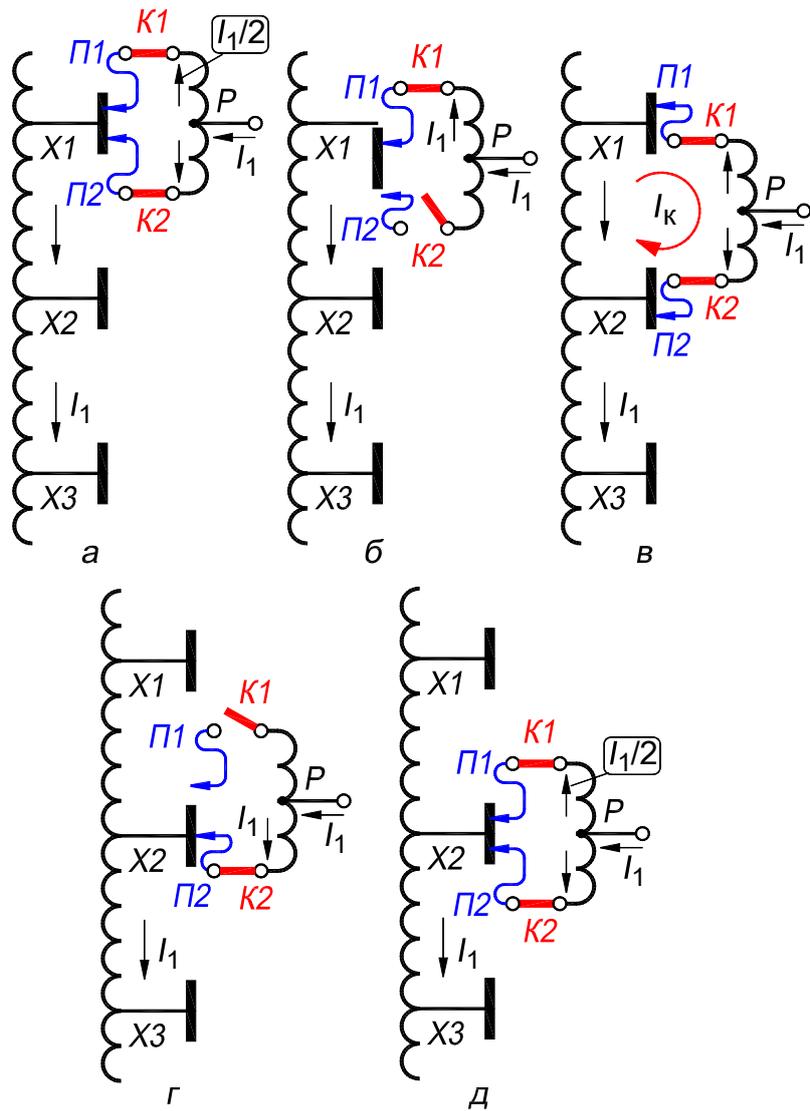


Рис. 15.9. Переключение ответвлений обмотки для регулирования напряжения под нагрузкой с использованием токоограничивающего реактора

На рис. 15.9 приведена схема переключения с токоограничивающим реактором P и показано пять последовательных позиций при переходе с ответвления $X1$ (позиция a) на ответвление $X2$ (позиция $д$). В каждой из двух

ветвей схемы переключения имеется контактор ($K1, K2$) для выключения тока $I_1/2$ из данной ветви перед ее переключением и подвижные контакты переключателя ($П1, П2$), которые рассчитаны для переключения ветвей без тока. В нормальном рабочем положении (позиции a и d) токи $I_1/2$ двух ветвей схемы обтекают две половины обмотки реактора в разных направлениях. Поэтому поток в сердечнике реактора практически отсутствует и индуктивное сопротивление реактора мало. Наоборот, ток I_k короткого замыкания ступени, возникающий при промежуточном положении переключателя и показанный на рис. 15.9, b линией красного цвета, обтекает всю обмотку реактора в одинаковом направлении, при этом сердечник реактора намагничивается и сопротивление реактора по отношению к этому току велико.

Реактор P и переключатели $П$ помещаются внутри бака трансформатора, а контакторы K – в специальном дополнительном баке, который монтируется на боковой стенке бака трансформатора. При таком устройстве масло в баке трансформатора защищено от загрязнения, вызываемого работой контакторов при разрыве ими цепи тока (рис. 10.26, с.214).

На рис. 15.10 показана принципиальная схема переключения под нагрузкой с применением активных токоограничивающих сопротивлений R_1 и R_2 . При положении переключателей, показанном на рис. 15.10, трансформатор работает на ответвлении $X2$. При переходе на соседнее ответвление $X3$ сначала в положение работы на ответвлении $X3$ переводится переключатель $П1$, а затем переключатель $П$ под воздействием соответствующего механизма быстро поворачивается (по часовой стрелке) и он последовательно размыкает контакт 3 , соединяет контакты 4 и 1 , размыкает контакт 4 и соединяет контакты 1 и 2 , становясь в положение симметричное тому, которое показано на рис. 15.10.

Весь процесс переключения автоматизирован и происходит в течение сотых долей секунды. Быстродействующий переключатель $П$ совместно с токоограничивающими сопротивлениями R_1 и R_2 монтируется в специальном масляном баке.

В отечественном трансформаторостроении наиболее широкое применение получила реакторная схема регулирования напряжения под нагрузкой (рис. 15.9).

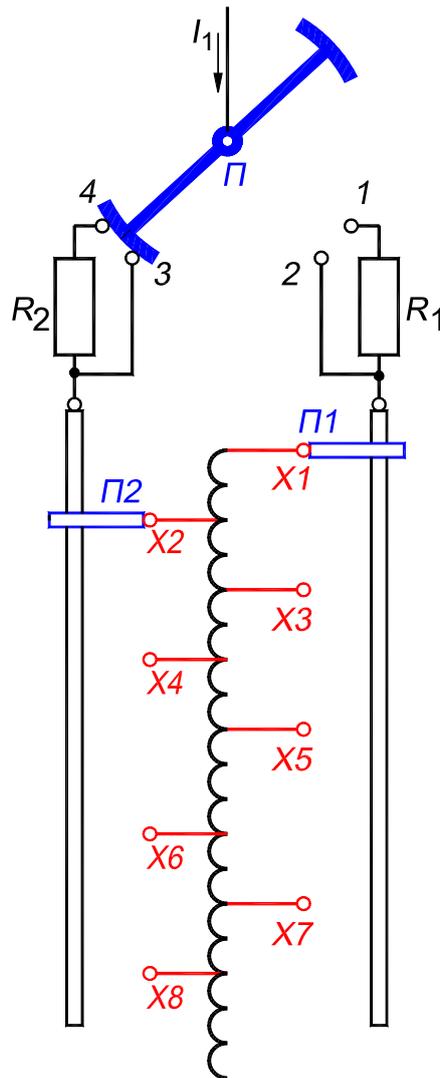


Рис. 15.10. Схема регулирования напряжения под нагрузкой с использованием активных токоограничивающих сопротивлений

15.6. Коэффициент полезного действия трансформатора

Под КПД трансформатора, так же как и всякой другой электрической машины, понимается отношение отдаваемой трансформатором мощности P_2 , выраженной в единицах активной мощности, т. е. в киловаттах или ваттах, к подведенной мощности P_1 , выраженной в тех же единицах, что P_2 . Таким образом,

$$\eta = P_2/P_1 \text{ или } \eta = 100P_2/P_1, \%. \quad (15.9)$$

Так как КПД силового трансформатора весьма высок (в трансформаторах большой мощности выше 99 %), то метод прямого определения КПД путем непосредственного измерения мощностей P_2 и P_1 не рекомендуется, поскольку неизбежные погрешности при измерении мощностей P_2 и P_1 могут дать грубую ошибку в определении КПД.

В этом отношении *преимущество имеет метод косвенного определения КПД*, когда та или иная мощность выражается через другую и потери.

Если P_2 – отдаваемая трансформатором мощность, Σp – сумма потерь в трансформаторе в тех же единицах, то КПД в процентах

$$\eta = 100 \cdot P_2 / (P_2 + \Sigma p) = [1 - \Sigma p / (P_2 + \Sigma p)] \cdot 100. \quad (15.10)$$

Если $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, $\beta = I_2 / I_{2\text{НОМ}}$ – коэффициент нагрузки и $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки, то

$$P_2 = \beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2. \quad (15.11)$$

Потери в трансформаторе слагаются из потерь в стали $p_{\text{МГ}}$ и потерь в обмотках $p_{\text{Э}}$ (см. разд. В.13, с. 128, сл.). Таким образом,

$$\Sigma p = p_{\text{МГ}} + p_{\text{Э}}. \quad (15.12)$$

Трансформатор работает в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки при $U_1 = U_{\text{НОМ}} = \text{const}$. Потери в стали $p_{\text{МГ}}$ пропорциональны ЭДС E_1 во второй степени [формула (12.11)]. При холостом ходе ток I_x весьма мал и поэтому $E_1 \approx U_1$, а $P_x \approx p_{\text{МГ}}$. При нагрузке в первичной обмотке возникает падение напряжения, вследствие чего E_1 изменяется: при индуктивной нагрузке E_1 меньше U_1 (рис. 15.2,а), а при ёмкостной E_1 может оказаться больше U_1 (рис. 15.2,б). Для нормального случая индуктивной нагрузки ЭДС E_1 уменьшается на $\sim 2,5 - 4 \%$ при переходе от холостого хода к полной нагрузке. Соответственно потери в стали уменьшаются на $\sim 5 - 8 \%$. Учитывая, что $p_{\text{МГ}}$ обычно менее 1% от $S_{\text{НОМ}}$, таким изменением можно пренебречь и считать, что $p_{\text{МГ}}$ не зависит от нагрузки (при выполнении условия $U_1 = U_{\text{НОМ}}$), т. е

$$p_{\text{МГ}} = P_x \approx \text{const}. \quad (15.13)$$

Потери в обмотках $p_{\text{Э}} = I_1^2 R_k$ или, так как $I_1 = \beta I_{1\text{НОМ}}$, то

$$p_{\text{Э}} = \beta^2 I_{1\text{НОМ}}^2 = \beta^2 p_{\text{к.НОМ}}. \quad (15.14)$$

Здесь $p_{\text{к.НОМ}}$ – мощность, потребляемая трансформатором при коротком замыкании и расходуемая на покрытие потерь в обмотках при номинальном токе $I_{1\text{НОМ}}$ и температуре 75°C . После подстановки значений $p_{\text{МГ}}$ и $p_{\text{Э}}$ в формулу (15.10)

$$\begin{aligned} \eta &= [1 - (p_{\text{МГ}} + p_{\text{э}})/(P_2 + p_{\text{МГ}} + p_{\text{э}})] \cdot 100 = \\ &= [1 - (p_{\text{х.ном}} + \beta^2 p_{\text{к.ном}})/(\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + p_{\text{х.ном}} + \beta^2 p_{\text{к.ном}})] \cdot 100 = f(\beta). \end{aligned} \quad (15.15)$$

В правой части уравнения (15.15) все величины постоянные, кроме коэффициента нагрузки β . КПД рассчитывают при фиксированном значении коэффициента мощности, $\cos \varphi_2 = \text{const}$.

Значение $p_{\text{х.ном}}$ определяется из опыта холостого хода при номинальном напряжении; значение $p_{\text{к.ном}}$ определяется из опыта короткого замыкания при номинальных токах. Значения этих величин задаются ГОСТ для каждого силового трансформатора.

Решая уравнение $d\eta/d\beta = 0$, определяют условие максимума КПД. Проведя эту операцию, получаем:

$$p_{\text{х.ном}} = \beta^2 p_{\text{к.ном}}, \quad (15.16)$$

т. е. КПД достигает максимума при такой нагрузке (значении β), при которой потери в обмотках равны потерям в магнитопроводе, или, формулируя иначе, переменные потери равны постоянным (разд. В.13, с. 128, сл.).

Силовые масляные трансформаторы рассчитываются таким образом, чтобы

$$p_{\text{х.ном}}/p_{\text{к.ном}} \approx 0,25 - 0,2.$$

Поэтому КПД имеет максимум при нагрузке $\sim 0,45 - 0,65$ от номинальной. Обычно трансформаторы в энергосистеме работают с некоторой недогрузкой – в области максимального значения КПД.

Зависимость КПД трёхфазного трансформатора от относительного вторичного тока нагрузки $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$, представлена на рис. 15.11.

При передаче реактивной мощности, то есть при уменьшении $\cos \varphi_2$, уменьшается и КПД /см. выражение (15.15)/.

Пример. Требуется определить КПД трансформатора мощностью 160 кВ·А, 6300/400 В при $\beta = 3/4$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$. Согласно ГОСТ 27360-87, $P_{\text{х.ном}} = 430$ Вт и $P_{\text{к.ном}} = 2350$ Вт. Результат вычисления – $\eta = 98,2$ % (формула 15.15). В рассмотренном случае максимальное значение КПД η_{max} имеет место при

$$\beta = \sqrt{(p_{\text{х.ном}}/p_{\text{к.ном}})} = \sqrt{(430/2350)} = 0,428.$$

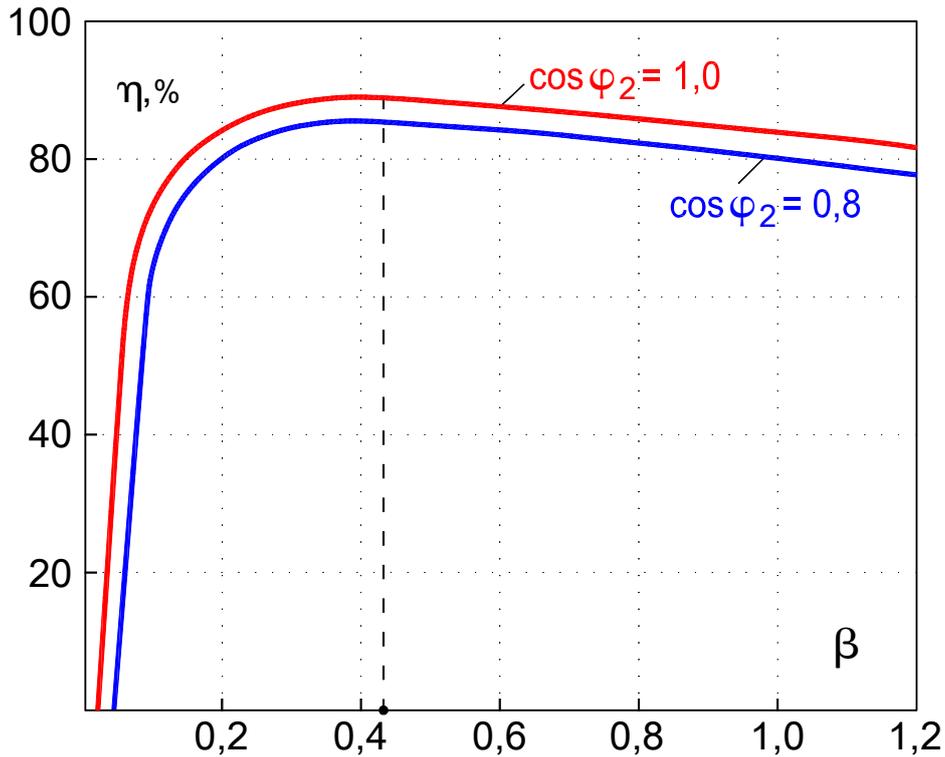


Рис. 15.11. Зависимость КПД трёхфазного трансформатора от коэффициента нагрузки β

В пределах от $\beta = 1/4$ до $\beta = 1$ КПД трансформатора очень мало изменяется.

В трансформаторах большой мощности потери при номинальной нагрузке меньше 1 % от номинальной мощности трансформатора.

КПД, вычисляемый по формуле (15.15), часто называется мгновенным в отличие от годового КПД η_g трансформатора. Для определения последнего нужна знать график работы трансформатора. Годовой КПД обычно ниже мгновенного.

Как правило трансформаторы неравномерно загружены в течение суток и в течение года, так как потребление электрической энергии значительно изменяется вечером и ночью, а также в летнее время и в период осенне-зимнего максимума. Поэтому для оценки использования трансформатора в энергосистемах пользуются понятием годового КПД, который определяется отношением отдаваемой во вторичную сеть энергии в течение года к энергии, полученной из сети.

Эксплуатационные характеристики трёхфазного трансформаторов исследуются в Работе № 1 (с. 353,сл).

15.7. Энергетические диаграммы трансформатора

Преобразование активной мощности трансформатора происходит согласно энергетической диаграмме рис. 15.12,*а*, соответствующей схеме замещения рис. 14.3,*а* и векторным диаграммам рис. 15.2.

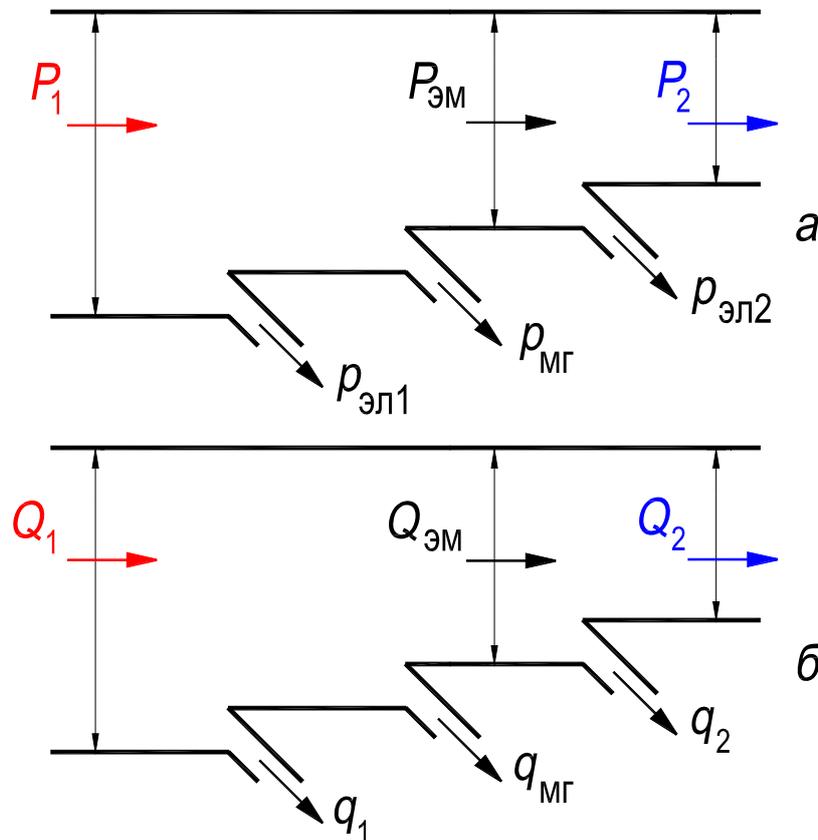


Рис. 15.12. Энергетическая диаграмма трансформатора:
а – активной мощности; *б* – реактивной мощности

На рис. 15.12,*а* символом $P_{эм}$ обозначена внутренняя электромагнитная мощность трансформатора, определяемая как:

$$P_{эм} = P_1 - p_{эл1} - p_{МГ},$$

где $P_1 = 3U_1I_1\cos\varphi_1$ – активная мощность, поступающая в первичную обмотку из сети; $p_{эл1}$ – электрические потери мощности в первичной обмотке трансформатора; $p_{МГ}$ – магнитные потери в трансформаторе (потери в стали).

Мощность P_2 , отдаваемая трансформатором нагрузке, меньше внутренней электромагнитной мощности на величину $p_{эл2}$, которая соответствует электрическим потерям мощности во вторичной обмотке трансформатора, то есть

$$P_2 = P_{эм} - p_{эл2} = 3U_2I_2\cos\varphi_2 = 3U_2'I_2'\cos\varphi_2.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора равен $\eta = 100 \cdot P_2/P_1, \%$.

Преобразование реактивной мощности происходит согласно энергетической диаграмме рис. 15.12,б. Из первичной реактивной мощности

$$Q_1 = 3U_1I_1\sin \varphi_1$$

мощность

$$q_1 = 3I_1^2X_1$$

расходуется на создание магнитного поля рассеяния первичной обмотки, а мощность

$$q_{\text{мг}} = 3I_X^2X_m$$

– на создание магнитного поля взаимной индукции (поля в магнитопроводе).

Реактивная мощность

$$q_2 = 3(I_2')^2X_2'$$

расходуется на создание магнитного поля рассеяния вторичной обмотки, а оставшаяся мощность

$$Q_2 = Q_1 - q_1 - q_{\text{мг}} - q_2 = 3U_2I_2\sin \varphi_2 = 3U_2'I_2'\sin \varphi_2$$

передается потребителю.

При активно-ёмкостной нагрузке $\varphi_2 < 0$, а также $Q_2 < 0$. Изменение знака Q_2 означает изменение направления передачи реактивной мощности. Если при этом также

$$Q_1 = Q_2 + q_2 + q_{\text{мг}} + q_1 < 0,$$

то реактивная мощность передается с вторичной стороны на первичную. Если же $Q_2 < 0$, а $Q_1 > 0$, то реактивная мощность потребляется как с первичной, так и с вторичной стороны и расходуется на намагничивание трансформатора.

Реактивная мощность в электрических машинах переменного тока и в трансформаторах расходуется на создание магнитного поля устройств.

Коэффициент мощности трансформатора

$$\cos \varphi_1 = P_1/S_1 = P_1/(P_1^2 + Q_1^2)^{1/2}.$$

15.8. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке

А. Применение метода симметричных составляющих. На практике встречаются случаи, когда отдельные фазы трансформатора нагружены несимметрично (неравномерное распределение осветительной нагрузки по фазам, приключение мощных однофазных приемников и т. д.). Кроме того, в электрических сетях, питающихся от трансформаторов, случаются несимметричные короткие замыкания (однофазные на землю или на нейтральный провод и двухфазные). При анализе несимметричных режимов работы трансформатора будем предполагать, что трансформатор имеет симметричное устройство, т. е. все три фазы одинаковы в магнитном и электрическом отношении.

Как известно, общим методом анализа несимметричных режимов является *метод симметричных составляющих*. Согласно этому методу, трехфазная несимметричная система токов $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ разлагается на системы токов прямой ($\underline{I}_{a1}, \underline{I}_{b1}, \underline{I}_{c1}$), обратной ($\underline{I}_{a2}, \underline{I}_{b2}, \underline{I}_{c2}$) и нулевой ($\underline{I}_{a0}, \underline{I}_{b0}, \underline{I}_{c0}$) последовательностей (рис. 15.13). Векторы токов прямой последовательности $\underline{I}_{a1}, \underline{I}_{b1}, \underline{I}_{c1}$ равны по величине и чередуются со сдвигом по фазе на 120° в направлении движения часовой стрелки. Векторы токов обратной последовательности $\underline{I}_{a2}, \underline{I}_{b2}, \underline{I}_{c2}$ также равны по величине, но чередуются со сдвигом по фазе на 120° в направлении, обратном движению часовой стрелки. Векторы токов нулевой последовательности $\underline{I}_{a0}, \underline{I}_{b0}, \underline{I}_{c0}$ равны по величине и совпадают по фазе.

При этом

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{a0};$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{a0};$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c0}.$$

Так как сумма токов прямой последовательности, также как и обратной, равна нулю, то сумма токов трёх фаз отлична от нуля и составляет

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 3\underline{I}_{a0}.$$

Совершенно аналогичные соотношения действительны также для несимметричной системы напряжений фаз $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ и их симметричных составляющих.

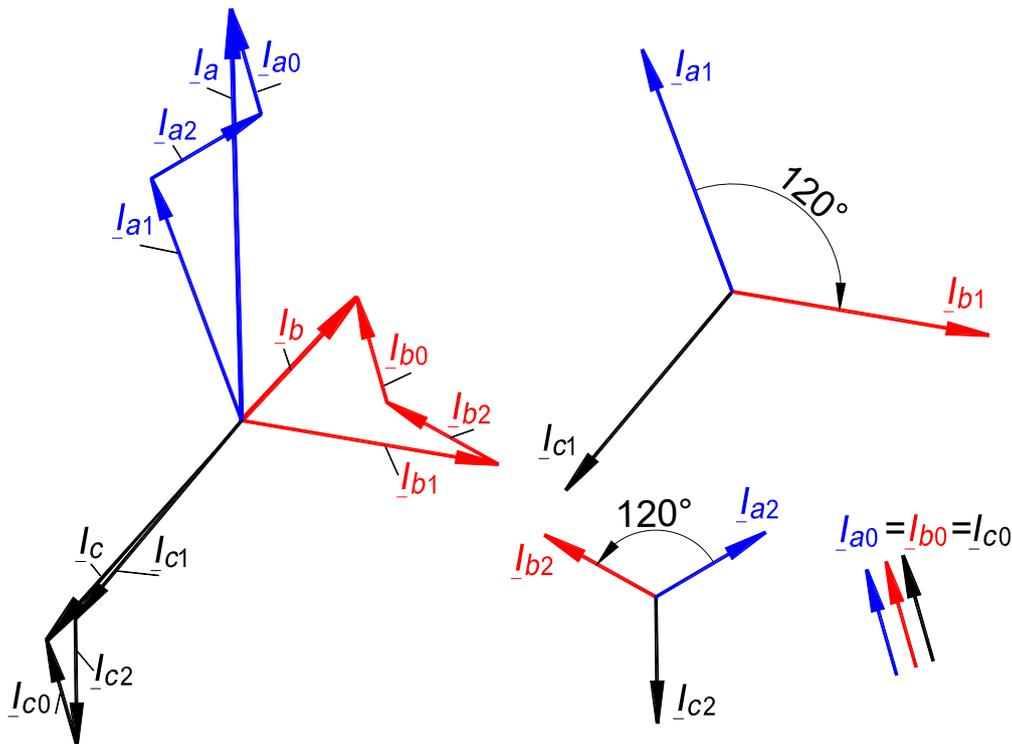


Рис. 15.13. Симметричные составляющие трехфазных токов

Очевидно, что применение метода симметричных составляющих основано на принципе наложения. Ниже предполагается, что для всех участков магнитной цепи трансформатора $\mu = \text{const}$, чем и обусловлена возможность применения этого принципа (разд. В9, с. 83, сл.).

Будем также предполагать, что числа витков первичной и вторичной обмоток равны ($w_1 = w_2$) и поэтому нет надобности различать неприведённые и приведенные вторичные величины и обозначать последние штрихами. Общность получаемых при этом результатов не нарушается, так как всегда можно произвести соответствующие пересчеты. Первичные фазные величины будем обозначать индексами A, B, C , а вторичные – индексами a, b, c .

Б. Схемы замещения и сопротивления трансформатора для токов прямой и обратной последовательности. В предыдущих разделах рассматривалась работа трансформатора при симметричной нагрузке, когда токи фаз трансформатора составляли симметричную систему, т. е. в этом случае существуют только токи прямой последовательности. Поэтому всё изложенное в предыдущих главах соответствовало работе трансформатора с токами прямой последовательности.

Если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, поменять местами два зажима со стороны высшего напряжения (например,

B и *C*) и со стороны низшего напряжения (например, *b* и *c*), то режим работы потребителей и самого трансформатора не изменится. Однако чередование векторов токов фаз трансформатора при этом изменится на обратное, т. е. будет соответствовать токам обратной последовательности. Следовательно, токи обратной последовательности трансформируются из одной обмотки в другую так же, как и токи прямой последовательности.

Таким образом, поведение трансформатора по отношению к токам прямой и обратной последовательности одинаково. Поэтому схемы замещения рис. 14.3, с. 251, действительны как для токов прямой, так и для токов обратной последовательности. Сопротивление трансформатора по отношению к токам этих последовательностей также одинаково и равно сопротивлению короткого замыкания Z_k .

Можно отметить, что любое симметричное статическое (не имеющее вращающихся частей) трёхфазное устройство (трансформатор, линия передачи, электрическая печь и т. д.) имеет равные сопротивления для токов прямой и обратной последовательности.

В. Токи и потоки нулевой последовательности в трансформаторах. В обмотках, соединенных звездой, токи нулевой последовательности могут возникать только при наличии нейтрального провода (рис. 15.14,*a*), так как I_{a0} , I_{b0} , I_{c0} равны по величине и по фазе, в каждый момент времени направлены во всех фазах одинаково и поэтому цепь этих токов может замыкаться только через нейтральный провод. В нейтральном проводе протекает ток

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0}. \quad (16-7)$$

Роль нейтрального провода может играть также земля, если нейтральная точка трансформатора заземлена.

В обмотках, соединенных треугольником (рис. 15.14,*б*), токи $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$ составляют ток, циркулирующий по замкнутому контуру. Линейные токи, которые представляют собой разности токов смежных фаз, в данном случае не содержат токов нулевой последовательности. Поэтому токи нулевой последовательности в обмотке, соединенной треугольником, могут возникать только в результате индуцирования их другой обмоткой трансформатора.

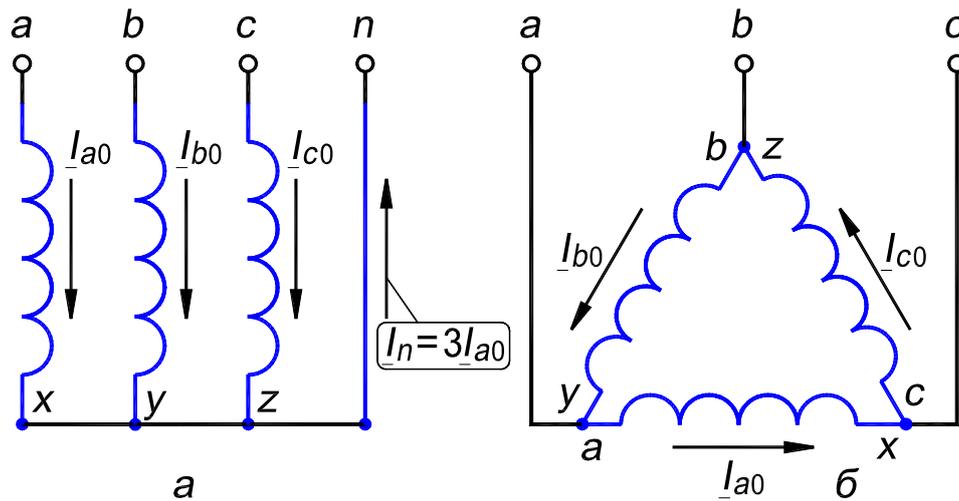


Рис. 15.14. Токи нулевой последовательности в обмотках, соединенных в звезду с нейтральным проводом (а) и в треугольник (б)

Токи нулевой последовательности создают во всех фазах потоки нулевой последовательности $\Phi_{0п}$, которые во времени совпадают по фазе. В этом отношении они аналогичны третьим гармоникам потока трехфазных трансформаторов, возникающим вследствие насыщения магнитной цепи (разд. 13.3, с. 237, сл.), и проходят в сердечниках таким же образом (рис. 13.9, с. 239). В трансформаторах броневого и бронестержневой конструкции (рис. 9.5, с. 173), а также в трехфазной группе однофазных трансформаторов (рис. 9.2, с. 170) потоки $\Phi_{0п}$ замыкаются по замкнутым стальным сердечникам. Поэтому в данном случае магнитное сопротивление для потоков $\Phi_{0п}$ мало и уже небольшие токи $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$ способны создавать большие потоки $\Phi_{0п}$. Действительно, если ток I_{a0} равен току холостого хода трансформатора, то поток $\Phi_{0п}$ равен нормальному рабочему потоку трансформатора. В трёхстержневом трансформаторе потоки нулевой последовательности направлены в каждый момент времени во всех стержнях одинаково и поэтому замыкаются от одного ярма к другому через масло и бак трансформатора (рис. 13.9). В этом случае магнитное сопротивление для $\Phi_{0п}$ относительно велико, а в стенках бака индуцируются вихревые токи и возникают потери.

Из сказанного следует, что токи и потоки нулевой последовательности в трансформаторах различной конструкции в с различными соединениями обмоток проявляются и действуют аналогично третьим гармоникам намагничивающего тока и потока. Разница заключается лишь в том, что первые изменяются с основной, а вторые – с трехкратной частотой.

Как отмечалось выше на практике возможна несимметричная нагрузка, т. е. такая нагрузка, когда токи в разных фазах неодинаковы, например, в сети имеются однофазные приемники (сварочные трансформаторы, индукционные печи и т. п.). Предельным случаем асимметрии токов является несимметричное короткое замыкание. Далее рассматриваются только два основных режима: однофазное короткое замыкание в системе $Y/Y_n - 0$ и то же в системе $\Delta/Y_n - 11$ с целью показать влияние способа соединения обмоток.

Г. Однофазное короткое замыкание в группе $Y/Y_n - 0$. Схема однофазного короткого замыкания дана на рис. 15.15,а. Пусть к трансформатору подводится симметричное линейное напряжение, и вторичная обмотка приведена к первичной.

Фаза $c-z$ вторичной обмотки трансформатора замкнута накоротко, а фазы $a-x$ и $b-y$ разомкнуты. Тогда $I_c = I_k$; $I_a = I_b = 0$.

Первичная обмотка не имеет выведенной нейтральной точки. Поэтому ток I_C в фазе $C-Z$, соответствующий току I'_k в фазе $c-z$, использует в качестве обратных проводов фазы $A-X$ и $B-Y$. По отношению к фазе $C-Z$ эти обе обмотки находятся в совершенно одинаковых условиях; поэтому ток I_C разветвляется в них пополам, так что $I_A = I_B = I_C/2$.

Если при этом ток I_C в фазе $C-Z$ направлен к нейтральной точке, то токи I_A и I_B в фазах $A-X$ и $B-Y$ направлены от нее, т. е. в обратном относительно тока I_C направлении.

Этому распределению токов соответствует распределение создаваемых ими магнитодвижущих сил, например, магнитодвижущая сила, создаваемая током I'_k в фазе $c-z$ направлена в стержне C снизу вверх (рис. 15.15,а); тогда по условию равновесия магнитодвижущая сила, создаваемая током I_C в фазе $C-Z$, действует в том же стержне сверху вниз, а магнитодвижущие силы, создаваемые токами I_A и I_B в фазах $A-X$ и $B-Y$, направлены в стержнях A и B снизу вверх.

Чтобы определить отношение между токами I_C и I'_k , можно рассмотреть замкнутый магнитный контур, состоящий из стержней C и B или C и A . В каждом из этих контуров действуют три магнитодвижущие силы, напри-

мер в контуре, образованном стержнями C и B , действуют магнитодвижущие силы $\sqrt{2}I_{CW_1}$, $\sqrt{2}I_{BW_1}$ и $\sqrt{2}I'_{кW_1}$. Магнитодвижущие силы $\sqrt{2}I_{CW_1}$ и $\sqrt{2}I_{BW_1}$ действуют по контуру согласно, тогда как магнитодвижущая сила $\sqrt{2}I'_{кW_1}$ направлена встречно им. Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, то по условию равновесия магнитодвижущих сил

$$\sqrt{2}I_{CW_1} + \sqrt{2}I_{BW_1} + \sqrt{2}I'_{кW_1} = 0.$$

Так как $\sqrt{2}I_{BW_1}$ по величине равна $\sqrt{2}I_{CW_1}/2$ и по контуру действуют согласно, то

$$\sqrt{2}I_{CW_1} + \sqrt{2}I_{BW_1} = \sqrt{2}I_{CW_1} + \sqrt{2}I_{CW_1}/2 = 3\sqrt{2}I_{CW_1}/2 = -\sqrt{2}I'_{кW_1},$$

откуда

$$I_C = -2I'_{к}/3 \text{ и } I_A = I_B = I'_{к}/3,$$

причем, согласно сказанному выше, токи I_C и $I_A = I_B$ направлены в разные стороны относительно нейтральной точки первичной обмотки.

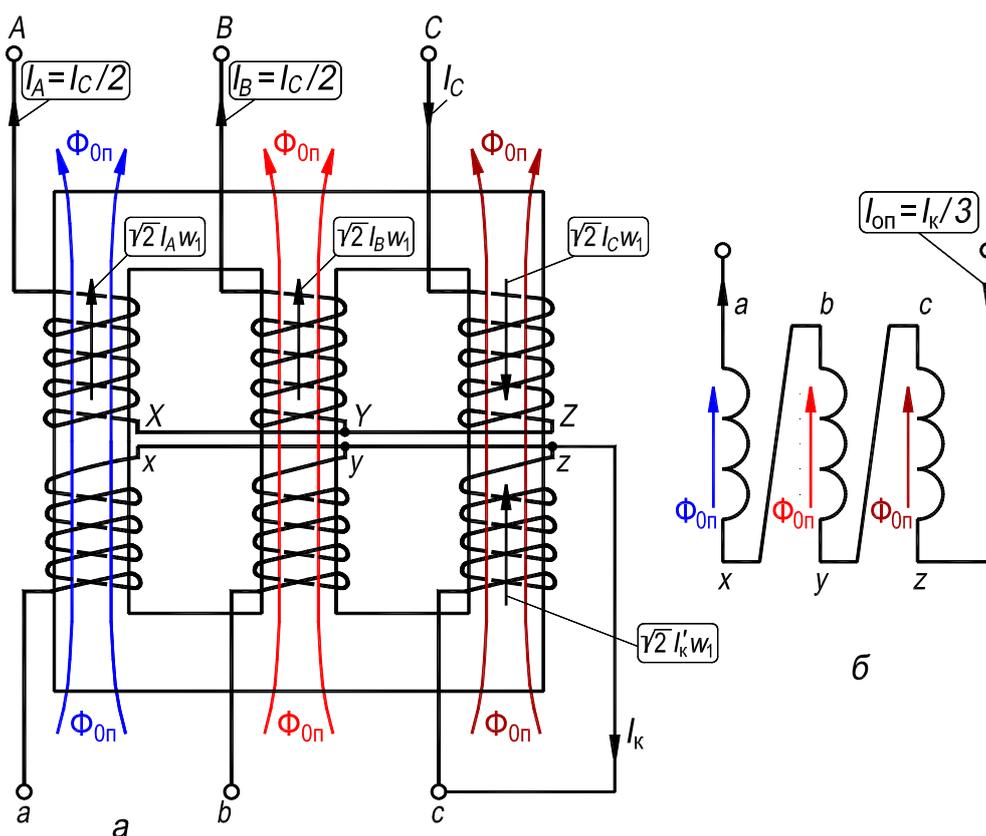


Рис. 15.15. Однофазное короткое замыкание в группе Y/Y_n-0 :

a – схема, b – однофазный поток

Результирующая магнитодвижущая сила в стержне C составляет $\sqrt{2}I'_{кW_1} - \sqrt{2}I_{CW_1} = \sqrt{2}I'_{кW_1}/3$ и действует в сторону магнитодвижущей силы $\sqrt{2}I'_{кW_1}$, т. е. в данном случае снизу вверх; но в том же направлении и такой же величины

магнитодвижущие силы действуют и в стержнях A и B . Таким образом, во всех стержнях трансформатора одновременно существуют магнитодвижущие силы, равные по величине и направленные относительно стержней в одну и ту же сторону, т. е. совпадающие по фазе. Эти магнитодвижущие силы создают добавочные потоки, которые, так же как магнитодвижущие силы, должны быть все равны по величине и одинаково направлены.

Чтобы представить себе картину таких магнитодвижущих сил и потоков, можно соединить обмотки $a - x$, $b - y$ и $c - z$ последовательно так, как это показано на рис. 15.15,б. К зажимам $a - z$ этой цепи следует подвести от источника однофазного тока нормальной частоты такое напряжение, чтобы по цепи шел ток $I_{0п} = I_k/3$. Ток $I_{0п}$ называется током нулевой последовательности, а создаваемый им в каждом стержне трансформатора поток $\Phi_{0п}$ – однофазным потоком. Поток $\Phi_{0п}$ налагается на основной трехфазный поток трансформатора, соответствующий подводимому к первичной обмотке трехфазному напряжению, но по своему действию и по величине зависит от того, групповой это трансформатор или трёхстержневой.

В групповом трансформаторе (рис. 9.2, с. 170) поток $\Phi_{0п}$ достигает значительной величины, так как он может свободно замкнуться по сердечнику каждого из однофазных трансформаторов. Если пренебречь сопротивлением R_k по сравнению с X_k , то ток I_k , а стало быть, и поток $\Phi_{0п}$ будут отставать от ЭДС E_C , создаваемой основным потоком в фазе $C - Z$, на $\pi/2$ (рис. 15.16,а).

Действие потока $\Phi_{0п}$ состоит в создании в каждой фазной обмотке ЭДС $E_{0п}$, отстающей от $\Phi_{0п}$ на $\pi/2$.

В фазе $C - Z$ ЭДС $E_{0пC}$ направлена встречно относительно основной ЭДС E_C и в пределе может быть равна ей.

В фазах $A - X$ и $B - Y$ ЭДС $E_{0пA}$ и $E_{0пB}$ геометрически складываются с основными ЭДС E_A и E_B .

Если бы положение точки O было зафиксировано, то получился бы новый треугольник ЭДС $A'B'O$, равный треугольнику ABC и смещенный относительно последнего на величину $E_{0п}$. В действительности положение точек A , B , C фиксировано той сетью, к которой они присоединены, поэтому ЭДС $E_{0п}$ смещает нейтральную точку O относительно точек A , B и C в направлении, обратном направлению $E_{0п}$, т. е. в положение точки O' (рис. 15.16,б).

Таким образом, фазные ЭДС трансформатора претерпели резкое изменение: ЭДС короткозамкнутой фазы стала равной; нулю, ЭДС двух других фаз стали равными линейным напряжениям.

Так как это может повести к аварии приемников, например лампы, нормально работающих при фазном напряжении, то соединение Y/Y_n в групповом трансформаторе никогда не применяется.

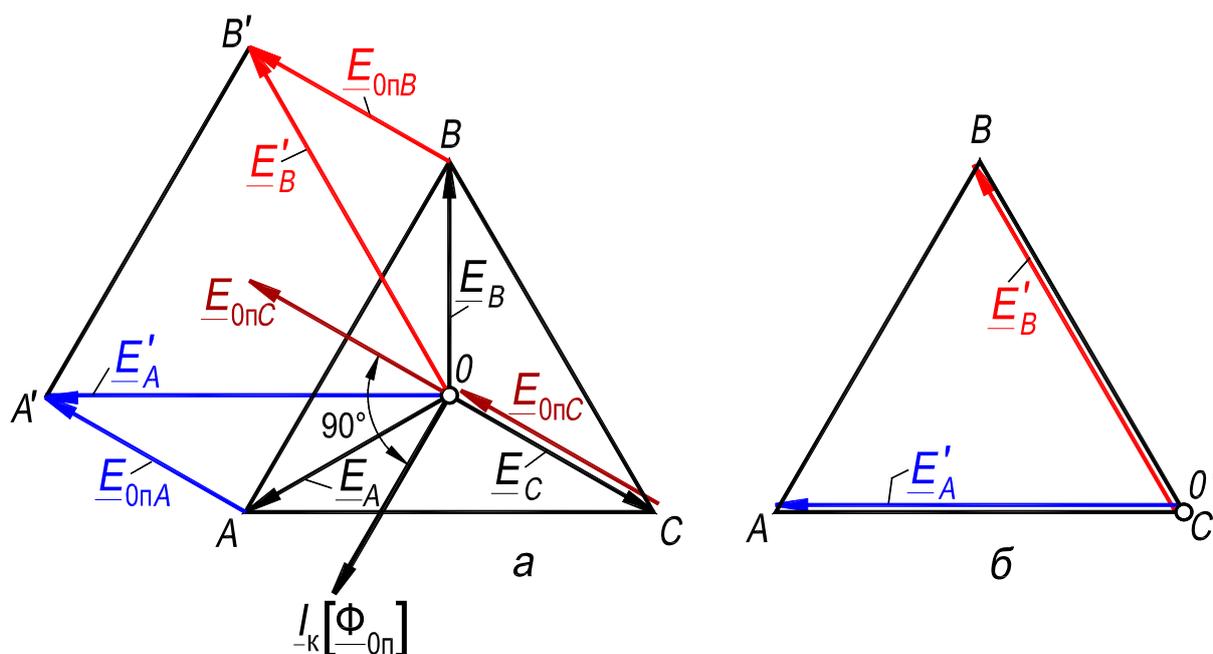


Рис. 15.16. Действие однофазного потока при соединении обмоток Y/Y_n-0 группового трансформатора: *a* – при зафиксированном положении точки 0 , *б* – при зафиксированных точках A , B и C

В трехстержневом трансформаторе потоки Φ_{0n} не могут замкнуться по сердечнику на том же основании, что и потоки третьей гармонической холостого хода, и замыкаются по воздуху (рис. 13.9, с. 239, и 15.13,*a*) со всеми вытекающими отсюда последствиями. Но так как этот путь имеет большое магнитное сопротивление, то поток Φ_{0n} и соответственно вызываемое им смещение нейтральной точки невелики.

Однофазное короткое замыкание является предельным случаем несимметрии тока в системе Y/Y_n-0 . При несимметричной нагрузке по нейтральному проводу течет ток нейтрали, который, согласно ГОСТ 11677–85, не должен превышать 25 % номинального тока обмотки низкого напряжения, причем ни один из фазных токов не должен превышать номинальный. Наблюдающееся при этом смещение нейтральной точки не превышает 5 % от нормального фазного напряжения.

Д. Однофазное короткое замыкание в системе Δ/Y_n . Этот случай яснее всего показывает, в чем состоит преимущество соединения первичной обмотки треугольником, если вторичная имеет выведенный нейтральный провод. Соответствующая схема приведена на рис. 15.17. Как и в предыдущем случае, фаза $c - z$ замкнута накоротко и вторичная обмотка приведена к первичной. Ток, идущий из сети, поступает практически только в обмотку BC , не ответвляясь в обмотки AB и AC , так как последние, при отсутствии тока в фазах $a - x$ и $b - y$ вторичной обмотки, представляют собой реактивные катушки с весьма большим индуктивным сопротивлением.

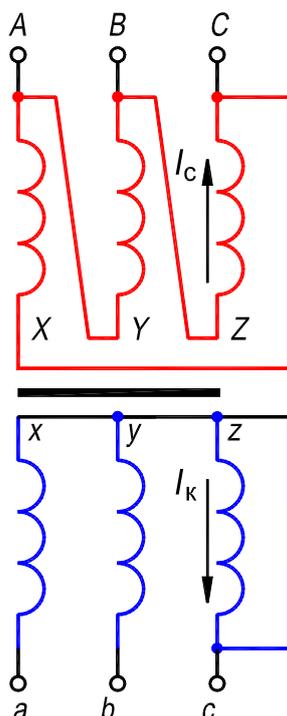


Рис. 15.17. Токи при коротком замыкании трансформатора группы Δ/Y_n

Таким образом, $I_C = I'_k$, т. е. первичные и вторичные магнитодвижущие силы фазы C взаимно уравновешиваются и опасность возникновения однофазного потока в сердечнике трансформатора отпадает. Поэтому ГОСТ 11677–85 в этом случае допускает ток нейтрального провода до 75 % номинального тока обмотки низшего напряжения.

Аналогичный эффект получается и в других случаях короткого замыкания трансформатора, одна из обмоток которого соединена треугольником.

Однофазное короткое замыкание в системах Y/Y_n , Δ/Y_n и Y/Z_n исследуется в Работе № 3 (с. 398, сл.).

16. Параллельная работа трансформаторов

16.1. Условия параллельной работы трансформаторов

Параллельной работой двух (или более) трансформаторов называется работа их по схеме включения, при которой первичные обмотки включены в общую первичную сеть, а вторичные – в общую вторичную сеть.

В некоторых электроустановках трансформаторы работают параллельно на общую нагрузку. В этом случае проще решаются вопросы надежного электро-снабжения потребителей; при сезонных и суточных изменениях нагрузки можно отключить часть трансформаторов, снижая потери электрической энергии; упрощается организация профилактических ремонтных работ и т. п.

При включении трансформаторов на параллельную работу необходимо, чтобы при холостом ходе в обмотках не возникали уравнивающие токи, а при нагрузке общая нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально номинальным мощностям. Для этого требуется соблюдение следующих четырех условий:

1. Первичные и вторичные номинальные напряжения трансформаторов должны быть равны (первые индексы «I» и «II»), например для двух параллельно работающих трансформаторов (вторые индексы «I» и «II»), т. е.

$$U_{1I} = U_{1II} = \dots = U_{1n}, \quad (16.1)$$

$$U_{2I} = U_{2II} = \dots = U_{2n}. \quad (16.2)$$

Практически это сводится к требованию равенства коэффициентов трансформации, т. е.

$$k_I = k_{II} = \dots = k_n. \quad (16.3)$$

При этом предполагается, что первичные номинальные напряжения в трансформаторах одинаковы.

2. При параллельной работе трехфазных трансформаторов они должны принадлежать к одной группе (разд. 13.2, Г, с. 233, сл.).

3. Равенство напряжений короткого замыкания, а также равенство активных и реактивных составляющих напряжений короткого замыкания трансформаторов (разд. 14.2, с. 242, сл.)

$$u_{кI} = u_{кII} = \dots = u_{кn}. \quad (16.4)$$

4. Рекомендуется, чтобы для параллельно работающих трансформаторов отношение наибольшей мощности к наименьшей не превышало 3 : 1.

Если первые два из этих условий соблюдены, то вторичные напряжения соответствующих фаз параллельно включенных трансформаторов на холостом ходу, когда вторичные обмотки разомкнуты, будут равны по величине и по фазе. Поэтому при включении вторичных обмоток на общие шины в этих обмотках при отсутствии нагрузки не возникает никаких токов. В противном случае уже на холостом ходу возникают уравнительные токи I_{y2} , которые будут циркулировать по замкнутым контурам, образуемым вторичными обмотками параллельно включенных трансформаторов, и трансформироваться также на первичные обмотки. На рис. 16.1 такие токи показаны синими и красными стрелками. Уравнивательные токи, если они даже и не очень велики и поэтому не приводят к аварии, складываясь при подключении потребителей с токами нагрузки, вызывают неравномерную нагрузку, а также излишние потери и нагрев трансформаторов.

Соблюдение третьего из указанных условий обеспечивает равномерное распределение нагрузки между трансформаторами.

Безусловно должно выполняться второе условие параллельного включения. Равенства (16.3) и (16.4) могут соблюдаться не точно, возможные отклонения устанавливаются допуском на коэффициент трансформации и напряжение короткого замыкания, согласно ГОСТ 11677–85.

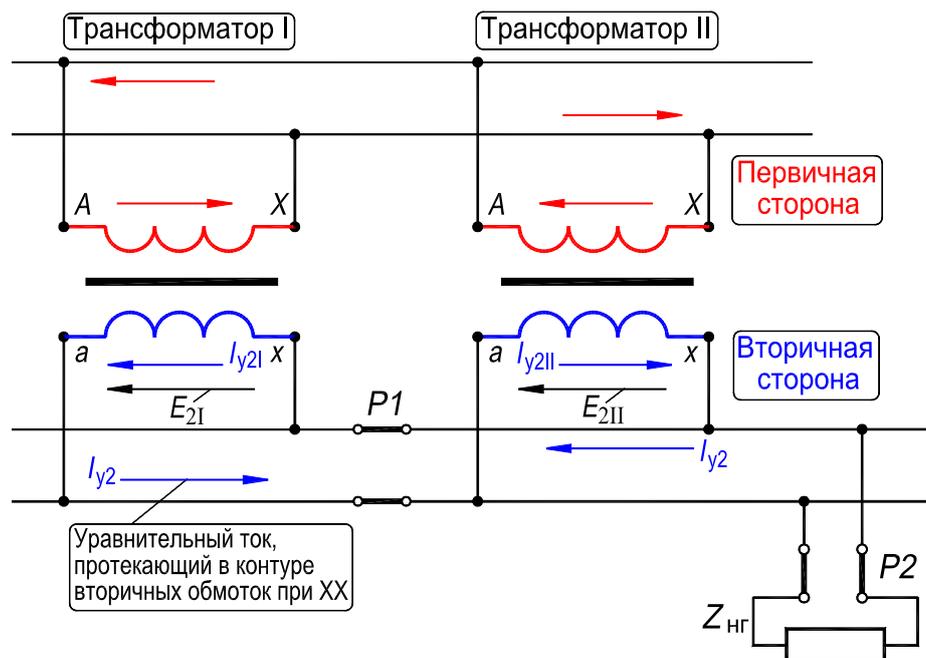


Рис. 16.1. Схема параллельной работы двухобмоточных однофазных трансформаторов

На рис. 16.1 изображена схема параллельного включения двух однофазных трансформаторов. Стрелками черного цвета показаны направления ЭДС во вторичных обмотках трансформаторов в рассматриваемый момент времени.

Далее анализируется состояние трансформаторов, включенных параллельно, в предположении что одно из перечисленных выше четырёх условий не выполняется, а остальные три выполняются. Для удобства анализа предполагаем, что номинальные мощности трансформаторов равны $S_{I,ном} = S_{II,ном}$; пренебрегаем активными сопротивлениями обмоток $R_{кI}$ и $R_{кII}$ и намагничивающим током трансформаторов. Анализ выполняется на примере однофазных трансформаторов. Результаты анализа справедливы и для трёхфазных трансформаторов.

16.2. Условие равенства коэффициентов трансформации (равенство напряжений трансформаторов)

Рассматривается параллельная работа двух трансформаторов, для которых условие 1 не выполняется, а условия 2, 3 и 4 соблюдены (разд. 16.1). Выполним анализ для двух случаев: 1) нагрузка $Z_{нг}$ отсутствует, трансформаторы I и II находятся в режиме холостого хода; 2) нагрузка $Z_{нг}$ включена.

А. Трансформаторы в режиме холостого хода. Пусть первичные номинальные напряжения трансформаторов одинаковы, $U_{I,ном} = U_{II,ном}$, но их коэффициенты трансформации не равны, причём $k_I < k_{II}$. Так как первичные обмотки трансформаторов включены в общую сеть, то $U_{I1} = U_{II1}$, тогда $E_{2I} > E_{2II}$. Если вторичные обмотки присоединить к общей сети (рис. 16.1; $P1$ замкнут, $P2$ разомкнут), то под влиянием разности ЭДС $\Delta E = E_{2I} - E_{2II}$ в контуре вторичных обмоток возникает уравнивающий ток I_{y2} . Причём ток I_{y2I} отстаёт от ЭДС ΔE и соответственно от E_{2I} первого трансформатора на угол 90° . Ток I_{y2II} относительно зажимов вторичной обмотки в трансформаторе II своё направление изменяет на противоположное по сравнению с током I_{y2I} (рис. 16.1 и 16.2).

Так как первичная и вторичная обмотки трансформаторов связаны магнитным потоком, то появление уравнивающего тока в контуре, образованном вторичными обмотками трансформатора, вызовет появление соответствующего уравнивающего тока в контуре, образованном первичными обмотками трансформатора. Но уравнивающий ток протекает последовательно по цепи, образованной только обмотками обоих трансформаторов; следовательно, все происходит так, как если бы по отношению к ЭДС ΔE оба трансформатора находились в условиях короткого замыкания. Так как активные сопротивления короткого замыкания обмоток не учитываем, то

$$I_{y2} = \Delta E / (X_{кI} + X_{кII}), \quad (16.5)$$

где $X_{кI}$ и $X_{кII}$ – индуктивные сопротивления короткого замыкания.

Б. Холостой ход трансформаторов. Так как уравнительные токи I_{y2I} и I_{y2II} протекают во вторичных обмотках в противоположных направлениях, то и обусловленные ими падения напряжения на индуктивных сопротивлениях обмоток $\underline{E}_{y2I} = -jI_{y2I}X_{кI}$ и $\underline{E}_{y2II} = -jI_{y2II}X_{кII}$ будут также сдвинуты на 180° , причем $jI_{y2I}X_{кI}$ во вторичной обмотке трансформатора I стремится уменьшить напряжение (рис. 16.1 и 16.2). Напротив напряжение $jI_{y2II}X_{кII}$ во вторичной обмотке трансформатора II стремится увеличить напряжение. Таким образом напряжения на параллельно включенных вторичных обмотках трансформаторов I и II выравниваются и устанавливается единое, одинаковое напряжение U_2 . В этом и состоит смысл уравнительного тока: обеспечить выравнивание напряжений параллельно включённых обмоток.

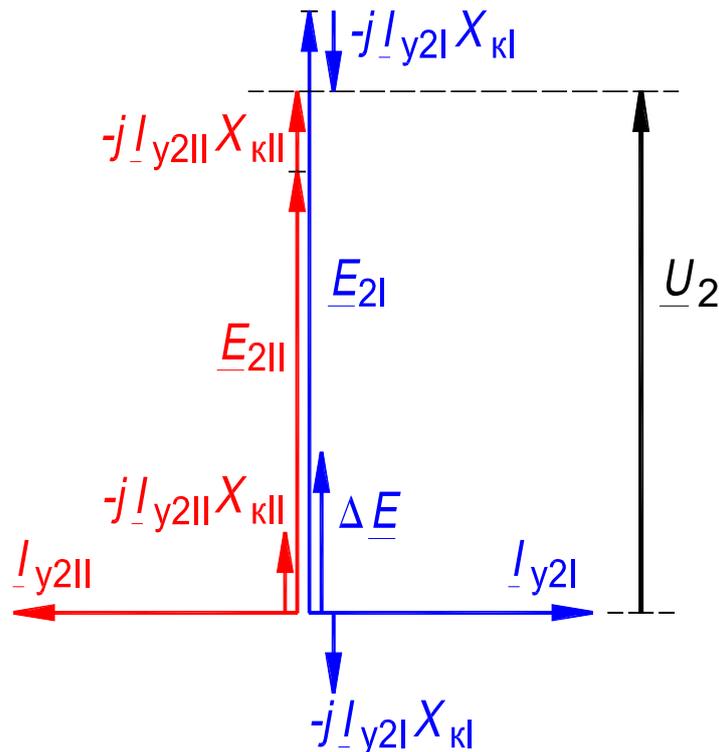


Рис. 16.2. Токи при параллельном включении трансформаторов в режиме холостого хода

Так как по условию мощности и напряжения короткого замыкания обоих трансформаторов одинаковы, то $I_{y2I}X_{кI} = I_{y2II}X_{кII} = \Delta E/2$ и напряжение вторичной сети принимает значение

$$U_2 = E_{2I} - \Delta E/2 = E_{2II} + \Delta E/2.$$

В. Нагрузка трансформаторов. Анализ выполняется при тех же условиях, которые были приняты при рассмотрении холостого хода трансформаторов. К вторичным обмоткам трансформаторов I и II подключена нагрузка $Z_{\text{нг}}$ (рис. 16.1; $P2$ замкнут). К нагрузке приложено напряжение U_2 , а в контуре вторичных обмоток протекают уравнительные токи сдвинутые на 180° . В этих обмотках при замыкании $P2$ возникают нагрузочные токи $I_{\text{нгI}}$ и $I_{\text{нгII}}$.

Ток $I_{\text{нг}}$, протекающий в нагрузке, распределяется между обоими трансформаторами поровну, т. е. $I_{\text{нгI}} = I_{\text{нгII}} = I_{\text{нг}}/2$, а угол $\varphi_{\text{нг}}$ между вектором $I_{\text{нг}}$ и вектором U_2 определяется характером нагрузки (рис. 16.3). Для того чтобы определить ток в обмотке каждого трансформатора, необходимо сложить нагрузочный и уравнительный токи с учетом того, что для первого трансформатора уравнительный ток I_{y2I} – отстающий, а для второго I_{y2II} – опережающий. Результирующий ток в обмотке первого трансформатора получается больше $I_{\text{нгI}}$, а в обмотке второго трансформатора – меньше $I_{\text{нгII}}$. Следовательно, если трансформатор I нагружен полностью, то трансформатор II будет недогружен, а при полной нагрузке второго трансформатора первый окажется перегруженным. Нормальным случаем является первый, так как перегрузка, как правило, недопустима. Таким образом, при неравенстве коэффициентов трансформации уравнительный ток не позволяет нагрузить полностью все параллельно включенные трансформаторы.

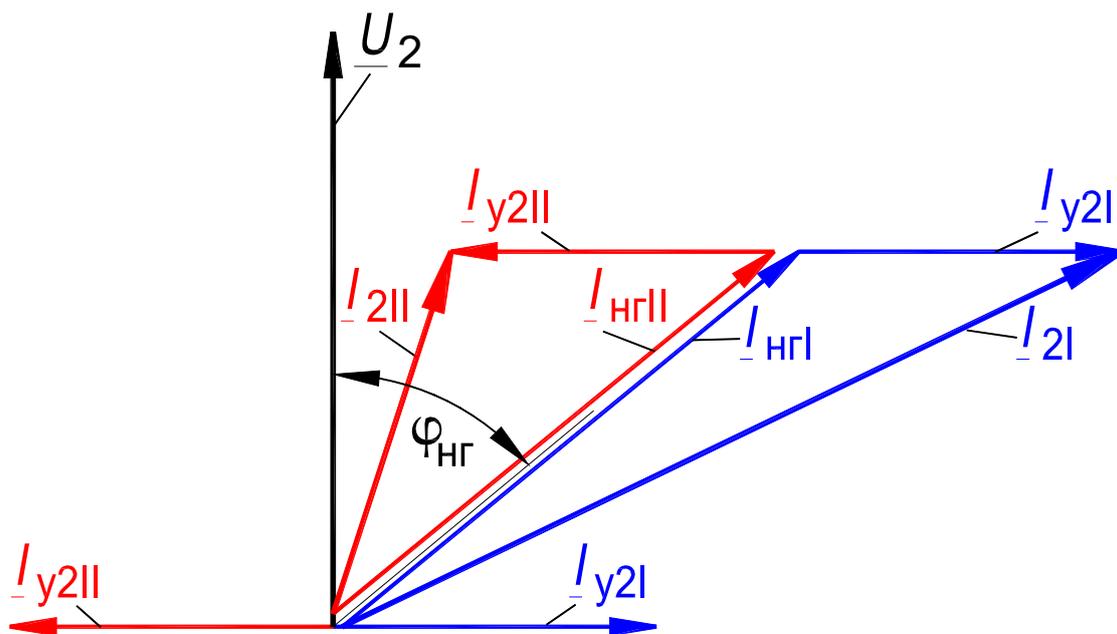


Рис. 16.3. Токи при параллельном включении трансформаторов при нагрузке:

$$k_1 < k_{II}; I_{2I} > I_{2II}$$

При значительной разнице в коэффициентах трансформации ток I_y может оказаться настолько большим, что нормальная работа трансформаторов будет нарушена. Поэтому ГОСТ 11677–85 устанавливает допуск на коэффициент трансформации $\pm 1\%$ для трансформаторов с фазным коэффициентом трансформации 3 и менее и $\pm 0,5\%$ для остальных. Таким образом, наибольшее расхождение между коэффициентами трансформации в первом случае не может превысить 2% и во втором случае 1% .

Пример. Параллельно включены два трехфазных трансформатора I и II.

Данные трансформатора I: $S_{\text{номI}} = 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_1 = 6000 \text{ В}$; $I_{\text{номI}} = 9,63 \text{ А}$; $u_{\text{кI}} = 5,5\%$; $Z_{\text{кI}} = 19,8 \text{ Ом}$.

Данные трансформатора II: $S_{\text{номII}} = 320 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_1 = 6000 \text{ В}$; $I_{\text{номII}} = 30,8 \text{ А}$; $u_{\text{кII}} = 5,5\%$.

Первичные обмотки обоих трансформаторов соединены звездой. Пусть $\Delta k = 1\%$, тогда

$$\Delta E = U_{1\phi} \Delta k / 100 = (6000 / \sqrt{3}) / 100 = 34,7 \text{ В}.$$

Если трансформаторы разной мощности имеют $u_{\text{кI}} = u_{\text{кII}}$, то их сопротивления $Z_{\text{к}}$ обратно пропорциональны токам, а стало быть, мощностям трансформаторов, следовательно,

$$Z_{\text{кII}} = Z_{\text{кI}} S_{\text{номI}} / S_{\text{номII}} = 19,8 \cdot 100 / 320 = 6,2 \text{ Ом}.$$

Тогда по формуле (16.5) уравнивающий ток

$$I_y = \Delta E / (Z_{\text{кI}} + Z_{\text{кII}}) = 34,7 / (19,8 + 6,2) = 1,335 \text{ А}.$$

или

$$100 I_y / I_{\text{номI}} = 100 \cdot 1,335 / 9,63 = 13,8\%,$$

т. е. уравнивающий ток составляет $13,8\%$ от номинального тока трансформатора меньшей мощности. Тот же уравнивающий ток составляет $4,6\%$ от номинального тока трансформатора II.

Пусть трансформаторы нагружены так, что $I_{\text{нгI}} = I_{\text{номI}} = 1$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$. Тогда, учитывая, что $I_y \approx 0,14 I_{\text{номI}}$, и выполнив построение подобное рис. 16.3, получим $I_1 = 1,12 I_{\text{номI}}$, т. е. трансформатор I перегружен по току на 12% .

Значительно лучше обстояло бы дело, если бы $k_{\text{II}} < k_{\text{I}}$. В этом случае был бы перегружен трансформатор II, но, как в этом можно убедиться путем аналогичного рассуждения, не больше чем на 3% .

Таким образом, при неравенстве коэффициентов трансформации следует предпочесть, чтобы трансформатор меньшей мощности имел больший коэффициент трансформации, так как при обычной индуктивной нагрузке условия параллельной работы трансформатора в этом случае благоприятнее.

16.3. Условие принадлежности трансформаторов к одной группе

Пусть условия 1, 3 и 4 параллельной работы (разд. 16.1) соблюдены, а 2-е условие не выполнено и два трехфазных трансформатора принадлежат к разным группам, например Y/Y-0 и Y/Δ-11, но имеют одинаковые первичные и вторичные номинальные напряжения.

Тогда вторичные ЭДС E_2 соответствующих фаз этих трансформаторов будут равны по величине, но сдвинуты по фазе на 30° (рис. 16.4). В замкнутом контуре вторичных обмоток действует разность этих ЭДС

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15^\circ = 0,518 E_2.$$

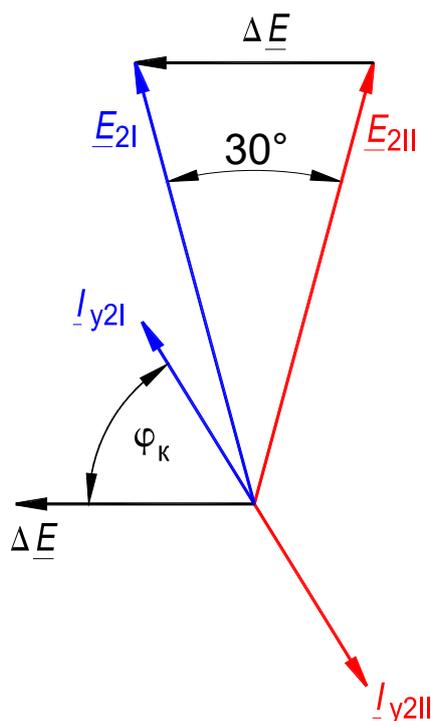


Рис. 16.4. Уравнительные токи при параллельной работе трансформаторов Y/Δ-11 и Y/Y-0

Уравнительный ток течет только по первичным и вторичным обмоткам трансформаторов и ограничивается по величине только сопротивлениями этих обмоток, т. е. сопротивлениями короткого замыкания трансформаторов. Поэтому

$$I_y = \Delta E / (Z_{кI} + Z_{кII}). \quad (16.6)$$

Если, например, мощности трансформаторов равны и $Z_{кI}^* = Z_{кII}^* = u_{кI}^* = u_{кII}^* = 0,05$, то относительная величина уравнительного тока будет

$$I_y^* = 0,518/2 \cdot 0,05 = 5,18,$$

т. е. этот ток будет в 5,18 раза больше номинального. Наличие такого тока почти равносильно короткому замыканию.

Таким образом, параллельное включение трансформаторов с различными группами соединений обмоток недопустимо.

16.4. Условие равенства напряжений короткого замыкания

Если соблюдаются условия 1, 2 и 4 параллельной работы (разд. 16.1), то при включении первичных обмоток в общую сеть вторичные ЭДС будут равны $E_{2I} = E_{2II}$. Пусть $u_{кI} > u_{кII}$, тогда при нагрузке каждого трансформатора номинальным током отдельно от другого, в первом трансформаторе будет большее напряжение на обмотках, так как при прочих равных условиях, большему напряжению короткого замыкания соответствует большее сопротивление трансформатора Z_k .

Зависимость вторичного напряжения от вторичного тока, т. е. $U_2 = f(I_2)$, называется внешней характеристикой (разд. 15.4, с. 266, сл.). Следовательно, можно утверждать, что внешняя характеристика первого трансформатора проходит ниже внешней характеристики второго трансформатора.

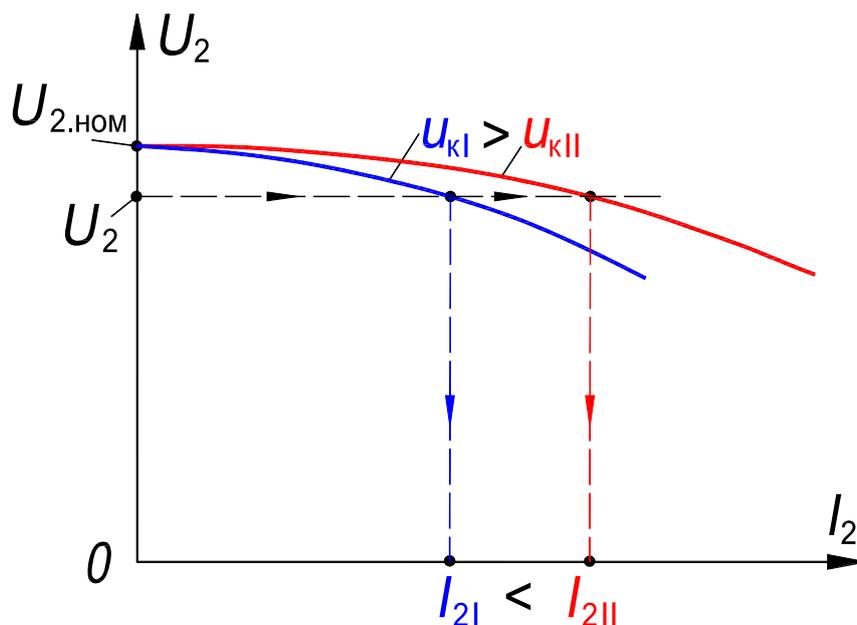


Рис. 16.5. Внешние характеристики трансформаторов при параллельном включении и неравенстве напряжений короткого замыкания

При параллельном включении двух трансформаторов во вторичной сети установится одно и то же напряжение U_2 , но при этом трансформаторы нагрузятся различно (рис. 16.5), а именно, первый окажется недогруженным, а второй перегруженным.

Чтобы определить величину токов в трансформаторах I и II, следует иметь в виду, что, каковы бы ни были сопротивления этих трансформаторов, падения напряжения при параллельном включении на общую сеть всегда одинаковы. Другими словами, $I_K Z_{KI} = I_{II} Z_{KII}$, откуда

$$I_I / I_{II} = Z_{KII} / Z_{KI}, \quad (16.7)$$

т. е. нагрузочные токи параллельно включенных трансформаторов обратно пропорциональны их полным сопротивлениям короткого замыкания. Для того чтобы трансформатор с меньшим u_k не перегружался или не ограничивал значительно нагрузку других трансформаторов, ГОСТ 11677-85 устанавливает допуск на напряжение короткого замыкания $\pm 10\%$.

Пусть, кроме, того, составляющие напряжения короткого замыкания не равны. Это имеет место в трансформаторах разной мощности (см. 4-е условие включения трансформаторов на параллельную работу). Так, например, в трансформаторе на 100 кВ·А, 6,3 кВ $u_k = 5,5\%$, $u_{k.a} = 2,4\%$ и $u_{k.p} = 4,95\%$. Соответственно, для трансформатора на 1000 кВ·А $u_k = 5,5\%$, $u_{k.a} = 1,5\%$ и $u_{k.p} = 5,3\%$. Из треугольника короткого замыкания на упрощенной векторной диаграмме (рис. 16.6) видно, что активные падения напряжения $I_I R_{KI}$ и $I_{II} R_{KII}$ этих треугольников и параллельные им векторы токов I_I и I_{II} сдвинуты между собой по фазе на угол ψ_i . Ток I , отдаваемый во вторичную сеть обоими трансформаторами, представляет собой геометрическую сумму токов I_I и I_{II} . Так как, угол ψ_i обычно весьма невелик, то это дает право заменить геометрическое сложение алгебраическим, т. е. считать, что $I = I_I + I_{II}$. В этом случае распределение нагрузок между двумя параллельно работающими трансформаторами легко определяется из формулы (16.7). Так как напряжения на зажимах параллельно работающих трансформаторов одинаковы, то токи I_I и I_{II} пропорциональны мощностям S_I и S_{II} . Тогда

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{S_I}{S_{II}} = \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}} = \frac{\frac{I_{НОМII} Z_{KII}}{100 U_{НОМ}}}{\frac{I_{НОMI} Z_{KI}}{100 U_{НОМ}}} \cdot \frac{I_{НОMI}}{I_{НОМII}}$$

или

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{u_{кII}}{u_{кI}} \cdot \frac{S_{НОМ I}}{S_{НОМ II}}. \quad (16.8)$$

Если известна общая нагрузка $S_I + S_{II}$, то нетрудно определить нагрузки S_I и S_{II} каждого из трансформаторов.

Пример. $S_{НОМ I} = 2500$ кВ·А; $S_{НОМ II} = 2500$ кВ·А; $u_{кI} = 5,5$ %; $u_{кII} = 6,5$ % и пусть общая нагрузка равна сумме номинальных мощностей обоих трансформаторов, т. е. $S_I + S_{II} = 5000$ кВ·А. Тогда

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{u_{кII}}{u_{кI}} \cdot \frac{S_{НОМ I}}{S_{НОМ II}} = \frac{6,5}{5,5} \cdot \frac{2500}{2500} = 1,18.$$

Следовательно,

$$S_I + S_I/1,18 = 5000 \text{ кВ·А},$$

откуда $S_I = 2700$ кВ·А и $S_{II} = 2300$ кВ·А, т. е. первый трансформатор перегружен на 8 %, второй недогружен на 8 %.

Так как нормально перегрузка не допускается, то необходимо снизить общую нагрузку на 8 %. Тогда $S_I = 2500$ кВ·А и $S_{II} = 2120$ кВ·А, т. е. второй трансформатор оказывается недогруженным на 15 %.

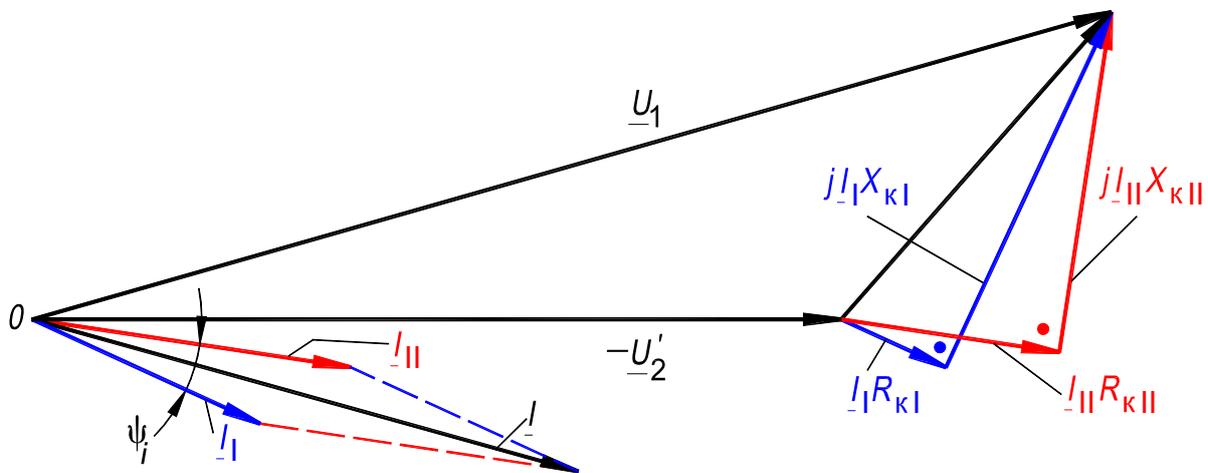


Рис. 16.6. Нагрузка трансформаторов при различных составляющих напряжений короткого замыкания трансформаторов

Параллельная работа двух трансформаторов исследуется в Работе № 2 (с. 372,сл).

17. Переходные режимы трансформаторов

17.1. Характер переходных режимов

Если напряжение или ток трансформатора почему-либо изменяются, то происходит переход от одного установившегося состояния (режима) к другому. Обычно этот переход совершается в очень короткое время и, тем не менее, он может сопровождаться весьма значительными и опасными для трансформатора эффектами, например, возникновением очень больших механических усилий между обмотками или частями их, крайне неравномерным распределением напряжения между отдельными частями обмотки или даже отдельными витками и т. д.

По характеру переходного процесса различают явления сверхтоков и явления перенапряжений. Сверхтоки возникают: при коротком замыкании, при включении трансформатора в сеть. Перенапряжения возникают под действием атмосферных разрядов, при включении трансформатора в сеть, выключении его и т. д.

17.2. Короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки трансформатора

Короткое замыкание трансформатора является аварийным процессом. При его исследовании условно считают, что подводимое к трансформатору напряжение остается неизменным и вторичная обмотка замыкается непосредственно на ее зажимах

В условиях эксплуатации напряжение первичной обмотки в процессе короткого замыкания меняется, а место короткого замыкания часто бывает удалено от вторичных зажимов. Однако это существенно не изменяет характера переходного процесса. Поэтому в дальнейшем ограничим рассмотрение короткого замыкания условием, что $U_1 = \text{const}$ и сопротивление цепи между вторичными зажимами равно нулю.

Короткие замыкания в электрических установках возникают обычно из-за различных неисправностей в сетях: при механическом повреждении изоляции, электрическом ее пробое в результате перенапряжений, ошибочных действиях эксплуатационного персонала и в ряде других случаев.

Короткое замыкание представляет для трансформатора серьезную опасность, так как при этом возникают чрезмерно большие токи, резко повышающие температуру обмотки, что угрожает целостности изоляции. Еще в большей степени возрастают электромагнитные силы в обмотках трансформатора, что также может привести к аварии.

На рис. 17.1 приведены случаи однофазного, двухфазного, двухфазного на землю и трехфазного коротких замыканий трансформатора. Установившиеся токи короткого замыкания, протекающие по обмоткам, могут быть рассчитаны для каждого из этих случаев, с учетом схем соединения обмоток.

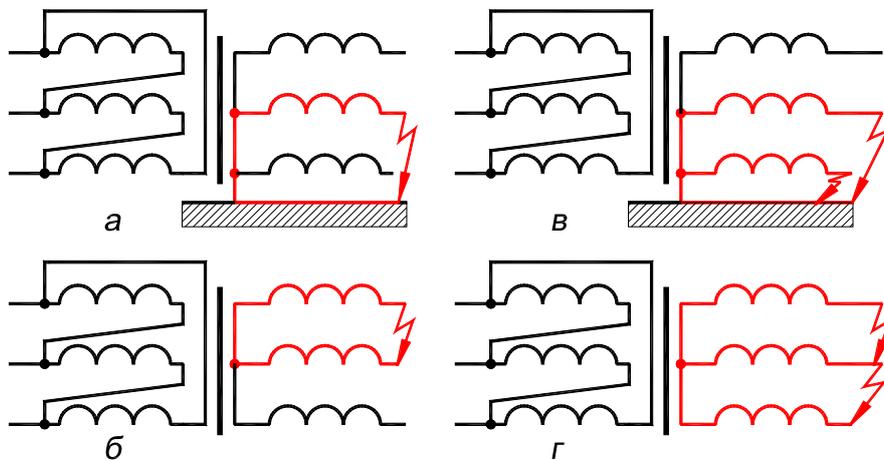


Рис. 17.1. Различные случаи короткого замыкания трехфазного трансформатора: *a* – однофазное к. з., *б* – двухфазное к. з., *в* – двухфазное к. з. на землю, *г* – трехфазное к. з.

Более сложным является расчет переходных процессов. В дальнейшем ограничимся рассмотрением переходного процесса для наиболее типичного случая короткого замыкания однофазного трансформатора. Особенности этого процесса характерны и для трехфазных трансформаторов.

А. Короткое замыкание однофазного трансформатора. Если пренебречь намагничивающим током (см. разд. 14.3, В, с. 246, сл.), то при коротком замыкании трансформатор представляет собой реактивную катушку с общим активным сопротивлением $R_k = R_1 + R'_2$ и общим индуктивным сопротивлением $X_k = X_1 + X'_2 = \omega L_{\sigma 1} + \omega L'_{\sigma 2} = \omega L_k$,

где $L_k = L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}$ – индуктивность потоков рассеяния трансформатора (рис. 17.2, *a*). Так как потоки рассеяния распределяются главным образом в немагнитной среде (масло, изоляция, воздух и т. д.), то $L_k = \text{const}$ и, следовательно, $X_k = \omega L_k = \text{const}$. Таким образом, при коротком замыкании трансформатор представляет собой цепь с постоянными по величине параметрами R_k и X_k .

Пусть напряжение сети изменяется синусоидально и не зависит от величины тока i_k . Отсчет времени ведется от момента, определяемого углом ψ (рис. 17.2,в). В этот момент $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi)$ и по второму закону Кирхгофа

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = i_k R_k + L_k di_k/dt. \quad (17.1)$$

Здесь $i_k R_k$ – напряжение на активном сопротивлении обмотки; $L_k \cdot di_k/dt$ – составляющая напряжения u_1 , уравновешивающая ЭДС $-L_k \cdot di_k/dt$, создаваемую потоками рассеяния.

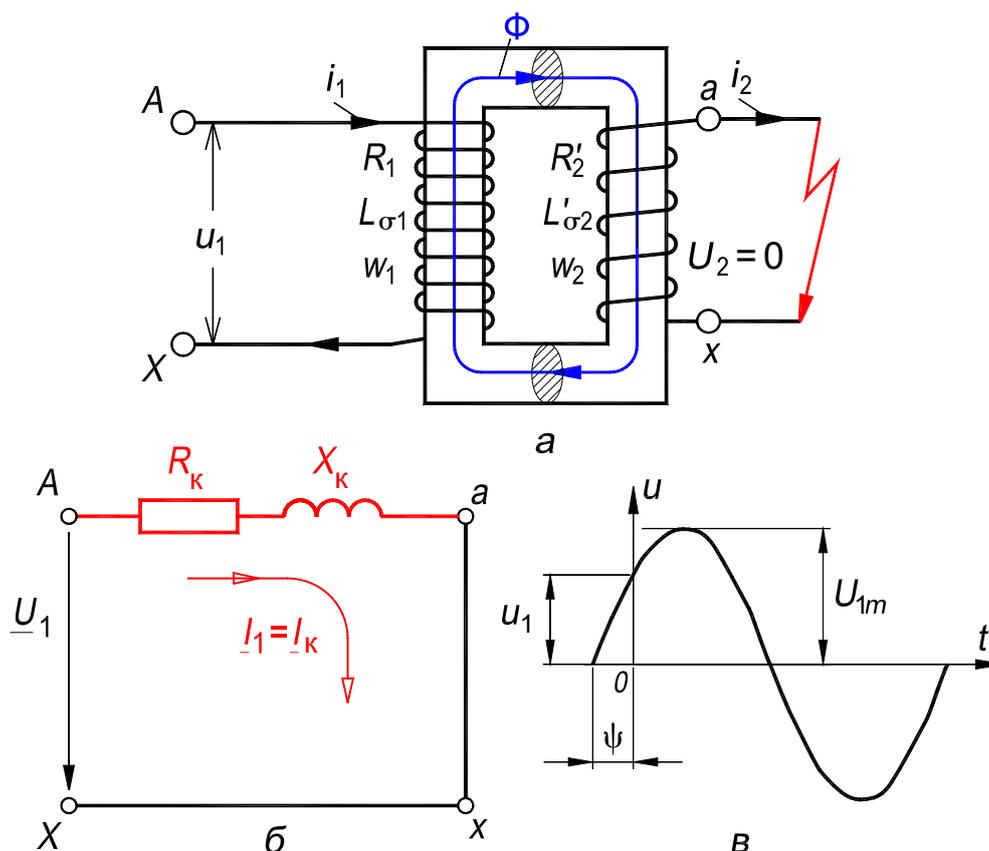


Рис. 17.2. Короткое замыкание однофазного трансформатора:

a – электромагнитная схема, *б* – схема замещения, *в* – фаза момента включения

Так как сопротивление X_k значительно больше R_k , то решение обыкновенного дифференциального уравнения (17.1) с постоянными коэффициентами дает

$$i_k = i_{k.уст} + i_{k.св} = -I_{km} \cos(\omega t + \psi) + I_{km} \cos \psi e^{-t/T_k} = f(t). \quad (17.2)$$

Здесь i_k , $i_{k.уст}$ и $i_{k.св}$ – мгновенные значения результирующего, установившегося и свободного токов при внезапном коротком замыкании трансформатора; $I_{km} = I_k \sqrt{2} = U_{1m} / \sqrt{[R_k^2 + (\omega L_k)^2]}$ – амплитуда тока $i_{k.уст}$; ψ – фаза включения, опре-

деляющая мгновенное значение напряжения u_1 в момент начала короткого замыкания ($t = 0$); $T_k = L_k/R_k$ – постоянная времени затухания, определяющая скорость протекания переходного процесса при внезапном коротком замыкании.

Формула (17.2) позволяет сделать следующие выводы:

1. Ток внезапного короткого замыкания i_k представляет собой сумму токов $i_{k.уст}$ и $i_{k.св}$. Ток $i_{k.уст}$ представляет собой синусоидальную функцию времени, имеющую частоту сети, на которую включается катушка, и амплитуду $U_{1m}/\sqrt{[R_k^2 + (\omega L_k)^2]}$. Ток $i_{k.св}$ имеет в момент включения ту же амплитуду, что и ток $i_{k.уст}$, но представляет собой аperiodическую функцию времени, затухающую по закону показательной функции, причем скорость затухания определяется величиной $T_k = L_k/R_k$. Если положить $R_k = 0$, то $T_k = \infty$, т. е. ток $i_{k.св}$ раз возникнув, продолжал бы существовать неопределенно долго, и процесс не мог бы перейти в установившееся состояние;

2. В момент включения ($t = 0$) токи $i_{k.уст}$ и $i_{k.св}$ равны друг другу по величине, но имеют обратные знаки, т. е. результирующий ток равен нулю. Это соответствует начальным условиям работы катушки при ее включении на сеть, так как если при установившемся режиме каждому значению напряжения u_1 соответствует определенное значение тока i_k , то в момент включения $i_k = 0$ независимо от момента включения, а стало быть, и от напряжения u_1 . Роль тока i_k как раз и состоит в том, чтобы в момент включения катушки в сеть обеспечить это условие;

3. При прочих равных условиях ток $i_{k.св}$ достигает наибольшей величины при $\psi = 0$, т. е. когда включение происходит в момент перехода напряжения через нуль (рис. 17.3,а). Если же включение происходит в момент, когда $u_1 = U_{1m}$, т. е. при $\psi = 90^\circ$, то свободный ток равен нулю, $i_{k.св} = 0$ (рис. 17.3,б).

Соответственно сказанному, на рис. 17.3,а изображено изменение тока при включении в сеть трансформатора в момент, когда $u_1 = 0$ ($\psi = 0$). Здесь: u_1 – подведенное к трансформатору напряжение; i_k , $i_{k.уст}$ и $i_{k.св}$ – мгновенные значения результирующего, установившегося и свободного токов. При включении в сеть трансформатора в момент, когда $u_1 = 0$ ($\psi = 0$), максимальное значение $i_{k.мах}$ ток внезапного короткого замыкания достигает через полупериод после включения.

Так как установившийся ток короткого замыкания достигает номинального значения $I_{\text{НОМ}}$ при напряжении короткого замыкания $U_{\text{К}}$ (см. разд. 14.2, с. 242, сл.), то при номинальном напряжении, превышающем $U_{\text{К}}$ в $100/u_{\text{К}}\%$ раз, действующее значение $I_{\text{К.уст}} = 100I_{\text{НОМ}}/u_{\text{К}}\%$, а амплитуда этого тока будет:

$$I_{\text{К}m\text{уст}} = I_{\text{К.уст}}\sqrt{2} = (100\sqrt{2})I_{\text{НОМ}}/u_{\text{К}}\% = (100\sqrt{2})I_{\text{НОМ}}/(5 - 10) \approx (15 - 30)I_{\text{НОМ}}. \quad (17.3)$$

При внезапном коротком замыкании максимальное значение результирующего тока $I_{\text{К} \text{max}}$ в $k_{\text{К}}$ раз превышает амплитуду установившегося тока. Следовательно,

$$I_{\text{К} \text{max}} = k_{\text{К}} \cdot I_{\text{К}m\text{уст}} = (k_{\text{К}}100\sqrt{2})I_{\text{НОМ}}/u_{\text{К}}\%. \quad (17.4)$$

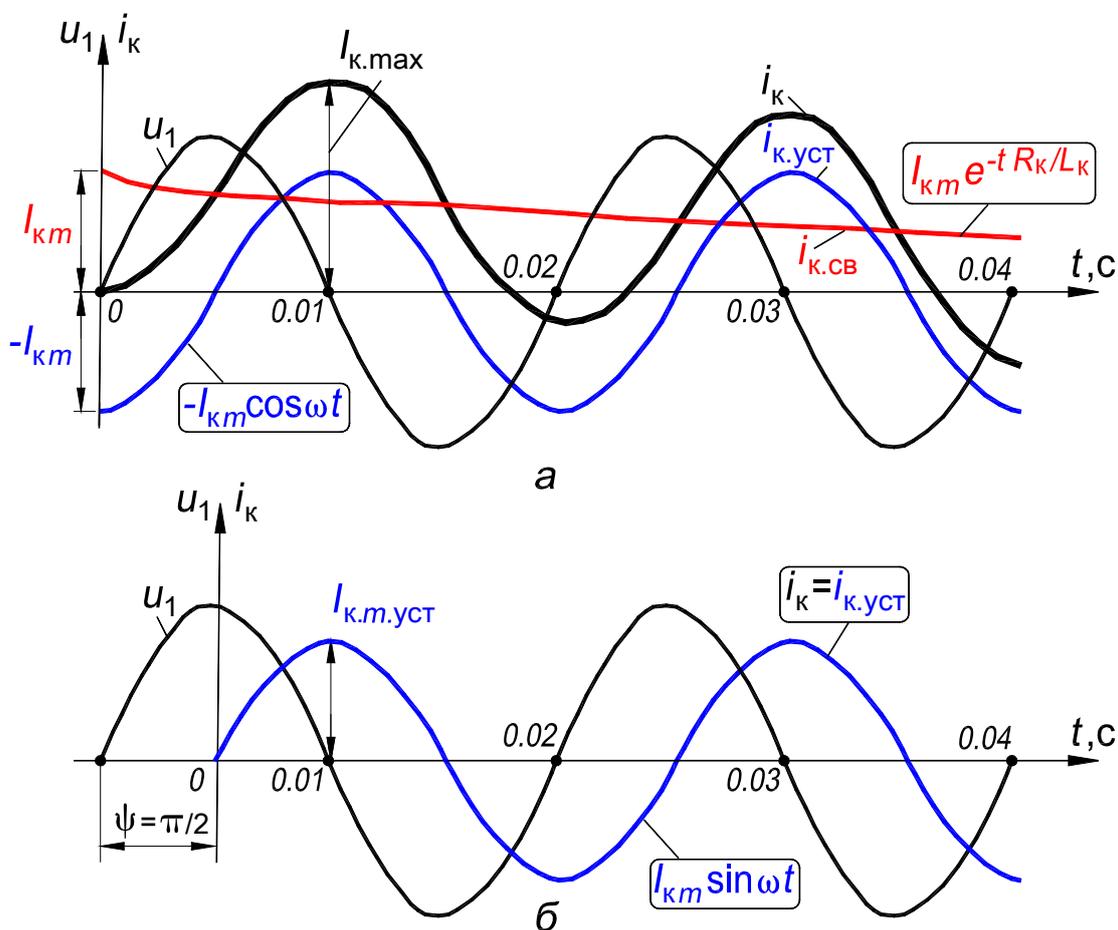


Рис. 17.3. Токи внезапного короткого замыкания трансформатора при включении в момент времени $t = 0$: а – $u_1 = 0$ ($\psi = 0$); б – $u_1 = U_{1m}$ ($\psi = \pi/2$)

В реальных трансформаторах ток $i_{\text{К.св}}$ затухает тем быстрее, чем больше $1/T_{\text{К}} = R_{\text{К}}/L_{\text{К}}$ /см. выражение (17.2)/. Поэтому в трансформаторах большой мощности $k_{\text{К}} = 1,7 - 1,85$, а в трансформаторах малой мощности

с относительно меньшей постоянной времени $k_k = 1,2 - 1,3$; у малых трансформаторов процесс внезапного короткого замыкания переходит в установившийся режим за 1 – 2 периода; а у больших – в течение 6 – 7 периодов.

На рис. 17.3,б изображено изменение тока при включении в сеть трансформатора в момент, когда $u_1 = U_{1m} (\psi = \pi/2)$. В этом случае свободный ток $i_{к.св}$ не возникает /см. выражение (17.2)/ и ток короткого замыкания принимает установившееся значение, $i_k = i_{к.уст}$, с амплитудным значением $I_{к.т.уст} \approx (15 - 30)I_{ном}$.

Короткое замыкание трансформатора при полном подведенном напряжении вызывает: значительное повышение температуры обмоток (до 200 – 250 °С) и появление чрезвычайно больших и потому опасных механических усилий как между отдельными частями обмотки, так и между обмотками. Чтобы избежать аварии, должна быть разработана соответствующая конструкция трансформатора и обеспечена необходимая защита его.

Б. Электромагнитные силы, действующие на обмотки трансформатора. Несмотря на кратковременность переходного процесса короткого замыкания он представляет для обмоток трансформатора значительную опасность. Одновременно с возрастанием токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора возрастают (пропорционально току) напряженность и индукция магнитного поля рассеяния. Электромагнитные силы F , действующие на отдельные проводники обмотки, определяются произведением индукции поля рассеяния на ток проводника (рис. 17.4):

$$F = B \cdot i \cdot 10^{-2}, \text{ Н/см}, \quad (17.5)$$

где индукция выражена в теслах, а ток в амперах. Направление силы определяется по правилу левой руки (рис. В.4, с. 34).

При нормальной нагрузке трансформатора силы, действующие на проводник, невелики. Например, при токе $i = 100$ А и $B = 0,1$ Тл сила

$$F = 0,1 \cdot 100 \cdot 10^{-2} = 0,1 \text{ Н/см},$$

что соответствует 10 Н (ньютон) на 1 м длины проводника. Такая сила не способна заметно деформировать проводник обмотки. При коротком замыкании произведение $B \cdot i$ возрастает пропорционально i^2 , и в тот момент, когда ток достигает своего наибольшего значения $i_{к.мах}$, сила F возрастает в k_k^2 раз. Кратность k_k

максимального тока короткого замыкания в неблагоприятных случаях может достигать 30 и более и, следовательно, сила F может возрасти при коротком замыкании почти в 1 000 раз, т. е. на 1 м длины проводника будет действовать сила примерно 1,0 т·с, которая легко может разрушить обмотку.

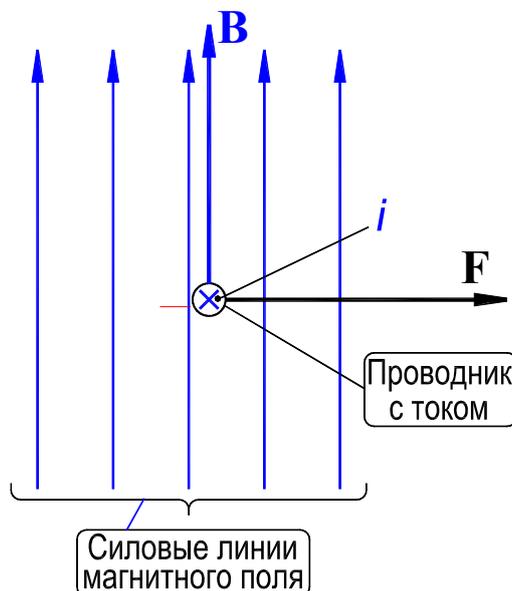


Рис. 17.4. Связь между магнитной индукцией B , током i в проводнике и силой F , действующей на проводник

По этой причине обмотку трансформатора необходимо конструировать таким образом, чтобы ее витки и катушки были прочно укреплены и способны без заметных деформаций выдерживать большие механические силы, возникающие в процессе короткого замыкания.

Расчет механической прочности обмоток представляет значительные трудности и на практике выполняется лишь весьма приближенно. Это объясняется рядом причин. Прежде всего точное определение вектора индукции \mathbf{B} поля рассеяния и его продольной \mathbf{B}_d и поперечной \mathbf{B}_q составляющих затруднительно, особенно у концов обмоток и в местах ее разрывов, где магнитные линии имеют значительный изгиб (рис. 17.5). Определение индукции может быть надежно выполнено лишь опытным путем на моделях обмотки.

Сложный периодический характер изменения силы F во времени также осложняет расчеты. Сила F пропорциональна квадрату тока i_k , т. е. квадрату правой части равенства (17.2) и, следовательно, изменяется во времени с частотой 2ω (рис. 17.7). Спрессованную обмотку трансформатора можно в известной мере рассматривать как упругую систему, способную к собственным колебаниям, поэтому при воздействии на нее периодических

сил возможны резонансные явления, требующие при их рассмотрении учета массы колеблющихся частей обмотки и ее упругих свойств (жесткости).

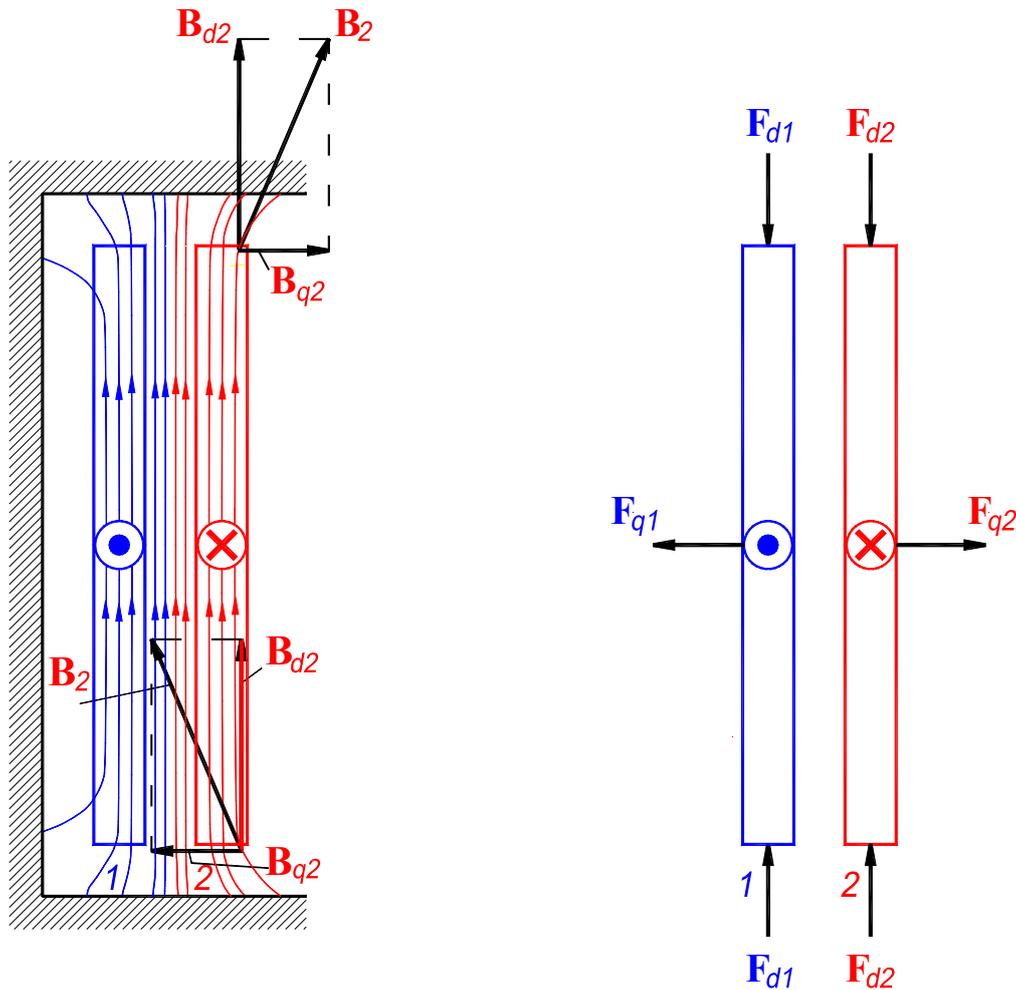


Рис. 17.5. Поле рассеяния концентрической обмотки и направления вектора индукции в различных точках поля (см. рис. 17.8)

Рис. 17.6. Диаграммы распределения продольных F_d и поперечных F_q сил, созданных взаимодействием поля рассеяния с током в проводниках

На рис. 17.6 показаны в качестве примера диаграммы распределения периодических сил $F_q \equiv B_d$ и $F_d \equiv B_q$ для цилиндрической обмотки без регулировочных витков. Эти сил действуют на отдельные элементы обмотки, и позволяют оценить осевые силы, передающиеся на концевые опоры обмоток.

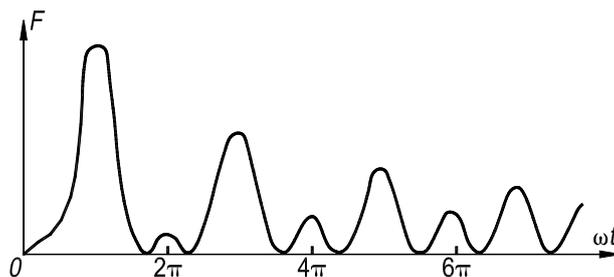


Рис. 17.7 Изменения силы F в процессе короткого замыкания

Из рис. 17.8 следует, что радиальные силы F_q , обусловленные продольной составляющей поля, сжимают внутреннюю цилиндрическую обмотку и растягивают внешнюю, причем по направлению к краям обмоток эти силы несколько уменьшаются. Осевые силы F_d возрастают от центра к краям обмоток, где магнитное поле имеет наибольшую поперечную составляющую. При коротких замыканиях осевые силы могут достигать в этих местах опасных значений и деформировать крайние катушки.

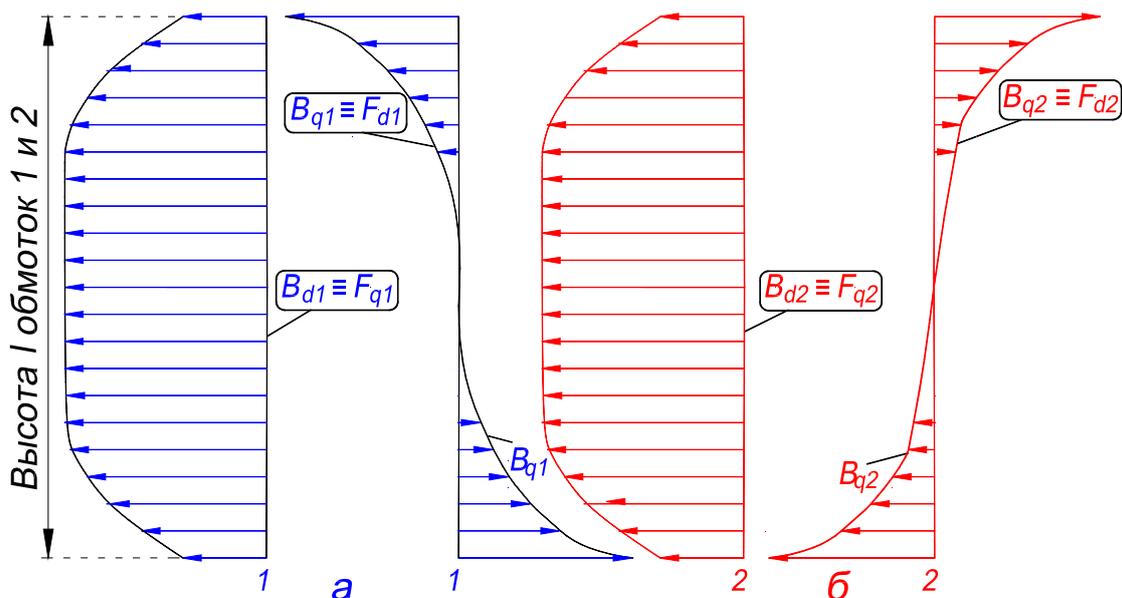


Рис. 17.8. Диаграммы распределения составляющих вектора индукции поля рассеяния (см. рис. 17.5): *a* – продольных B_d , *б* – поперечных B_q .

Индексы 1 и 2 указывают, к какой из обмоток относится данная величина

При конструировании трансформатора следует избегать неодинаковых размеров обмоток ($l_1 \neq l_2$) в направлении поля рассеяния, так как при этом из-за искривления магнитных линий поля (см. рис. 17.5) возникают дополнительные электромагнитные силы, которые могут деформировать отдельные части обмоток при коротком замыкании.

В. Нагрев обмоток при коротком замыкании трансформатора.

Опасность процесса короткого замыкания для трансформатора связана не только с резким возрастанием электромагнитных сил, способных деформировать и разрушить обмотки, но и с быстрым возрастанием температуры обмоток, так как электрические потери в обмотках, пропорциональные квадрату тока, увеличиваются во много раз. Изоляция обмоток при недостаточной ее нагревостойкости заметно снижает свои электрические и механические качества по мере возрастания температуры сверх 100 °С.

Поскольку свободная составляющая тока $i_{к.св}$ практически затухает через 0,03 – 0,6 с, интенсивность нарастания температуры можно оценить по установившемуся току короткого замыкания $i_{к.уст}$ /см. выражение (17.2)/. При этом токе электрические потери увеличиваются в 50 – 225 раз.

Плотность тока в обмотках сильно возрастает и достигает значений $J = 20 - 40$ А/мм². Если допустить, что тепло, выделяющееся в обмотке, не передается окружающей среде, а идет только на нагревание самой обмотки, то температура обмотки будет возрастать со скоростью

$$J^2/170 = 9,5 - 2,4 \text{ К/с.}$$

Перед коротким замыканием обмотки могли иметь предельную длительно допустимую температуру 105 °С (разд. В.11, Г, с. 117,сл.). Предельную кратковременно допустимую температуру обмотки, при которой еще не повреждается изоляция, считают равной 250 °С. Зная скорость возрастания температуры, можно найти время t_k , в течение которого температура обмотки возрастет на $250 - 105 = 145$ °С и достигнет 250 °С. Это время может быть оценено по формуле

$$t_k \approx 2,5(100u_k)/J_{ном} = 5 - 25 \text{ с.}$$

Обычно защитные устройства, отключают трансформатор от сети значительно раньше, и температура обмоток трансформаторов не достигает предельной, т. е. на практике обмотки трансформатора нагреваются при коротких замыканиях до температуры значительно ниже 250 °С.

17.3. Витковое короткое замыкание

В условиях эксплуатации возможны короткие замыкания не только на зажимах трансформатора, но и внутри его обмотки из-за повреждения ее изоляции. Такие короткие замыкания особенно опасны; при их возникновении трансформатор, как правило, выходит из строя на длительный срок, так как при этом возникают значительные разрушения обмоток.

Допустим, что во вторичной обмотке трансформатора, имеющей w_2 витков, замкнулось накоротко небольшое число витков, равное $w_{2к}$ (рис. 17.9). Из условия равновесия МДС имеем:

$$I_{ном}(100/u_k)w_1 = I_{2к}w_{2к}, \quad (17.6)$$

где $I_{1\text{НОМ}}$ – номинальный ток первичной обмотки; $u_{\text{к}}'$ – напряжение короткого замыкания, которое в рассматриваемом случае может быть значительно больше обычного, поскольку замкнутые накоротко витки занимают лишь небольшую часть сечения всей вторичной обмотки.

Так как $I_{1\text{НОМ}}W_1 \approx I_{2\text{НОМ}}W_2$, то согласно равенству (17.6)

$$I_{2\text{к}}/I_{2\text{НОМ}} = (100/u_{\text{к}}')(w_2/w_{2\text{к}}).$$

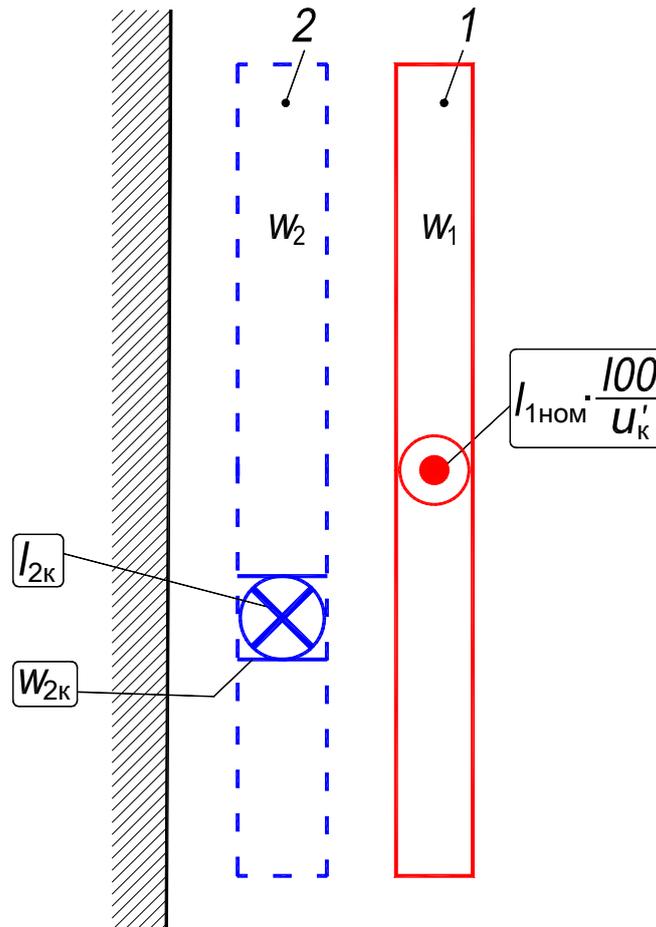


Рис. 17.9. Короткое замыкание части витков одной из обмоток

Следовательно, ток $I_{2\text{к}}$ в замкнутых накоротко витках вторичной обмотки может в сотни и даже тысячи раз превосходить номинальное значение тока $I_{2\text{НОМ}}$ этой обмотки. При этих условиях короткозамкнутые витки нагреваются очень быстро, и за время $t_{\text{к}}$ их температура возрастает на

$$\theta_{\text{к}} - \theta_{\text{н}} \approx t_{\text{к}} J_{\text{к}}^2 / 156 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (17.7)$$

где $J_{\text{к}}$ – плотность тока, $\text{A}/\text{мм}^2$, при коротком замыкании; $\theta_{\text{к}}$ – температура до которой нагрелись витки в процессе их короткого замыкания; $\theta_{\text{н}}$ – средняя температура витков в момент начала короткого замыкания.

Допустим, что $J_k \approx 1\,000\text{ А/мм}^2$; тогда спустя $t_k = 0,1\text{ с}$ нагрев витков $\theta_k - \theta_n \approx 0,1 \cdot 10^6 / 156 = 640\text{ }^\circ\text{С}$ и, следовательно, за время, меньшее, чем $0,2\text{ с}$, будет достигнута температура плавления меди. По этой причине витковые короткие замыкания обычно сопровождаются расправлением короткозамкнутых витков с одновременной значительной деформацией соседних частей обмотки из-за больших механических сил, обусловленных возрастанием тока. Как известно, сила взаимодействия двух параллельных проводников равна:

$$F = (2i_1i_2/a)10^{-7}, \text{ Н/см}, \quad (17.8)$$

где a – расстояние между центрами сечений проводников, см; i_1 и i_2 – мгновенные значения токов в проводниках, А.

Допустим, что сечение проводников равно 50 мм^2 ; $a = 2\text{ см}$ и действующая плотность тока при коротком замыкании достигает $J_k = 1\,000\text{ А/мм}^2$; тогда согласно формуле (17.8) амплитудное значение силы $F = 500\text{ Н/см}$, что соответствует силе примерно $5\text{ т}\cdot\text{с}$ на 1 м проводника. Естественно, что такая сила легко может разрушить обмотку.

Реальной защитой трансформатора от витковых коротких замыканий являются тщательное выполнение обмоточных работ, обеспечивающих механическую и электрическую прочность витковой изоляции, и правильный расчет изоляции обмоток, устраняющий опасность повреждения ее при перенапряжениях с последующим возникновением в месте повреждения (разряда) виткового замыкания. Не меньшее значение имеют тщательная проверка состояния изоляции при установке трансформатора и устранение воздушных включений (пузырей) в масле после заполнения им трансформатора, резко снижающих прочность изоляции.

17.4. Ток включения при холостом ходе трансформатора

При включении трансформатора в сеть возможно сильное насыщение магнитопровода и более чем 100 -кратный бросок тока холостого хода. Однако после включения трансформатора в сеть ток холостого хода может сразу же принять установившееся значение: броска тока не происходит, а насыщение магнитопровода соответствует «колену» магнитной характеристики. Далее рассматриваются оба случая.

Рассмотрим включение однофазного трансформатора вхолостую, когда вторичная обмотка его разомкнута. Схема замещения трансформатора в этом режиме представлена на рис. 17.10.

Ток холостого хода $i_1 = i_x$ трансформатора в установившемся режиме обычно невелик, не превосходит нескольких процентов номинального и только в трансформаторах небольшой мощности он достигает 10 % и более (разд. 12.2, Г, с. 220).

Однако при включении трансформатора вхолостую может иметь место кратковременный переходный процесс, при котором намагничивающий ток в первичной обмотке резко возрастает, превышая в некоторых случаях номинальное значение тока этой обмотки.

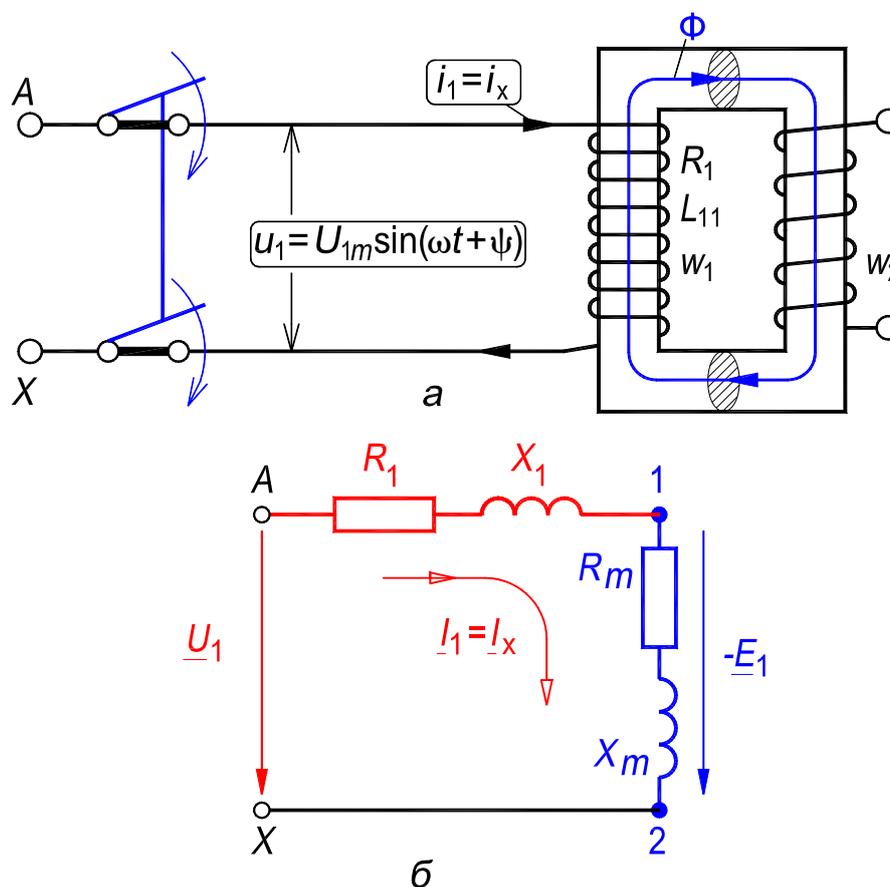


Рис. 17.10. Холостой ход однофазного трансформатора:
 а – электромагнитная схема, б – схема замещения

При исследовании процесса включения и определении тока $i_1 = f(t)$ исходят из обыкновенного дифференциального уравнения равновесия ЭДС первичной обмотки (рис. 17.10):

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = i_1 R_1 + w_1 d\Phi/dt, \quad (17.9)$$

где ψ – фазный угол, определяющий мгновенное значение u_1 синусоидального напряжения сети в момент включения трансформатора, то есть при $t = 0,0$ с; Φ – мгновенное значение магнитного потока первичной обмотки; w_1 – число витков этой обмотки; R_1 – активное сопротивление обмотки; $i_1 = i_x$ – ток холостого хода, протекающий в первичной обмотке.

Это уравнение является нелинейным, что обусловлено нелинейным характером магнитной характеристики магнитопровода (рис. В.53, с. 106). Решая его приближенно, исключим из уравнения (17.9) ток i_1 , сделав предположение, что между током $i_1 = i_x$ и магнитным потоком Φ существует линейная зависимость, а именно

$$i_1 = \Psi_1/L_{11} = w_1\Phi/L_{11}, \quad (17.10)$$

где Ψ_1 – потокосцепление первичной обмотки трансформатора; $L_{11} = (X_1 + X_m)/\omega$ – индуктивность этой обмотки; $X_1 \approx \text{const}$ – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки, обусловленное ее магнитным потоком рассеяния $\Phi_{1\sigma}$; $X_m = \text{var}$ – индуктивное сопротивление взаимной индукции первичной обмотки, обусловленное основным магнитным потоком. Индуктивность L_{11} не является постоянной, она меняется, постепенно возрастая до значения, которое она принимает при установившемся процессе. В дальнейшем для упрощения решения задачи в первом приближении будем считать эту индуктивность постоянной, $L_{11} \approx \text{const}$.

Подставляя (17.10) в (17.9) и полагая приложенное напряжение u_1 синусоидальным, получаем:

$$R_1\Phi/L_{11} + d\Phi/dt = u_1/w_1 = (U_{1m}/w_1) \sin(\omega t + \psi). \quad (17.11)$$

Решение обыкновенного дифференциального уравнения (17.11) может быть представлено в виде двух слагаемых:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi) + (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_r)e^{-tR_1/L_{11}}, \quad (17.12)$$

где Φ' – мгновенное значение установившегося потока; Φ'' – мгновенное значение переходного или свободного потока; Φ_m – амплитуда магнитного потока; $\pm\Phi_r$ – остаточный магнитный поток, который в отдельных случаях может составить примерно $\Phi_m/2$.

В момент включения ($t = 0,0$ с) магнитный поток Φ равен нулю или остаточному потоку Φ_r , который может иметь любой знак в зависимости от направления остаточного поля.

Возможны два крайних случая при включении трансформатора на холостой ход:

1. В момент времени $t = 0,0$ с мгновенное значение напряжения равно максимальному $u_1 = U_{1m}$, $\psi = \pi/2$ и $\Phi_r = 0$. В этом случае с первого же момента времени устанавливается нормальный магнитный поток, то есть

$$\Phi = \Phi' = -\Phi_m \cos(\omega t + \pi/2) = \Phi_m \sin \omega t, \quad (17.13)$$

а $\Phi'' = 0,0$ и переходного процесса практически не возникает. Насыщение трансформатора соответствует «колену» магнитной характеристики (рис. В.53, с. 106), ток холостого хода сразу же принимает установившееся значение. Таким образом, включение трансформатора происходит при благоприятных условиях, то есть без броска тока холостого хода;

2. В момент времени $t = 0,0$ с мгновенное значение напряжения $u_1 = 0$, $\psi = 0$, а остаточный поток Φ_r противоположен по знаку потоку Φ' . В этом случае

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m e^{-tR_1/L_{11}} + \Phi_r e^{-tR_1/L_{11}}. \quad (17.14)$$

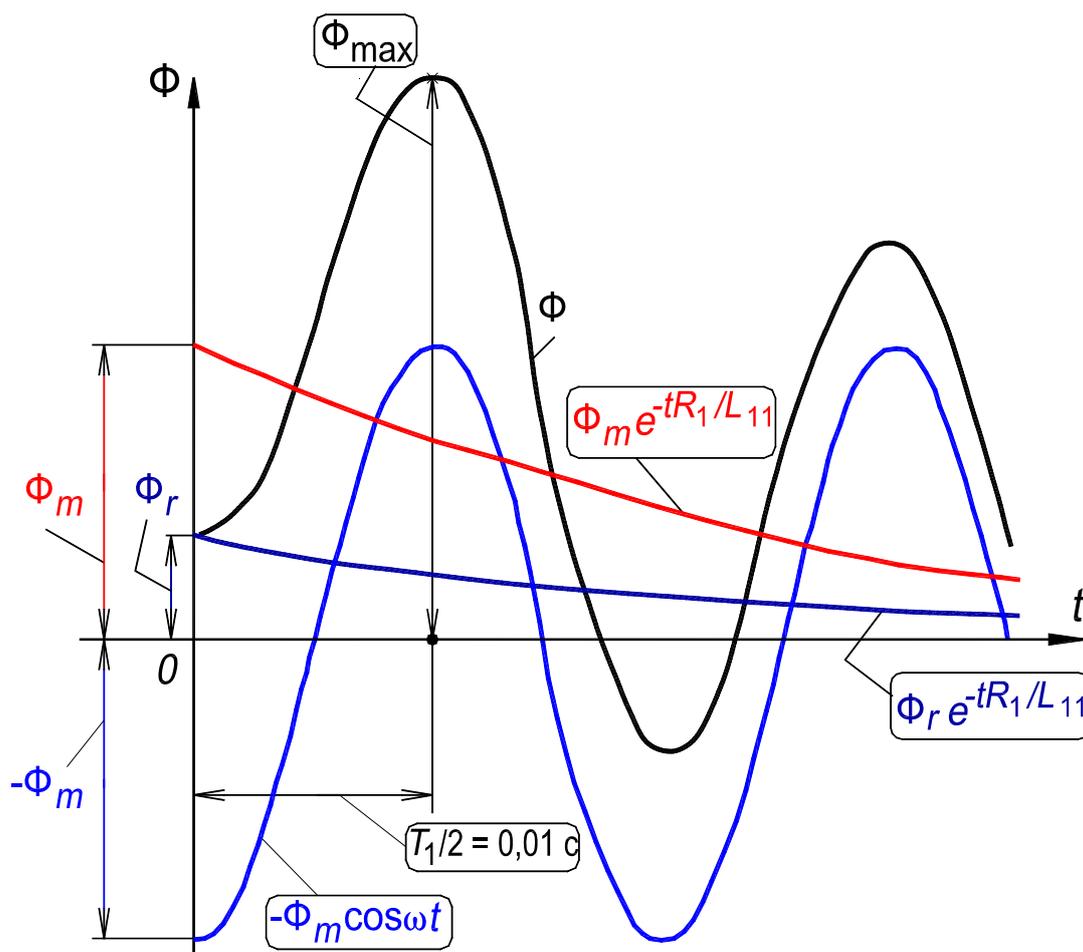


Рис. 17.11. Переходный процесс при включении трансформатора в холостую

На рис. 17.11 приведены кривые, характеризующие изменение во времени магнитного потока Φ и его составляющих в процессе включения однофазного трансформатора, протекающего согласно уравнению (17.14). Как видно из рисунка, приблизительно через половину периода ($T_1/2 = 0,01$ с) после включения трансформатора магнитный поток Φ достигает максимальной величины Φ_{\max} , которая может принять значение примерно $2,5\Phi_m$:

$$\Phi = -\Phi_m \cos 0,01\omega + \Phi_m e^{-0,01R_1/L_{11}} + \Phi_r e^{-0,01R_1/L_{11}} \approx \Phi_m + \Phi_m + \Phi_r \approx \Phi_{\max} \approx 2,5\Phi_m. \quad (17.15)$$

Поэтому во втором случае через 0,01 с после включения трансформатора на холостой ход магнитопровод будет сильно насыщен, чем и обусловлен значительный бросок тока холостого хода. Это иллюстрирует рис. 17.12, на котором графическим путем получена зависимость тока включения i_1 от времени t .

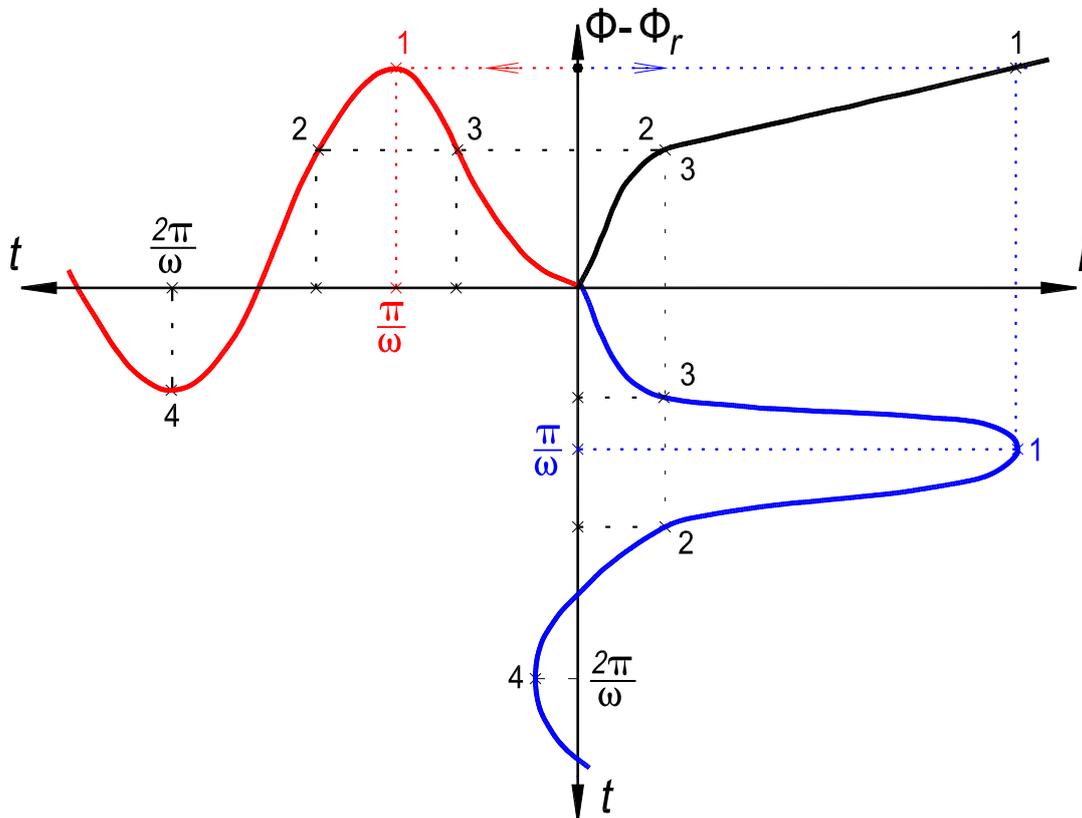


Рис. 17.12. Графическое построение тока включения

При включении насыщенного трансформатора, как показывает опыт, бросок тока включения может в 100 раз и более превысить нормальное значение намагничивающего тока. На рис. 17.13 приведена типичная осциллограмма тока включения насыщенного трансформатора. Как видно из осциллограммы, длительность переходного процесса включения невелика и не превосходит нескольких периодов.

С возрастанием номинальной мощности трансформатора отношение R_1/L_{11} обычно уменьшается, поэтому у трансформаторов малой мощности переходный процесс при включении протекает быстрее и связан с меньшими бросками тока.

В трехфазном трансформаторе процесс включения в отдельных фазах протекает различно, так как магнитные потоки фаз сдвинуты между собой на 120° ; броски токов в фазах будут неравными. Однако уравнение (17.14) для каждой фазы в отдельности остается справедливым.

В условиях эксплуатации токи включения трансформатора приходится учитывать главным образом при регулировке аппаратуры защиты во избежание неправильных отключений масляных выключателей, вызываемых токами включения. Известную опасность представляют также электромагнитные силы взаимного притяжения, возникающие при токах включения между витками первичной обмотки.

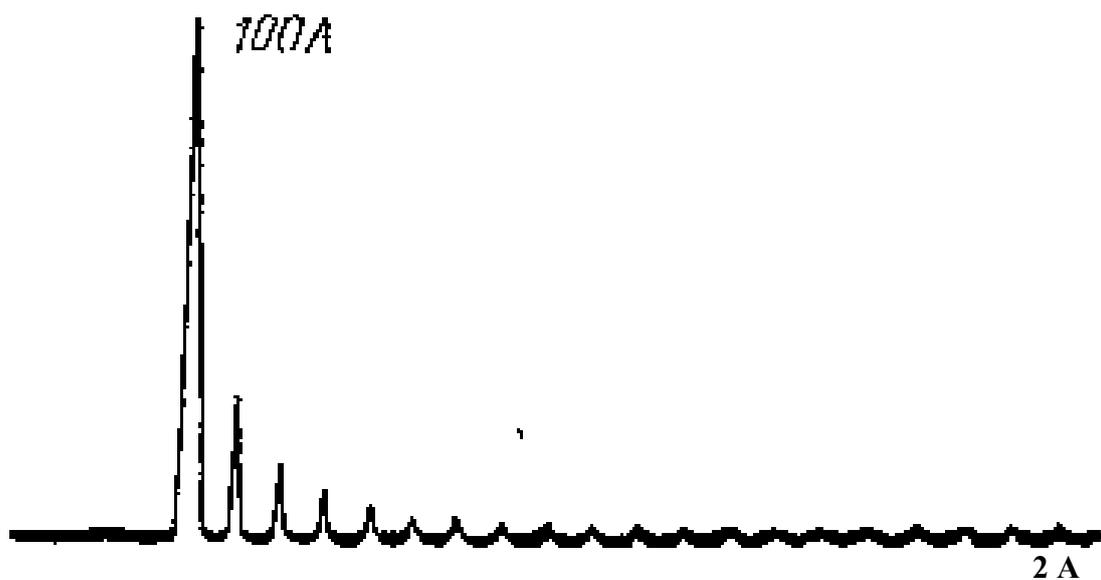


Рис. 17.13. Осциллограмма тока включения насыщенного трансформатора

17.5. Перенапряжения в трансформаторах

Перенапряжения, т. е. повышения напряжения, возможны: на зажимах трансформатора и между отдельными частями (катушками, слоями) обмотки трансформатора. К перенапряжениям на зажимах трансформатора следует отнести повышения напряжения сверх допустимых наибольших рабочих напряжений. Перенапряжения этого рода вызываются: явлениями атмосферного характера; аварийными режимами при коротких замыканиях,

когда токи в линии изменяются в пределах, значительно превышающих обычные; коммутационными процессами, связанными с включением трансформатора на сеть, с его выключением и т. д.

Во всех этих случаях в месте аварии возникает электромагнитная волна $U_{л}$, которая распространяется вдоль линии со скоростью, близкой к скорости света, и, достигнув трансформатора I , частью отражается от него обратно в линию $U_{от}$, частью же проникает в трансформатор и так или иначе распределяется вдоль его обмоток (рис. 17.14). Напряжение на трансформаторе будет $U_{тр}$. И в зависимости от свойств трансформатора могут возникнуть градиенты напряжений, опасные для целостности изоляции обмотки. Самый опасный случай – это когда волна имеет форму, приближающуюся к прямоугольной. Действие такой волны воспринимается трансформатором как действие периодической волны бесконечно большой частоты, так как при увеличении последней наклон синусоидальной кривой становится все круче и в пределе приближается к вертикали.

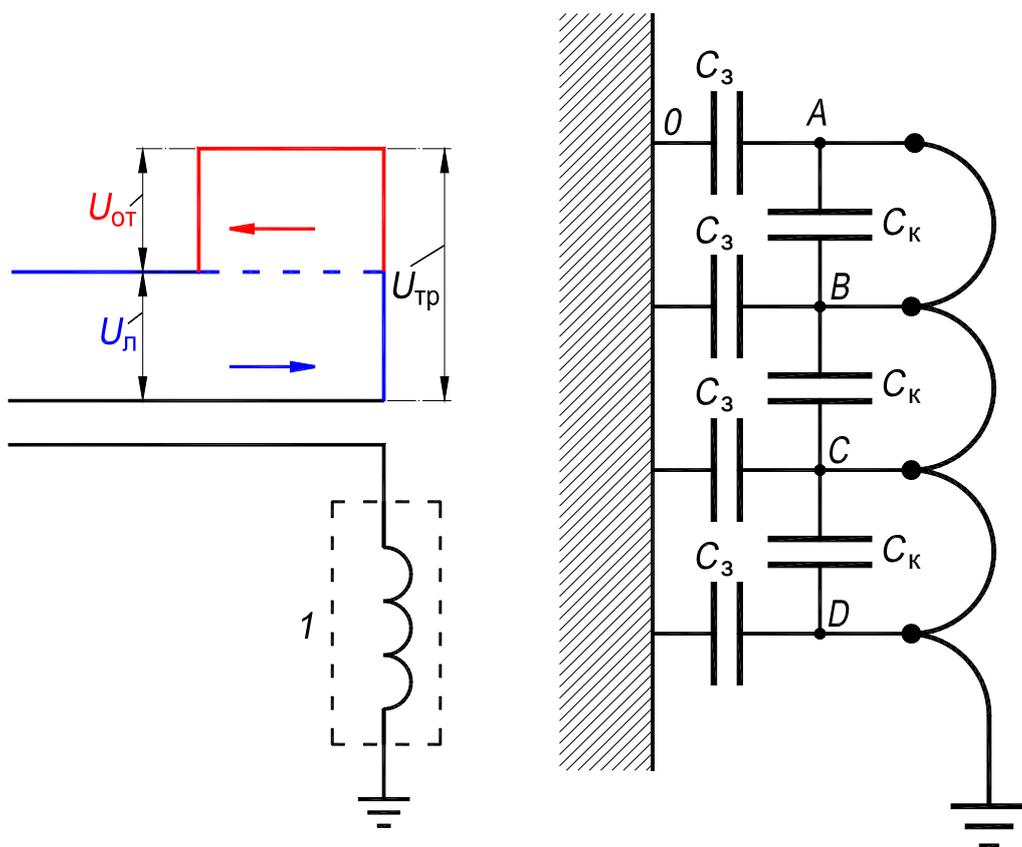


Рис. 17.14. Прямоугольная волна перенапряжения

Рис. 17.15. Ёмкостные связи трансформатора

В этих условиях проявляются ёмкостные сопротивления трансформатора. До сих пор учитывались только индуктивные сопротивления $X_L = \omega L$, в действительности существуют еще ёмкостные связи, упрощенная картина которых для одной какой-либо обмотки приводится на рис. 17.15. Здесь C_k – ёмкость между двумя соседними катушками и C_3 – ёмкость катушки на землю (бак и магнитопровод трансформатора заземлены (рис. 9.8, с. 175; рис. 10.1, лист 1, с. 190).

Ёмкости C_k соединены последовательно, ёмкости C_3 – параллельно. Если n_k – число катушек, то

$$C_{об} = C_k/n_k \text{ и } C_{о.з} = n_k C_3.$$

Здесь $C_{об}$ – ёмкость начального витка относительно концевого и $C_{о.з}$ – результирующая ёмкость трансформатора на землю. Всю совокупность ёмкостных связей трансформатора можно заменить одной эквивалентной (входной) ёмкостью $C_{тр} = \sqrt{C_{об} C_{о.з}}$, обуславливающей ёмкостное сопротивление $X_C = 1/(2\pi f/C_{тр}) = C_{тр}/2\pi f$. При нормальной частоте сопротивление X_C настолько велико по сравнению с индуктивным сопротивлением трансформатора $X_L = 2\pi fL$, что ток идет практически только по обмотке, преодолевая сопротивление X_L . Но по мере увеличения частоты соотношение между X_L и X_C изменяется: X_L увеличивается, а X_C уменьшается. При $f \approx \infty$ сопротивление $X_L \approx \infty$, а $X_C \approx 0$, т. е. в этих условиях ток течет только по ёмкостным связям, минуя обмотку. Процессы, которые возникают в трансформаторе при переходе от такого состояния к нормальному, зависят от того, заземлена нейтральная точка трансформатора или, наоборот, изолирована.

А. Переходный процесс в трансформаторе. Так как ток идет только по ёмкостным связям, то процесс распространения волны в обмотке сводится к заряду системы конденсаторов, показанных на рис. 17.15. Исследования показывают, что время заряда в среднем не превышает $5 \cdot 10^{-8}$ с, т. е. практически заряд происходит мгновенно.

Различают два предельных случая распределения напряжения в начальный момент времени ($t = 0$): 1) когда имеются только междукатушечные ёмкости C_k и нет ёмкостей на землю C_3 и 2) когда имеются только ёмкости на землю и нет междукатушечных ёмкостей.

В первом случае все междукатушечные ёмкости C_k образуют цепь последовательно соединенных конденсаторов, по которым течет ток одной и той же величины. Так как предположено, что $C_{AB} = C_{BC} = C_{CD}$ и т. д., то получается равномерное распределение напряжения по длине обмотки $l_{об}$ от значения $U_{л}$ на ее конце (это начало обмотки), присоединенном к линии, до нуля на заземленном конце обмотки (линия 2 на рис. 17.16,*a*). Такое же распределение напряжения существует в обмотке и при установившемся режиме, т. е. данное распределение напряжения в начальный момент является наиболее благоприятным.

Во втором случае весь ток пройдет только через первый сверху конденсатор AO , к которому и будет подведено все напряжение линии $U_{л}$ (линия 4 на рис. 17.16,*a*). Физически это означает, что напряжение $U_{л}$ падает целиком на первую катушку и, следовательно, во много раз превосходит нормальное. Такое распределение напряжения является весьма неблагоприятным и может привести к повреждению изоляции этой катушки.

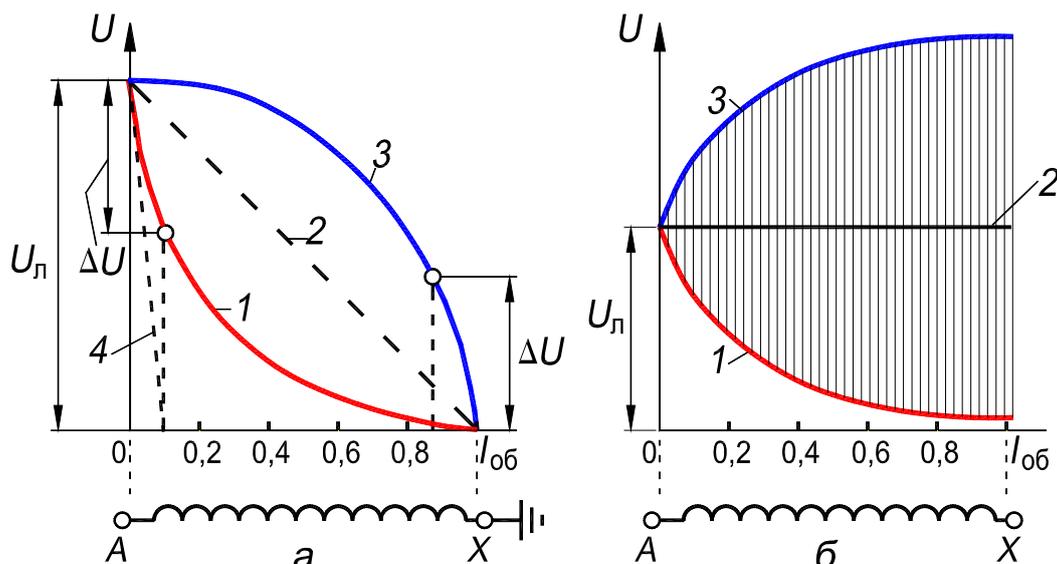


Рис. 17.16. Перенапряжения в трансформаторе:

a – с заземленной нейтралью, *б* – с изолированной нейтралью

Действительное распределение напряжения находится между обоими предельными случаями и показано на рис. 17.16,*a* линией 1. Здесь на первый виток приходится уже не все напряжение $U_{л}$, а только его часть ΔU , но все же настолько значительная, что может произойти разрушение изоляции. Эта опасность особенно велика в трансформаторах повышенного и высокого напряжения. Поэтому первые, ближайшие к линии, катушки трансформаторов на 35 кВ и выше выполняют с усиленной изоляцией.

Линия 1 дает распределение напряжения в обмотке в начальный момент времени $t = 0$. Но распределение напряжения при установившемся режиме определяется линией 2. Так как трансформатор представляет систему различным образом соединенных между собой индуктивностей и ёмкостей, образующих резонирующие контуры, то переход от начального распределения напряжения к установившемуся происходит в результате колебательного процесса.

Распределение напряжения в момент, следующий за начальным, дает линия 3 на рис. 17.16,а. Следует обратить внимание на то, что теперь наибольшее напряжение ΔU приходится на последний заземленный виток, т. е. опасность разрушения изоляции существует не только для первых (входных) витков обмотки, но и для последних. В дальнейшем колебания будут происходить в пределах, ограниченных линиями 1 и 3, постепенно затухая под действием активного сопротивления. В целом процесс напоминает вибрацию струны, закрепленной на концах.

Действительная картина распределения напряжения при перенапряжении значительно сложнее. В результате оказывается, что опасность повреждения изоляции существует для любого витка обмотки.

Распределение напряжения в начальный момент в трансформаторе с изолированной нейтралью (линия 1, на рис. 17.16,б) практически то же, что и в трансформаторе с заземленной нейтралью (линия 1, на рис. 17.16,а). Но при установившемся режиме все точки обмотки находятся под одним и тем же напряжением $U_{\text{л}}$ (линия 2). Колебания напряжения происходят в пределах, определяемых линиями 1 и 3. По сравнению с предыдущим случаем эти пределы гораздо шире, что составляет существенный недостаток систем с изолированной нейтралью.

Б. Защита трансформаторов от перенапряжений. Из изложенного вытекает, что волны перенапряжений, достигающие трансформатора, могут вызвать опасность повреждения его изоляции, вследствие чего возникает необходимость борьбы с этой опасностью. Для этой цели начальные и концевые катушки высоковольтных обмоток трансформатора выполняются с усиленной изоляцией, а нейтрали обмоток с напряжением 35 кВ и больше заземляются либо непосредственно, либо через сопротивления, значения которых для высокочастотных колебательных процессов малы. Кроме того, принимаются меры, направленные к частичному или по возможности более полному предотвращению электромагнитных колебаний в обмотке. Очевидно, что для этого необходимо добиваться изменения кривой начального распределения

напряжения таким образом, чтобы она по возможности приближалась к *кривой конечного распределения* (соответственно кривые 1 и 2 на рис. 17.16). Этого можно достичь изменением ёмкостных связей обмотки.

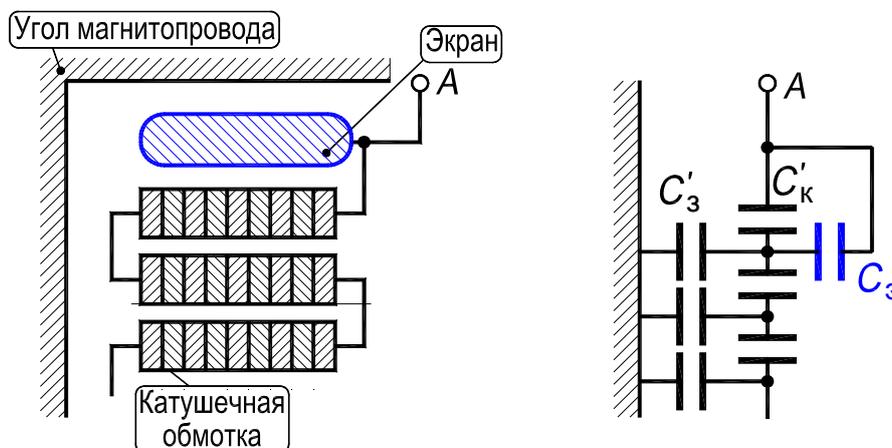


Рис. 17.17. Экранное кольцо в начале обмотки

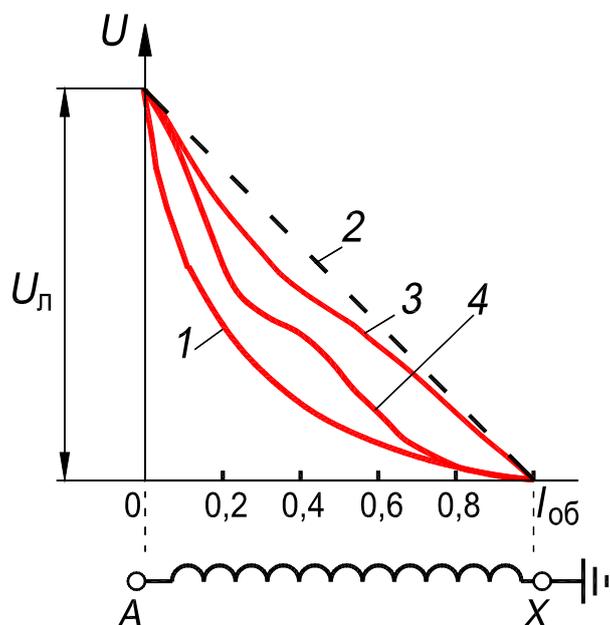


Рис. 17.18. Начальное распределение напряжения у обмотки без экранных колец (1), с экранном кольцом у начала обмотки (2) и вокруг первых катушек (3) и конечное распределение (4)

Простейшим мероприятием подобного рода является применение ёмкостных экранных колец у начала обмотки на 35 кВ и выше (рис. 17.17). Такое кольцо представляет собой картонный металлизированный диск, разрезанный по радиусу во избежание образования короткозамкнутого витка и соединенный с началом обмотки. Ёмкость этого кольца по отношению к виткам начальной катушки представлена на схеме ёмкостной цепочки обмотки (рис. 17.17) в виде ёмкости $C_э$. Эта ёмкость шунтирует продольные ёмкости витков $C'_к$ начальной катушки и повышает их потенциал (рис. 17.18).

Лучшие результаты можно получить, если, кроме того, охватить экранными кольцами также ряд последующих катушек обмотки (рис. 17.19) и соединить эти кольца с началом обмотки. Распределение ёмкостей этих колец в ёмкостной цепочке обмотки показано на этом рисунке. Наличие таких колец приводит к повышению потенциала начальных и последующих катушек обмотки, причем можно получить почти равномерное начальное распределение напряжения (рис. 17.18, кривая 3).

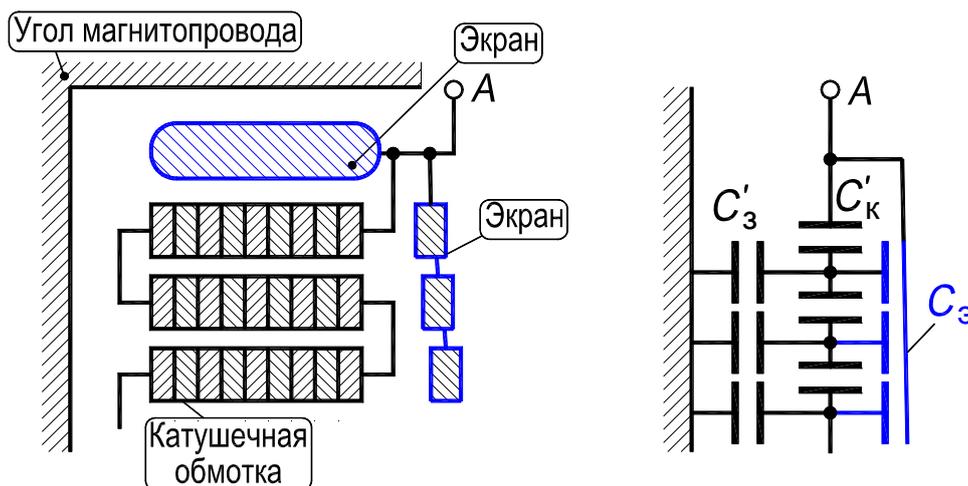


Рис. 17.19. Экранные кольца в начале и вокруг первых катушек обмотки

Действие таких колец можно пояснить следующим образом.

Если удастся подобрать ёмкости экранных колец так, что заряды на этих ёмкостях при зарядке ёмкостной цепочки будут равны зарядам на соответствующих элементах поперечных ёмкостей C_3 схемы замещения, то заряды на соответствующих элементах продольных ёмкостей $C_к$ уменьшатся и будут равны друг другу. Вследствие этого напряжения на этих элементах продольных ёмкостей будут также меньше и равны друг другу, что и приведет к выравниванию кривой распределения напряжений. Рассмотренный (рис. 17.19) способ ёмкостной защиты трансформаторов разработан на ОАО «Электрозавод», Москва, он применяется в отечественных трансформаторах напряжением 110 кВ и выше. Трансформаторы с подобной защитой называются грозоупорными или нерезонирующими, поскольку в них практически устранена опасность возникновения значительных резонансных электромагнитных колебаний под воздействием волн перенапряжений. Грозы являются источником наиболее опасных перенапряжений

Разработаны также другие способы борьбы с вредным воздействием волн перенапряжений.

18. Специальные типы трансформаторов

18.1. Автотрансформаторы

В трансформаторах обычного типа первичная и вторичная обмотки связаны между собой только магнитным потоком. Но можно выполнить трансформатор так, чтобы его первичная и вторичная обмотки имели общую часть. Такой трансформатор называется автотрансформатором. Так же как обычные трансформаторы, автотрансформаторы могут быть понижающими или повышающими (рис. 18.1), однофазными и трехфазными. Ниже рассматривается работа однофазного понижающего автотрансформатора в той же последовательности, что и обычного трансформатора.

А. Режим холостого хода. В схеме на рис. 18.1,*а* первичное напряжение $U_1 = U_{AX}$ подводится к зажимам *A* и *X* первичной обмотки, состоящей из w_{AX} последовательно соединенных витков. Вторичной обмоткой с числом витков w_{ax} служит часть первичной обмотки между зажимами *a* и *x*, причем зажим *x* совмещен с зажимом *X*.

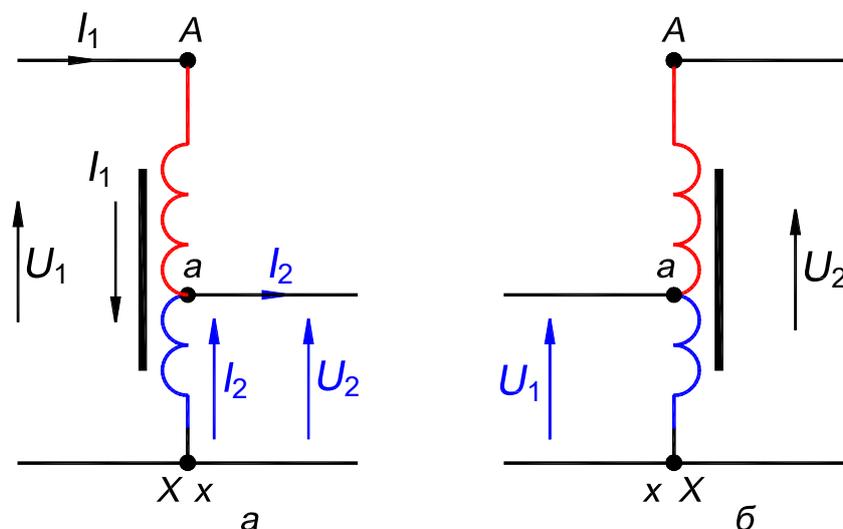


Рис. 18.1. Схема автотрансформатора: *а* — понижающего, *б* — повышающего

Режим холостого хода автотрансформатора при $I_2 = 0$ не отличается от соответствующего режима обычного трансформатора. Так как при установившемся режиме работы напряжение U_{AX} равномерно распределяется вдоль обмотки, то вторичное напряжение

$$U_2 = U_{ax} = U_{AX} w_{ax}/w_{AX} = U_{AX}(w_{AX}/w_{ax}) = U_{AX}/k_a = U_1/k_a. \quad (18.1)$$

Здесь

$$k_a = w_{AX}/w_{ax} \quad (18.2)$$

представляет собой коэффициент трансформации автотрансформатора.

Соответственно

$$U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax} = U_1 - U_1/k_a = U_1(1 - 1/k_a). \quad (18.3)$$

Если автотрансформатор повышающий, то $U_2 = U_{AX} = k_a U_1$.

Б. Режим короткого замыкания. При коротком замыкании автотрансформатора из первичной сети течет ток I_1 , а в проводах, замыкающих накоротко зажимы $a - x$, течет ток I_2 . Если бы обмотки $A - X$ и $a - x$ были связаны между собой только магнитным потоком, т. е. так же как в обычном трансформаторе, то по формуле (14.10) было бы $I_1 w_{AX} = -I_2 w_{ax}$. Однако ток I_1 течет только по части обмотки $A - a$, а по общей части обмотки $a - x$ течет ток I_{ax} , представляющий собой геометрическую сумму токов I_1 и I_2 . Следовательно,

$$I_{ax} = I_1 + I_2 = -I_1/(k_a - 1) = I_2(1 - 1/k_a). \quad (18.4)$$

Таким образом, в понижающем автотрансформаторе ток I_{ax} течет по общей части $a - x$ обмотки в направлении, обратном току I_1 и согласно с током I_2 .

Потери в обмотках обычного трансформатора составляют $I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$. Но в автотрансформаторе ток I_1 течет только на участке $A - a$, активное сопротивление которого

$$R_{Aa} = R_1 \cdot w_{Aa}/w_{AX} = R_1 [(w_{AX} - w_{ax})/w_{AX}] = R_1/(1 - 1/k_a). \quad (18.5)$$

Следовательно, потери в обмотках на участке $A - a$ составляют

$$P_{\Delta Aa} = I_1^2 R_{Aa} = I_1^2 R_1 (1 - 1/k_a). \quad (18.6)$$

По общей части обмотки автотрансформатора течет ток $I_2(1 - 1/k_a)$, т. е. в $(1 - 1/k_a)$ раз меньше по сравнению с током I_2 во вторичной обмотке обычного трансформатора. Поэтому при одной и той же в обоих случаях плотности тока $R_{ax} = R_2/(1 - 1/k_a)$, где R_{ax} — сопротивление части обмотки $a - x$ автотрансформатора, а R_2 — сопротивление вторичной обмотки обычного трансформатора.

Следовательно, потери в части обмотки $a - x$ составляют

$$P_{\Delta ax} = I_{ax}^2 R_{ax} = I_2^2 (1 - 1/k_a)^2 \cdot R_2 / (1 - 1/k_a) = I_2^2 R_2 (1 - 1/k_a). \quad (18.7)$$

При сопоставлении формул (18.5) и (18.6) видно, что автотрансформатор можно рассматривать как обычный трансформатор с активными сопротивлениями первичной и вторичной обмоток, уменьшенными в $1/(1 - 1/k_a)$ раз, т. е. сопротивление короткого замыкания автотрансформатора

$$R_{к.а} = R_к(1 - 1/k_a). \quad (18.8)$$

Соответственно потери короткого замыкания

$$P_{к.а} = P_к(1 - 1/k_a). \quad (18.9)$$

В таком же отношении изменяется и масса обмоток, т. е. $G_a = G(1 - 1/k_a)$, так как на участке $A - a$ обмотка автотрансформатора имеет по сравнению с обычным трансформатором то же сечение, но в $1/(1 - 1/k_a)$ раз меньшую длину, а на участке $a - x$ такую же длину, как вторичная обмотка трансформатора, но в $1/(1 - 1/k_a)$ раз меньшее сечение. Однако этот вывод носит теоретический характер. В действительности масса обмоток изменяется в меньшей степени, чем в отношении $(1 - 1/k_a)$.

Для индуктивного сопротивления можно сделать тот же вывод, что и для активного сопротивления, т. е.

$$X_{к.а} = X_к(1 - 1/k_a). \quad (18.10)$$

Следовательно, напряжение короткого замыкания автотрансформатора

$$u_{к.а} = u_к(1 - 1/k_a). \quad (18.11)$$

Соответственно ток короткого замыкания автотрансформатора больше, чем обычного трансформатора.

В. Работа под нагрузкой. Из первичной сети подводится к первичной обмотке $A - X$ автотрансформатора мощность $S_1 = U_1 I_1$. Если пренебречь потерями в автотрансформаторе, то $S_1 = U_1 I_1 = S_2 = U_2 I_2$ (рис. 18.1,а). Мощность $S_1 = S_2$ называется проходной мощностью $S_{пр}$ автотрансформатора. Но определение его размеров и веса производится не по мощности $U_2 I_2$, а по так называемой расчетной мощности:

$$S_{расч} = U_2 I_{ax} = U_2 \cdot I_2(1 - 1/k_a) = S_2(1 - 1/k_a) = S_{пр}(1 - 1/k_a). \quad (18.12)$$

В обычном трансформаторе $S_{расч} = S_{пр}$, но для автотрансформатора

$$S_{расч}/S_{пр} = 1 - 1/k_a = 1 - 1/(U_1/U_2) = (U_1 - U_2)/U_1. \quad (18.13)$$

Таким образом, затрата активных материалов в автотрансформаторе меньше, чем меньше разница между напряжениями U_1 и U_2 . Однако нужно иметь в виду, что при $U_1 = U_2$, т. е. при $k_a = 1$, энергия непосредственно передается из первичной сети во вторичную без какой-либо трансформации. При $k_a > 2$ разница между автотрансформатором и обычным трансформатором сглаживается, поэтому в силовых установках, как правило, $k_a = 1,25 - 2$. Из формулы (18.9) следует, что потери короткого замыкания в автотрансформаторе меньше, чем в трансформаторе, поэтому КПД автотрансформатора всегда выше, чем обычного двухобмоточного трансформатора.

Наряду с указанными преимуществами, автотрансформатор имеет недостатки, главными из которых являются: а) возможность попадания высокого напряжения в сеть низкого напряжения вследствие непосредственного электрического соединения первичной и вторичной обмоток; б) более тяжелые условия короткого замыкания вследствие меньшего значения $u_{к.а}$, хотя, с другой стороны, меньшее значение $u_{к.а}$ благоприятно влияет на пропускную способность линии. Поэтому автотрансформатор нуждается в защитных мероприятиях, которые сделали бы его работу достаточно надежной.

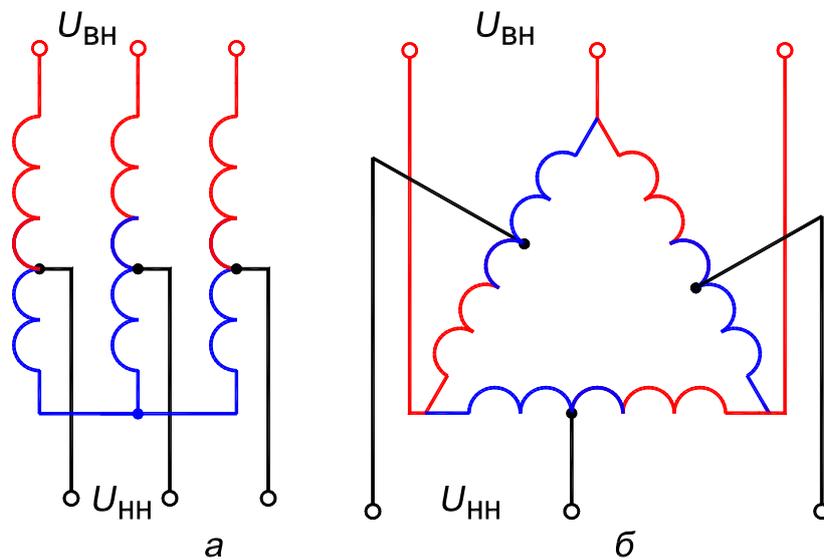


Рис. 18.2. Схемы трёхфазных автотрансформаторов

В трёхфазных автотрансформаторах первичные обмотки чаще всего соединяются в звезду, нейтральная точка которой может быть заземлена или использована для присоединения к ней нейтрального провода рис. 18.2,а). При этом для устранения третьих гармоник в потоках и ЭДС фаз применяется третичная обмотка малой мощности с соединением в треугольник.

При соединении обмотки в треугольник (рис. 18.2,б) коэффициент трансформации может изменяться в пределах $k_a = 1 - 2$. Эта схема используется в редких случаях. В энергетических системах находят применение трехобмоточные трансформаторы, в которых обмотки высшего и среднего напряжения имеют автотрансформаторную связь и соединяются в звезду, а обмотка низшего напряжения имеет с остальными обмотками трансформаторную связь и соединяется в треугольник.

Автотрансформаторы применяются для пуска синхронных и асинхронных двигателей, как делители напряжения и т. д. Также автотрансформаторы находят применение в мощных электроэнергетических системах для связи между собой сетей с близкими по величине напряжениями, например 150/110, 220/110, 420/220 кВ и т. д.

В ряде случаев автотрансформаторы высокого напряжения выполняются по смешанной автотрансформаторно-трансформаторной схеме. Для этого, кроме обмоток, имеющих общую часть, есть еще обмотка, связанная с первыми двумя только магнитным потоком.

Автотрансформаторы применяются также для плавного изменения напряжения в широких пределах (освещение в театрах и кино). В лабораторной практике используются автотрансформаторы, в которых плавное изменение напряжения осуществляется при помощи скользящего контакта между угольной щеткой и проводниками обмотки.

18.2. Многообмоточные трансформаторы

В энергетических установках, а также в автоматических устройствах и приборах возникает потребность в осуществлении связи между несколькими цепями или системами переменного тока разных напряжений. Такая связь наиболее экономично осуществляется при помощи многообмоточных трансформаторов, в которых число обмоток на стержне равно числу разных напряжений.

Многообмоточные трансформаторы могут иметь одну или несколько первичных и одну или несколько вторичных обмоток.

А. Трехобмоточный трансформатор с одной первичной обмоткой ВН и двумя вторичными обмотками НН и СН. Конструкция сердечника трехобмоточного трансформатора ничем не отличается от обычного двухобмоточного.

Обмотка низшего напряжения может быть расположена у стержня или наиболее удалена от него. Обмотка высшего напряжения обычно наиболее удалена от стержня, но может располагаться между обмотками низшего и среднего напряжений (рис. 18.3).

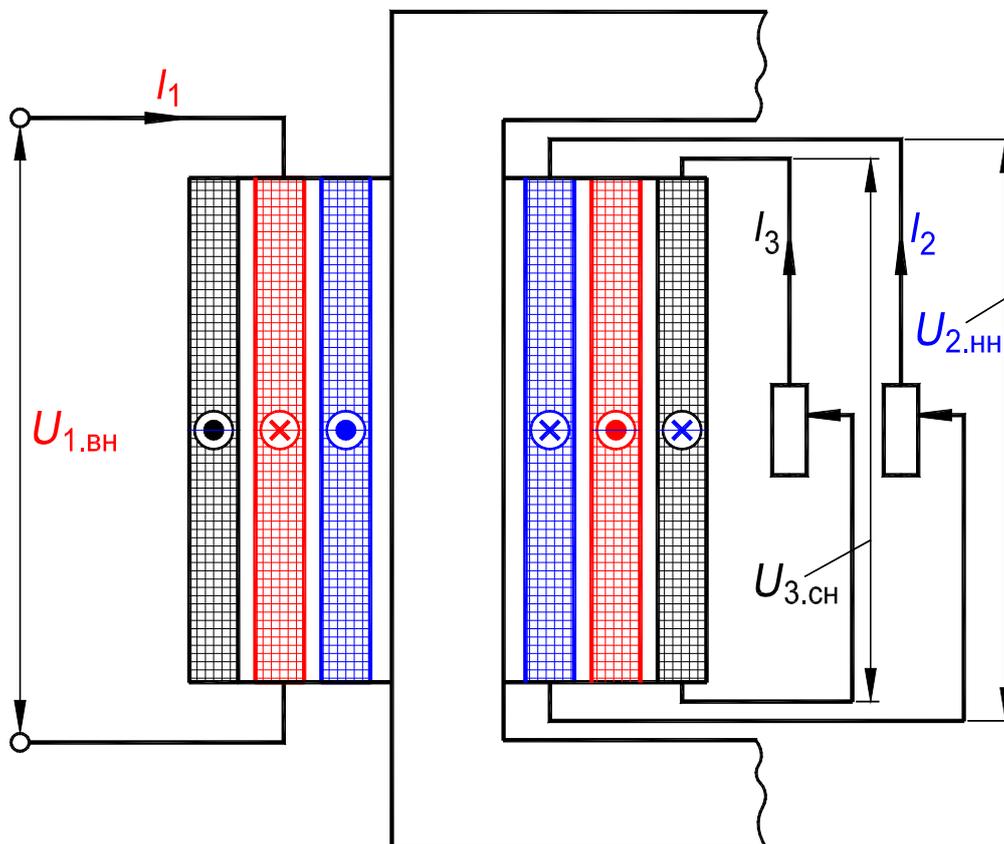


Рис. 18.3. Схема трехобмоточного трансформатора:
показан один стержень с обмотками ВН, НН и СН

Согласно ГОСТ 11677–85, номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора называется мощность наиболее мощной обмотки его. Обычно мощности обмоток высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжений трехобмоточного трансформатора в процентах от его номинальной мощности составляют:

- а) 100; 100; 100;
- б) 100; 100; 66,7;
- в) 100; 66,7; 100;
- г) 100; 66,7; 66,7.

Трехфазные трансформаторы выполняются с группами соединений $Y_H/Y_H/\Delta-0-11$ или $Y_H/\Delta/\Delta-11-11$, а однофазные – с группой соединений $I/I-0-0$.

В соответствии с наличием трех обмоток трансформатор имеет и три различных коэффициента трансформации, а именно k_{12} – между обмотками высшего напряжения и среднего напряжения, k_{13} – между обмотками высшего напряжения и низшего напряжения, k_{23} – между обмотками среднего напряжения и низшего напряжения. Каждый из них определяется так же, как и в обычном двухобмоточном трансформаторе,

$$k_{12} = w_1/w_2 = E_1/E_2; k_{13} = w_1/w_3 = E_1/E_3; k_{23} = w_2/w_3 = (w_2/w_1)/(w_3/w_1) = k_{13}/k_{12}.$$

Опытным путем коэффициенты трансформации определяются из опыта холостого хода, т. е. так же как и в двухобмоточном трансформаторе.

Опыт короткого замыкания производится в трехобмоточном трансформаторе три раза; поочередно подводится напряжение к одной из обмоток и замыкается другая обмотка при разомкнутой третьей. Напряжения короткого замыкания, которые при этом получаются, зависят от расположения обмоток. Наибольшее напряжение u_k получается между обмотками, наиболее удаленными друг от друга, так как в этом случае потоки рассеяния трансформатора достигают наибольшего развития.

Мощности обмоток трехобмоточного трансформатора

$$S_1 = mU_1I_1, S_2 = mU_2I_2, S_3 = mU_3I_3$$

в случае, если обмотка 1 является первичной, находятся в соотношении

$$S_1 \leq S_2 + S_3,$$

так как коэффициенты мощности $\cos \varphi_2$ и $\cos \varphi_3$ обычно различны, токи I_2 и I_3 сдвинуты по фазе и поэтому $I_1 < I_2 + I_3$.

Трехобмоточные трансформаторы строятся обычно на большие мощности. Например, выполнены однофазные трехобмоточные понижающие трансформаторы мощностью 90 000 кВ·А для линейных напряжений 410/115/11 кВ; три таких трансформатора соединяются в трехфазную группу мощностью $3 \times 90\,000 = 270\,000$ кВ·А. Для линии передачи Куйбышев – Москва выполнены однофазные трёхобмоточные повышающие трансформаторы мощностью 123500 кВ·А при напряжении $420/\sqrt{3}$; $121/\sqrt{3}$; 13,8 кВ; мощность трехфазной группы $3 \times 123\,500 = 370\,000$ кВ·А.

В трёхобмоточном трансформаторе явления рассеяния между обмотками гораздо сложнее, чем в двухобмоточном, поскольку на каждую из обмоток воздействуют индуктивно две обмотки. Учитывая это воздействие, вводят понятие об эквивалентных индуктивных сопротивлениях рассеяния обмоток X_1 , X_2 и X_3 .

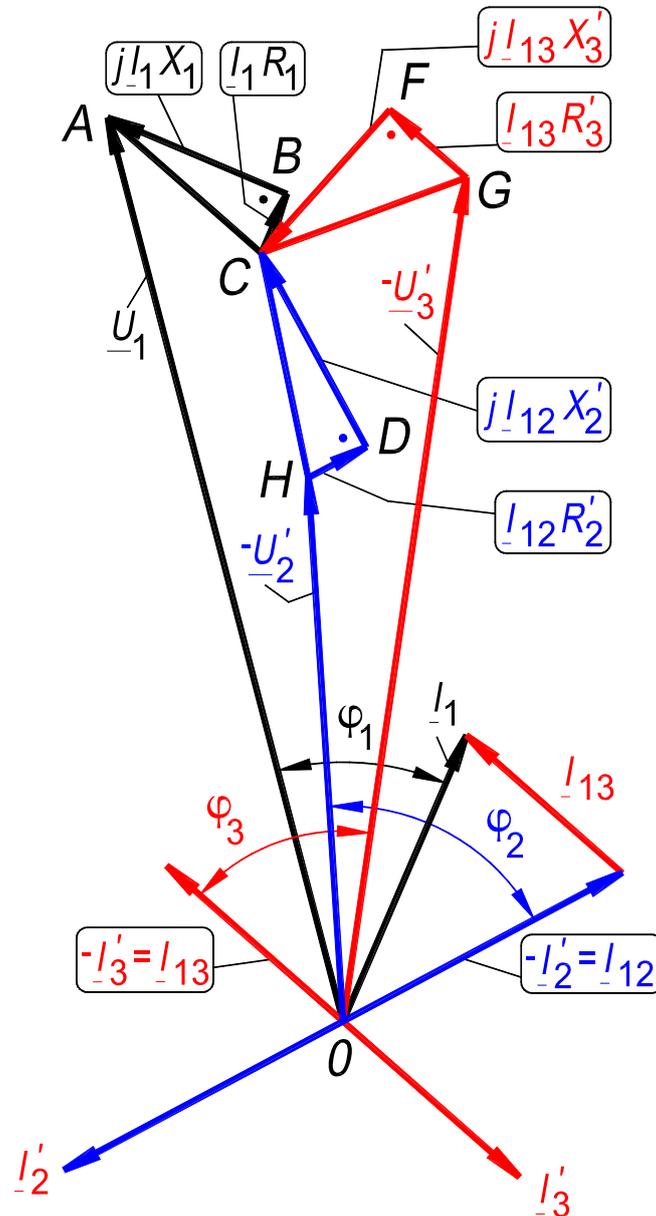


Рис. 18.4. Векторная диаграмма трёхобмоточного трансформатора

В выполненном трансформаторе эти сопротивления можно определить по данным упомянутых выше трех опытов короткого замыкания. Если считать, кроме того, известными активные сопротивления обмоток R_1 , R_2 и R_3 , то можно построить векторную диаграмму трёхобмоточного трансформатора. Пусть, например, обмотка 2 нагружена на активно-индук-

тивную нагрузку, а обмотка 3 на активно-ёмкостную (рис. 18.4). Соответственно токам \underline{I}'_2 и \underline{I}'_3 в обмотках 2 и 3 составляющие первичного тока будут: $\underline{I}_{12} = -\underline{I}'_2$ и $\underline{I}_{13} = -\underline{I}'_3$. Если пренебречь током холостого хода \underline{I}_x , то $\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} + \underline{I}_{13}$. Обе вторичные обмотки 2 и 3 следует рассматривать как работающие параллельно от источника с одним и тем же напряжением.

Пусть $U'_2 = 0H$ и $U'_3 = 0G$; если построить обычным образом векторы активных и индуктивных падений напряжения $\underline{I}_{12}R'_2$, $j\underline{I}_{12}X'_2$, $\underline{I}_{13}R'_3$ и $j\underline{I}_{13}X'_3$ обмоток 2 и 3, то получится общая точка C . Откладывая от нее векторы активного и индуктивного падения напряжения \underline{I}_1R_1 и $j\underline{I}_1X_1$ в обмотке 1, получается вектор подведенного к зажимам первичной обмотки напряжения \underline{U}_1 . Фазные соотношения между напряжениями \underline{U}_1 , \underline{U}'_2 , \underline{U}'_3 , и соответствующими им токами определяются углами φ_1 , φ_2 и φ_3 , причем углы φ_2 и φ_3 задаются электрическими сетями, на которые работают обмотки 2 и 3.

Напряжения короткого замыкания, в трёхобмоточном трансформаторе больше, чем в двухобмоточном, поэтому и изменение напряжения в трехобмоточном трансформаторе значительнее, чем в двухобмоточном.

В трансформаторах одинаковой мощности КПД трёхобмоточного трансформатора практически такой же, как и у двухобмоточного.

Б. Трёхобмоточный трансформатор с двумя первичными обмотками.

На крупных электрических станциях иногда возникает необходимость в работе двух (или трех) генераторов через один мощный повышающий трансформатор (рис. 18.5) В этих случаях применяют однофазные трехобмоточные трансформаторы, соединенные в трехфазную группу. Трансформаторы имеют бронестержневые магнитные системы, выполненные по схеме рис. 9.5, с. 173.

Первичные обмотки 1 и 2 генераторного напряжения НН размещаются на разных стержнях, вторичная обмотка 3 высшего напряжения ВН имеет две параллельные цепи, которые также размещаются на разных стержнях. Такие обмотки называются «расщепленными». При таком устройстве трансформатор можно рассматривать как два отдельных трансформатора, каждый из которых питается от отдельного генератора. При временном питании трансформатора от одного генератора на стороне высшего напряжения будет практически нагружена только одна из параллельных цепей, размещенная на том же стержне, что и первичная обмотка, соединенная с питающим генератором.

В таких трансформаторах сопротивление короткого замыкания между двумя генераторными обмотками равно $2Z_k$, где Z_k – сопротивление короткого замыкания между обмотками НН и ВН одного стержня.

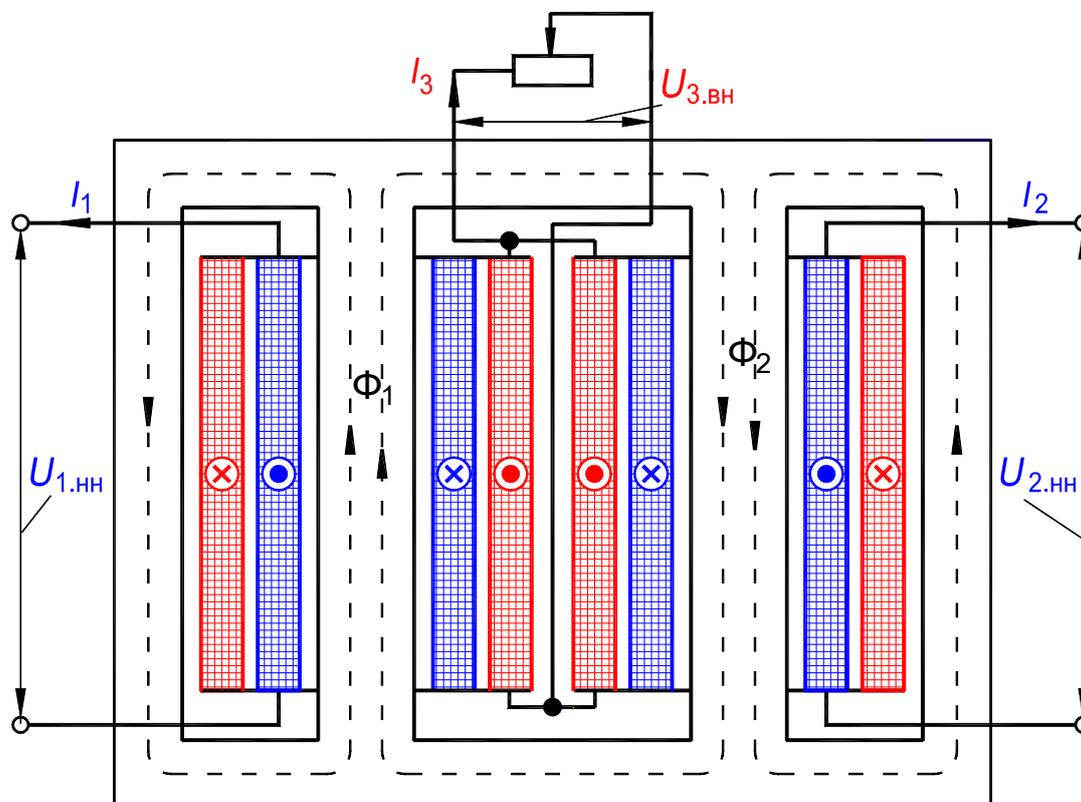


Рис. 18.5. Схема трехобмоточного трансформатора, питаемого от двух генераторов

При случайном неравенстве генераторных напряжений $U_{1.нн}$ и $U_{2.нн}$ создается неравенство магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 за счет той их части, которую образуют индукционные линии, проходящие по крайним, не обмотанным стержням. В этом случае ЭДС, наведенные в параллельных цепях обмотки ВН, не будут равны и, следовательно, ток I_3 будет неравномерно распределяться между параллельными цепями. Во избежание этого напряжения генераторов должны автоматически регулироваться для сохранения равенства $U_1 = U_2$.

Если магнитную систему трансформатора выполнить двухстержневой (рис 9.1,а, с. 169), то при $U_1 \neq U_2$ индукционные линии, соответствующие разности магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , будут замыкаться между верхним и нижним ярусами вне магнитной системы и могут создать значительные потери от вихревых токов в стенках масляного бака трансформатора и в других металлических конструктивных деталях, находящихся во внешнем магнитном поле.

18.3. Сварочные трансформаторы

Сварочные трансформаторы имеют различные характеристики и конструктивное оформление в зависимости от вида сварки (дуговая, стыковая, шовная или точечная). Здесь имеются в виду только трансформаторы для дуговой сварки.

Сварочный трансформатор должен иметь достаточное для зажигания дуги напряжение холостого хода порядка 60 – 70 В и круто падающую внешнюю характеристику. В простейшем случае для этой цели можно было бы использовать автотрансформатор, который дает хорошие технические и экономические показатели, но неприемлем по условиям техники безопасности, поскольку сварщик может попасть под полное напряжение сети. Поэтому сварочные трансформаторы выполняются практически только с раздельными первичной и вторичной обмотками.

Для получения требуемой внешней характеристики сварочные трансформаторы выполняются с относительно большим рассеянием или в самом трансформаторе, или в отдельном дросселе. Ток короткого замыкания сварочного трансформатора не превышает номинальный более чем в 2 – 3 раза, $I_{2к} \leq (2 - 3)I_{2ном}$.

Регулирование сварочного тока может производиться: ступенями – путем переключения секций одной или нескольких обмоток или плавно – посредством изменения магнитного сопротивления самого трансформатора или соединенного с ним дросселя.

На рис. 18.6 показана принципиальная схема сварочного трансформатора. Дроссель вынесен из трансформатора, т. е. составляет отдельную часть установки, и имеет зазор, величину которого можно изменять в пределах примерно 6 – 7 мм, чем и осуществляется регулирование сварочного тока. Данные трансформатора СТЭ-35: мощность 30 кВ·А; напряжение: первичное 220 В или 380 В; вторичное при холостом ходе – 60 В; пределы регулирования сварочного тока 150 – 500 А; номинальное напряжение при нагрузке – 30 В.

Кроме трансформатора СТЭ-35, выполняются сварочные трансформаторы на 1000 и 2000 А с дросселями, встроенными в кожух трансформатора.

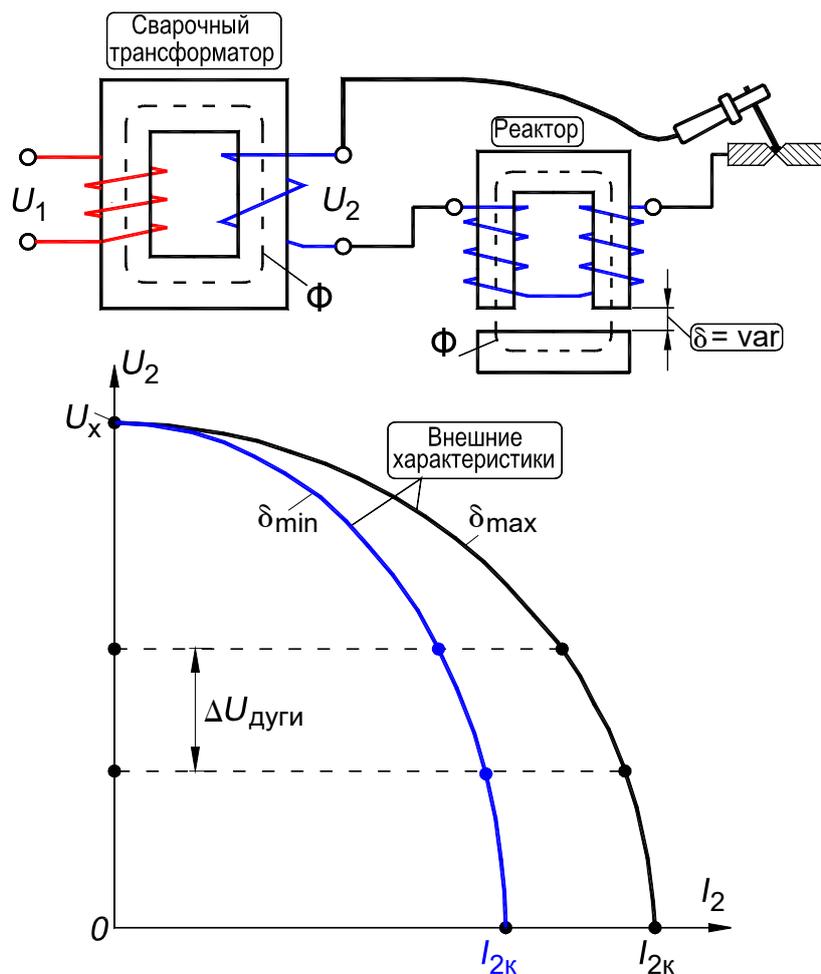


Рис. 18.6. Принципиальная схема и внешние характеристики сварочного трансформатора

18.4. Измерительные трансформаторы

При напряжениях больше 250 В и токах, превышающих несколько десятков ампер, все измерительные приборы переменного тока включаются через измерительные трансформаторы. Различают трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.

А. Трансформаторы тока. Первичная обмотка трансформатора тока состоит из одного или нескольких витков относительно большого сечения и включается последовательно в цепь, ток которой измеряется (рис. 18.7). Вторичная обмотка состоит из большого числа витков сравнительно малого сечения и замыкается на приборы с малым сопротивлением – амперметры, последовательные обмотки ваттметров, счетчиков и т. д. Таким образом, рабочий режим трансформатора тока представляет собой практически режим короткого замыкания.

При номинальном токе индукция в сердечнике трансформатора $B_m = 0,08 - 1,0$ Тл. Наличие небольшого намагничивающего тока I_x влечет за собой погрешность, по величине которой трансформаторы тока делятся на пять классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3 и 10.

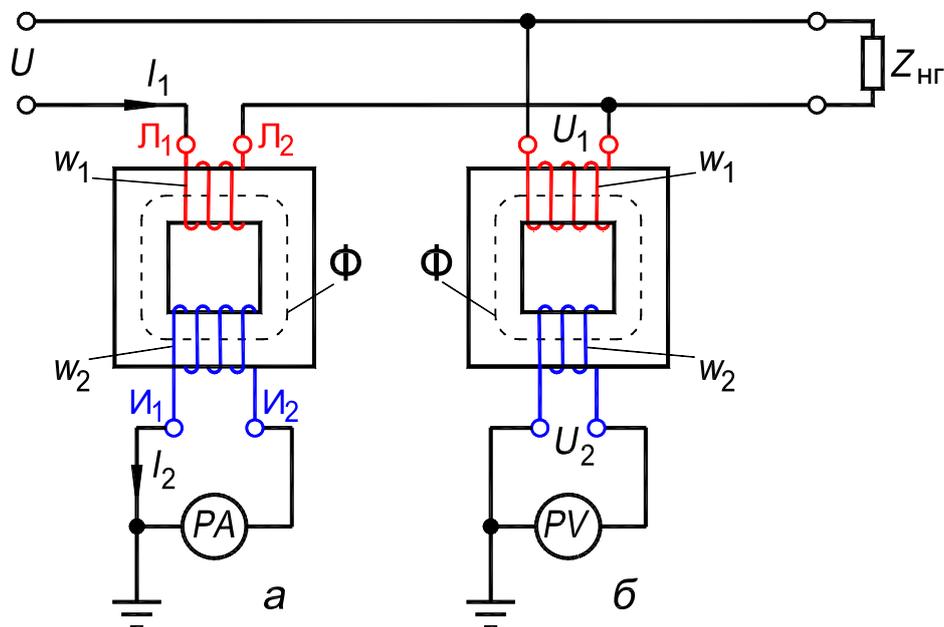


Рис. 18.7. Схемы включения измерительных трансформаторов:

а – трансформатора тока; б – трансформатора напряжения

Трансформаторы тока изготавливаются на номинальные первичные токи в пределах от 5 до 15 000 А и имеют, как правило, номинальный вторичный ток $I_2 = 5$ А (для внутренних установок). В зависимости от назначения трансформаторы тока конструктивно оформлены весьма различно. В целях безопасности вторичная обмотка должна быть надежно заземлена.

Следует особо подчеркнуть, что вторичную обмотку ни в коем случае нельзя оставлять разомкнутой при включении трансформатора или размыкать ее при работе. В этом случае трансформатор попадает в режим холостого хода. Индукция в сердечнике возрастает во много раз по сравнению с ее нормальным значением – до 1,4 – 1,8 Тл; соответственно этому растут потери в стали и при длительной работе неизбежен перегрев сердечника и повреждение изоляции вторичной обмотки. Но главную опасность представляет напряжение на зажимах разомкнутой вторичной обмотки U_2 , имеющее резко пикообразный характер; объясняемый весьма сильным насыщением стали, вследствие чего поток трансформатора приобретает вид сильно уплощенной кривой. В трансформаторах для большого тока вторичное напряжение достигает нескольких тысяч вольт и более и, следовательно,

представляют несомненную опасность для обслуживающего персонала. Таким образом, соблюдение указанного выше условия о постоянной замкнутости вторичной обмотки трансформатора тока на себя или на приборы чрезвычайно важно.

При повышенных напряжениях и больших величинах тока трансформаторы тока приобретают значительные размеры. Правда, по мере усовершенствования конструкции удастся сильно уменьшить размеры такого трансформатора.

На рис. 18.8,*а* показана схема включения непосредственно в сеть токовой обмотки 1 и обмотки напряжения 2 ваттметра *PW*. На рис. 18.8,*б* токовая обмотка ваттметра подключена к вторичной обмотке И1-И2 трансформатора тока ТА.

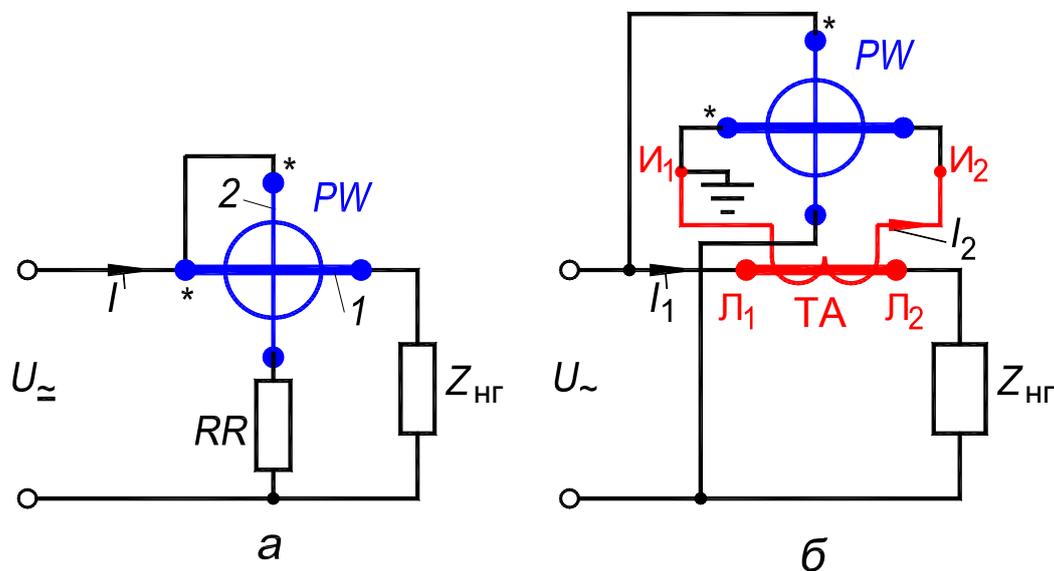


Рис. 18.8. Схема включения ваттметра:

а – непосредственно; *б* – через трансформатор тока;

1 – цепь тока; *2* – цепь напряжения

Б. Трансформаторы напряжения. Условия работы трансформаторов напряжения соответствуют работе трансформаторов в режиме холостого хода. Вторичное напряжение трансформатора $U_2 = 110$ В. Чтобы допускаемая погрешность трансформатора не выходила за определенные пределы, намагничивающий ток трансформатора должен быть ограничен. Для этого сердечник трансформатора выполняют из стали высокого качества и относительно слабо насыщают ($B_m = 0,6 - 0,8$ Тл). По величине допускаемой погрешности трансформаторы напряжения делятся на четыре класса точности – 0,2; 0,5; 1 и 3 и выполняются как в виде однофазных

трансформаторов на номинальные мощности до 1000 В·А, так и в виде трехфазных трансформаторов на мощности до нескольких киловольт-ампер.

При повышенных напряжениях трансформаторы напряжения представляют собой сложные электромагнитные аппараты, которые должны обеспечить необходимую точность измерений. Так, например, измерительный однофазный трёхобмоточный трансформатор напряжения для напряжения $420\,000/\sqrt{3}$; $100/\sqrt{3}$ В представляет собой каскад из 12 элементов, собранных в три отдельных блока, зашунтированных ёмкостями для более равномерного распределения напряжения между элементами. Сердечники с обмотками каждого блока помещены в отдельные фарфоровые кожухи, заполненные маслом. В такие же кожухи помещены ёмкости.

18.5. Трансформаторы с плавным регулированием напряжения под нагрузкой

Одна из ответственных задач при работе мощной электроэнергетической системы состоит в наиболее экономичном распределении активной и реактивной мощности между отдельными звеньями системы путем регулирования ее напряжения в соответствующих точках. Это достигается с помощью трансформаторов со ступенчатым регулированием напряжения под нагрузкой путем переключения имеющихся для этой цели ответвлений от обмоток. Обычное число регулировочных ступеней 8 – 10, но может быть доведено до 16 – 20. Переход под нагрузкой с одной ступени напряжения на другую должен происходить без разрыва рабочей цепи. При этом регулировочная ступень обмотки на время переключения замыкается накоротко. Для ограничения возникающего в этой ступени тока короткого замыкания применяются реакторы или активные сопротивления.

В РФ трансформаторы с регулируемым под нагрузкой напряжением линий и сетей изготавливаются мощностью до сотен тысяч киловольт-ампер (трансформаторы с РПН, см. разд. 15.5, Б, с. 269).

А. Индукционный регулятор. В ряде случаев возникает необходимость плавного регулирования напряжения, притом в широких пределах. Разработан ряд способов такого регулирования напряжения, которые нашли практическое применение. На подстанциях и в лабораторных установках применяются индукционные регуляторы, представляющие собой асинхронную машину с заторможенным ротором [2, с. 282 – 294].

Б. Трансформатор со скользящими контактами. Трансформаторы с плавным регулированием напряжения выполняются в единицах относительно малой мощности. Широкое распространение приобрели регулировочные трансформаторы, работающие по автотрансформаторной схеме. В таких трансформаторах обмотка располагается на сердечнике в один слой и выполняется из неизолированного провода. По неизолированной внешней поверхности обмотки (рис. 18.9,*а*) скользят контактные щетки, благодаря чему достигается плавное изменение числа включенных в работу витков обмотки. Такой метод широко используется в маломощных лабораторных автотрансформаторах. В более мощных трансформаторах и автотрансформаторах по обмотке скользят щетки специальной конструкции, причем ширина щетки должна быть такой, чтобы переход с витка на виток происходил без разрыва рабочей цепи. Для ограничения тока короткого замыкания, возникающего в этом случае в перекрываемых щеткой витках обмотки, щетка может быть выполнена из ряда контактов, соединенных между собой активными сопротивлениями, или из угля с таким расчетом, чтобы ее поперечное сопротивление было достаточно для ограничения тока короткого замыкания, а продольное не вызывало чрезмерно большего падения напряжения при протекании нагрузочного тока. Число витков обмотки выбирается так, чтобы на виток приходилось 0,5 – 1 В и чтобы, следовательно, регулирование напряжения происходило плавно. Такая конструкция применяется, например, в трансформаторах мощностью до 250 кВ·А с регулированием напряжения в пределах от 0 до 220/380 В для освещения зрительных залов и сцен.

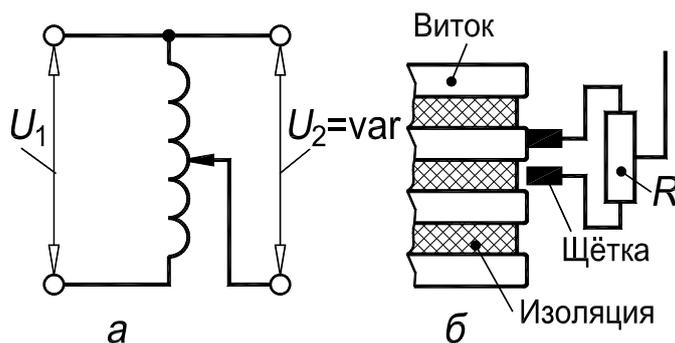


Рис. 18.9. Трансформатор со скользящими контактами

В. Трансформатор с подвижными обмотками и сердечниками. Некоторое применение находят трансформаторы с подвижными обмотками и сердечниками. На рис. 18.10 изображён трансформатор с двумя первичными обмотками 1, включенными параллельно, и вторичной обмоткой 2, расположенной на подвижном сердечнике. При движении сердечника вниз из положения, пока-

занного на рис. 18.10,*а*, потокосцепление с обмоткой 2 плавно меняется и напряжение обмотки также плавно меняется от значения $+U_2$ (рис. 18.10,*б*) до $-U_2$ (рис. 18.10,*з*) при нижнем крайнем положении сердечника, когда обмотка 2 будет находиться напротив нижней обмотки 1.

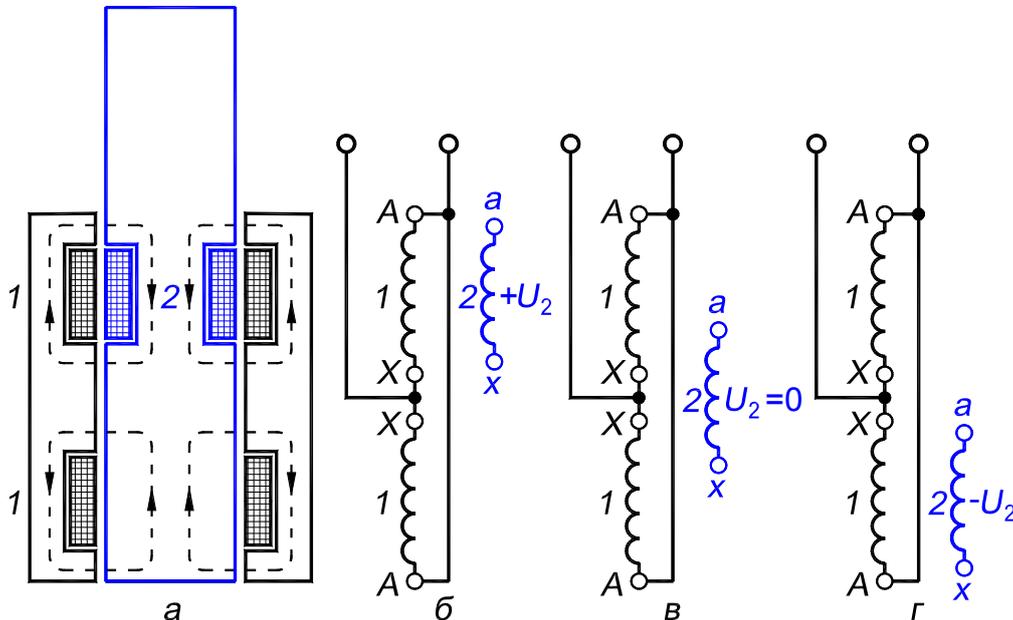


Рис. 18.10. Трансформатор с подвижной вторичной обмоткой

Г. Трансформатор с подмагничиванием постоянным током. Для плавного регулирования напряжения также применяются трансформаторы с элементами, подмагничиваемыми постоянным током. Предложено значительное количество разновидностей таких трансформаторов. Рассмотрим в качестве примера два возможных решения (рис. 18.11 и 18.12).

Г1. Однофазный трансформатор с подмагничиваемым шунтом. На рис. 18.11 представлен однофазный двухобмоточный трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого расположены на разных стержнях, а между стержнями имеется магнитный шунт, набранный, как и сердечники, из листовой электротехнической стали. Благодаря такому устройству обмотки трансформатора имеют пониженную электромагнитную связь и большое рассеяние.

Полезный поток Φ_c замыкается через крайние сердечники. Если пренебречь небольшим намагничивающим током, то токи I_1 и I_2 находятся в противофазе и создают потоки рассеяния $\Phi_{1\sigma}$ и $\Phi_{2\sigma}$, которые замыкаются в основном через шунт и складываются в нем. Вследствие большого рассеяния падения напряжения в сопротивлениях рассеяния jX_1I_1 и jX_2I_2 велики, что приводит к значительному уменьшению вторичного напряжения.

Магнитный шунт подразделен на две части, на каждой из которых расположена половина подмагничивающей обмотки, питаемой постоянным током $i_{\text{ш}}$. Эти половины обмотки включены так, что создаваемый ими постоянный магнитный поток $\Phi_{\text{ш}}$ замыкается в пределах шунта. Чем больше $i_{\text{ш}}$, тем больше $\Phi_{\text{ш}}$ и тем сильнее насыщается шунт, в результате чего $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ уменьшаются. Это приводит к повышению вторичного напряжения U_2 . Таким образом, путем регулирования $i_{\text{ш}}$ можно регулировать величину U_2 .

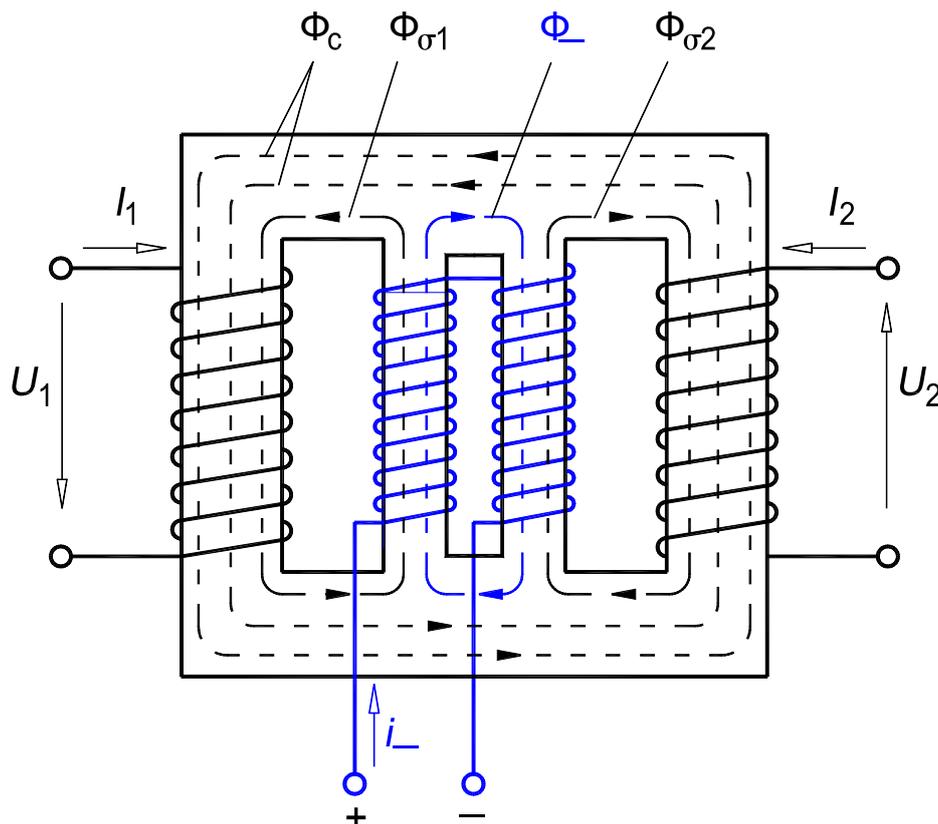


Рис. 18-11. Однофазный трансформатор с подмагничиваемым шунтом

Часть вторичной обмотки можно расположить на общем стержне с первичной обмоткой. Это приведет к усилению электромагнитной связи, уменьшению рассеяния и уменьшению диапазона регулирования U_2 . Поэтому диапазон регулирования U_2 определяется распределением витков вторичной обмотки между двумя стержнями.

Г2. Устройство с двумя однофазными трансформаторами с подмагничиванием. Ещё одна из возможных схем регулируемого трансформатора с подмагничиванием постоянным током изображена на рис. 18.12. В этой схеме используются два однофазных трансформатора α и β , имеющих различные коэффициенты трансформации $k_{21\alpha} \neq k_{21\beta}$. Каждый из этих трансформаторов имеет

расщепленный магнитопровод, подмагничиваемый постоянным током в противоположных направлениях, в этом случае намагничивающий ток получается почти синусоидальным.

Первичные обмотки трансформаторов с напряжениями $\underline{U}_{1\alpha}$ и $\underline{U}_{1\beta}$ соединяются последовательно и включаются на напряжение сети $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1\alpha} + \underline{U}_{1\beta}$. Вторичные обмотки с напряжениями $\underline{U}_{2\alpha} = k_{21\alpha}\underline{U}_{1\alpha}$ и $\underline{U}_{2\beta} = k_{21\beta}\underline{U}_{1\beta}$ также соединяются последовательно и нагружаются на сопротивление, напряжение на котором равно $\underline{U}_2 = \underline{U}_{2\alpha} + \underline{U}_{2\beta}$.

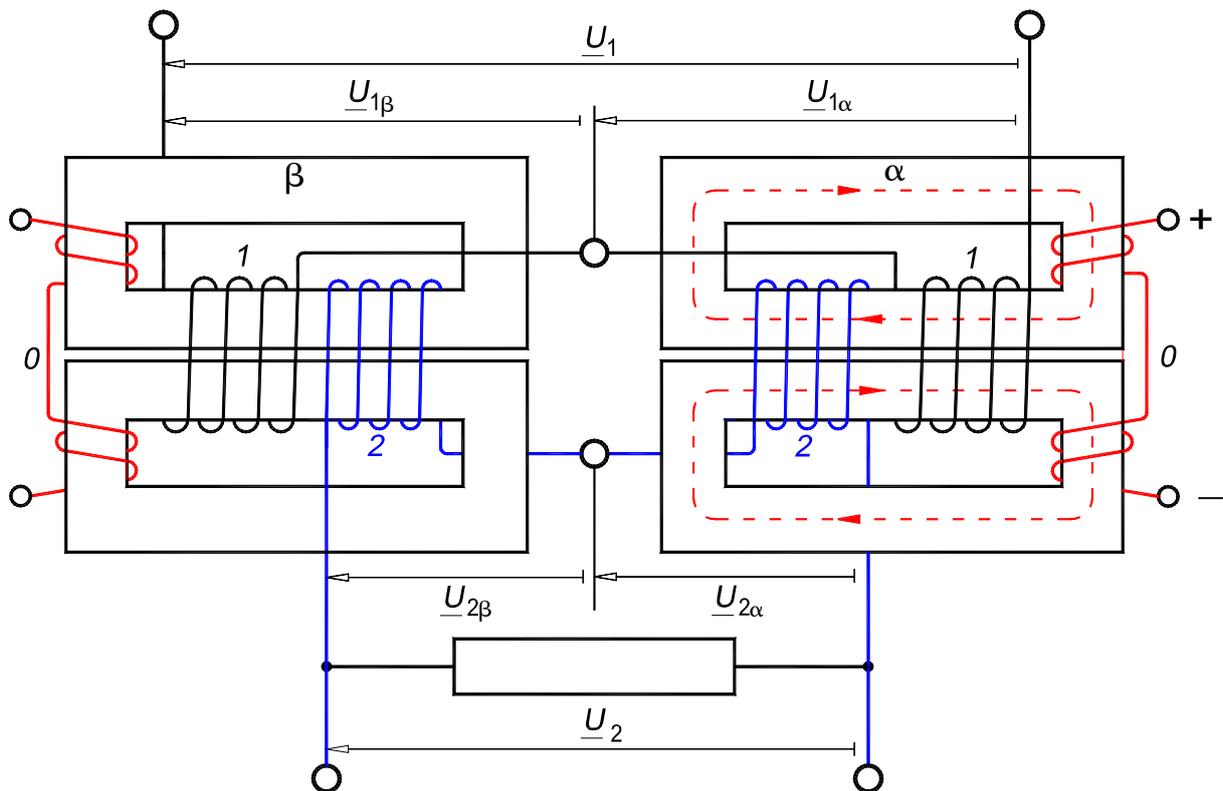


Рис. 18.12. Схема регулируемого трансформатора с подмагничиванием магнитопровода постоянным током

При отдельном подмагничивании трансформаторов α и β могут быть изменены соотношение между сопротивлениями первичных обмоток трансформаторов, обтекаемых общим током I_1 , и отношение напряжений

$$\xi = \underline{U}_{1\beta}/\underline{U}_{1\alpha}$$

(с увеличением подмагничивания трансформатора β отношение ξ уменьшается). При изменении ξ изменяется вторичное напряжение \underline{U}_2 :

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_{2\alpha} + \underline{U}_{2\beta} = \underline{U}_1(k_{21\alpha} + \xi k_{21\beta})/(1 + \xi).$$

При $\xi = 0$ получаем $\underline{U}_2 = k_{21\alpha}\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2 = k_{21\beta}\underline{U}_1$ при $\xi = \infty$.

Практически напряжение плавно регулируется в более узких, но достаточно больших пределах.

18.6. «Пик-трансформаторы»

Такие трансформаторы применяются в электронной технике для получения периодических импульсов напряжения пикообразной (заострённой) формы, длительность которых мала по сравнению с периодом процесса. В разд. 13.3, с. 237, сл., было показано, что при уплощении линии изменения магнитного потока в сердечнике форма ЭДС заостряется.

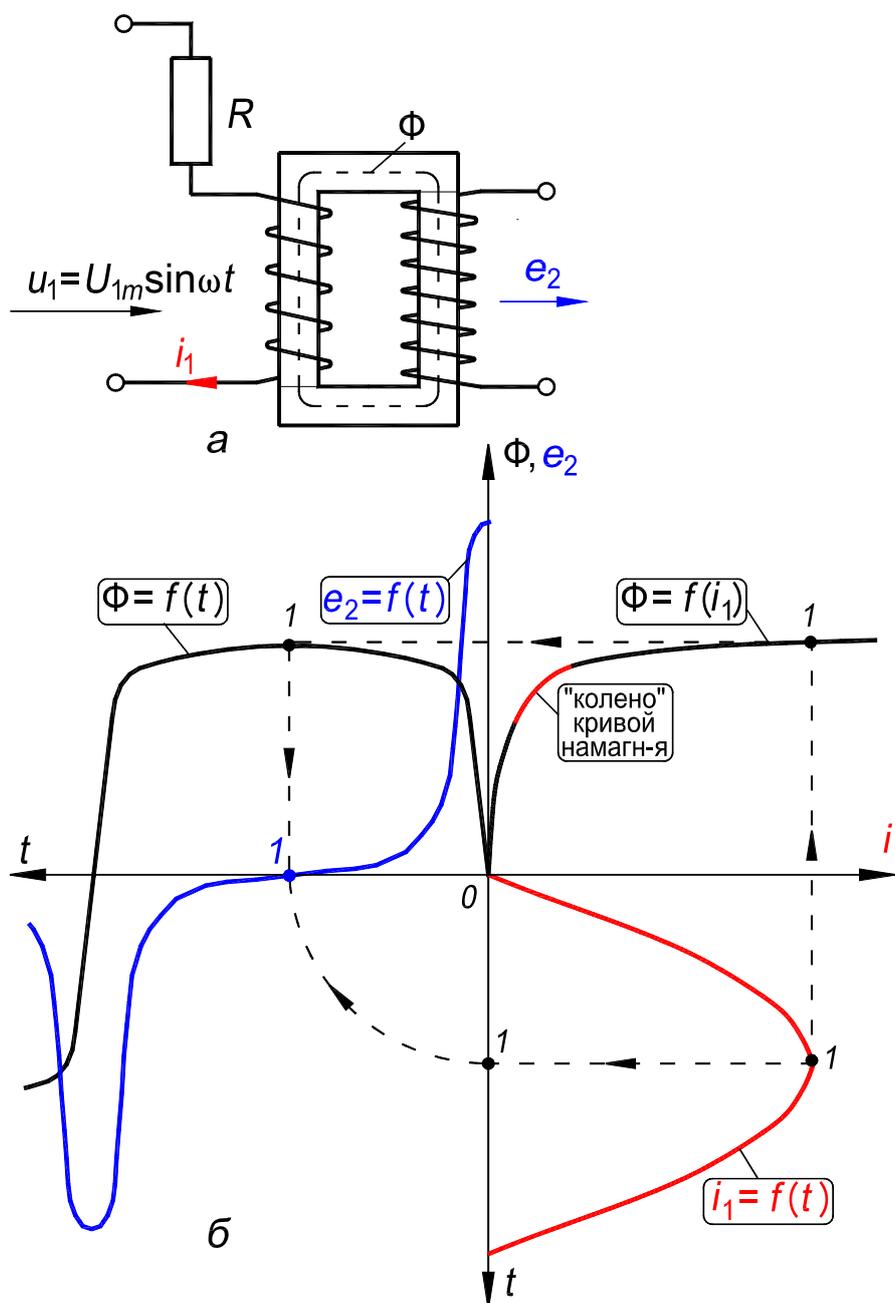


Рис. 18.13. «Пик-трансформатор»: а – схема, б – изменение тока i_1 , потока Φ и ЭДС e

Напряжение такой формы может быть получено на вторичной обмотке трансформатора с сильно насыщенным магнитопроводом, если включить первичную обмотку в сеть с синусоидально изменяющимся напряжением $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ через большое активное R или линейное индуктивное сопротивление. В этом случае первичный ток i_1 , будет синусоидален, поток уплощен, а ЭДС пикообразно заострена (тот же эффект в менее резко выраженной форме получается в трехфазных трансформаторах при соединении Y/Y , см разд. 13.3 и рис. 13.9, с. 237).

На рис. 18.13 показано возможное исполнение такого трансформатора. Трансформатор имеет сильно насыщенную магнитную систему и подключается к источнику с синусоидальным напряжением u_1 через большое активное R . При холостом ходе ток $i_1 = f(t)$ в первичной обмотке будет близок к синусоидальному, а магнитный поток $\Phi = f(t)$ – сильно уплощённой формы. При этих условиях ЭДС e_2 в обмотках будет иметь заостренную форму, $e_2 = f(t)$. На рис. 18.13 показано построение точки I этой зависимости.

Когда магнитопровод насыщен (за «коленом» кривой намагничивания, рис. В.53, 106), поток Φ почти не изменяется и напряжение $U_2 = 0$, $e_2 = -w_2 d\Phi/dt \approx 0$; при быстром изменении потока Φ на вторичной обмотке наводятся пики напряжения (см. рис. 18.13).

Другими словами, при быстром изменении потока Φ от положительного значения до отрицательного, или, наоборот, во вторичной обмотке наводится ЭДС e_2 почти треугольной формы, а в остальное время она близка к нулю. Максимум вторичной ЭДС совпадает с прохождением потока Φ через нуль (рис. 18.13,б).

18.7. Реакторы и реактивные катушки

А. Реакторы со стальным сердечником и воздушными зазорами. Реакторы со стальным сердечником в сущности не являются трансформаторами, однако по своему устройству аналогичны им. Они имеют только одну обмотку и применяются в электрических цепях в качестве токоограничивающих индуктивных сопротивлений и потребителей реактивной мощности. При больших мощностях такие реактивные катушки принято называть реакторами [6, 7].

Можно представить себе, что реактивная катушка получается в результате удаления из трансформатора вторичной обмотки. При этом реактивная катушка работает как трансформатор на холостом ходу. Однако такая катушка будет иметь относительно малую мощность $S = mUI$, так как ток холостого хода трансформатора мал. При этом материалы катушки будут в значительной степени недоиспользованы, а, кроме того, индуктивность катушки будет непостоянна и при синусоидальном напряжении ток не будет синусоидальным. Лучшие результаты получаются, если в магнитной цепи выполнить немагнитные зазоры δ в виде прокладок из изоляционного материала (рис. 18.14). Тогда ток и мощность катушки увеличатся, а нелинейность магнитной характеристики сердечника теряет значение, так как магнитное сопротивление такого сердечника определяется главным образом сопротивлением зазоров. Вместо одного зазора обычно выполняют ряд зазоров меньшей величины, чтобы не допустить сильного «выпучивания» магнитного поля из области сердечника в окружающее пространство.

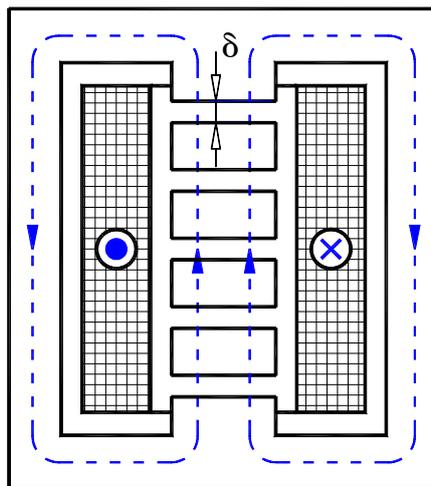


Рис. 18.14. Устройство однофазного реактора со стальным сердечником и воздушными зазорами δ

Реакторы и реактивные катушки выполняются как однофазными, так и трехфазными. В некоторых случаях они изготавливаются с регулируемым индуктивным сопротивлением. Это достигается изменением числа витков или изменением величины воздушных зазоров путем осевого перемещения частей сердечников. Применяются также реактивные катушки с подмагничиванием сердечника постоянным током [6, 7]. В этом случае сердечники выполняются без зазоров. Одной из разновидностей являются управляемые реакторы с вращающимся (УРВ) магнитным полем, а также управляемые реакторы с пульсирующим магнитным, реализованные на магнитопроводах трансформаторного типа.

Б. Управляемые реакторы с вращающимся (УРВ) магнитным полем.

Реактор с вращающимся полем – это статическое устройство, изготавливаемое на основе магнитопровода электрических машин переменного тока общепромышленного назначения. Реактор отличают компактность и простота конструкции при многофазном исполнении, отсутствие взаимоиндуктивных связей между обмотками, повышенное быстродействие, симметричность и синусоидальность рабочего тока (достигается мерами, общепринятыми в электромашиностроении) [7, с. 75 – 83].

Активная часть УРВ подобна таковой у асинхронного электродвигателя, однако функциональное назначение УРВ – регулирование диапазона потребляемой им реактивной мощности – обуславливает и отличие, а именно в УРВ воздушный зазор между статором и ротором уменьшен до возможного технологического минимума, так как внутренний сердечник (он называется по аналогии ротором) неподвижен. В пазах магнитопровода расположены трехфазная пространственно-распределенная рабочая обмотка (РО) с числом пар полюсов p_1 и одна или две торoidalные обмотки подмагничивания. Одна из них (ОП1) охватывает поперечное сечение ярма статора, другая (ОП2) – поперечное сечение ярма ротора (рис. 18.15).

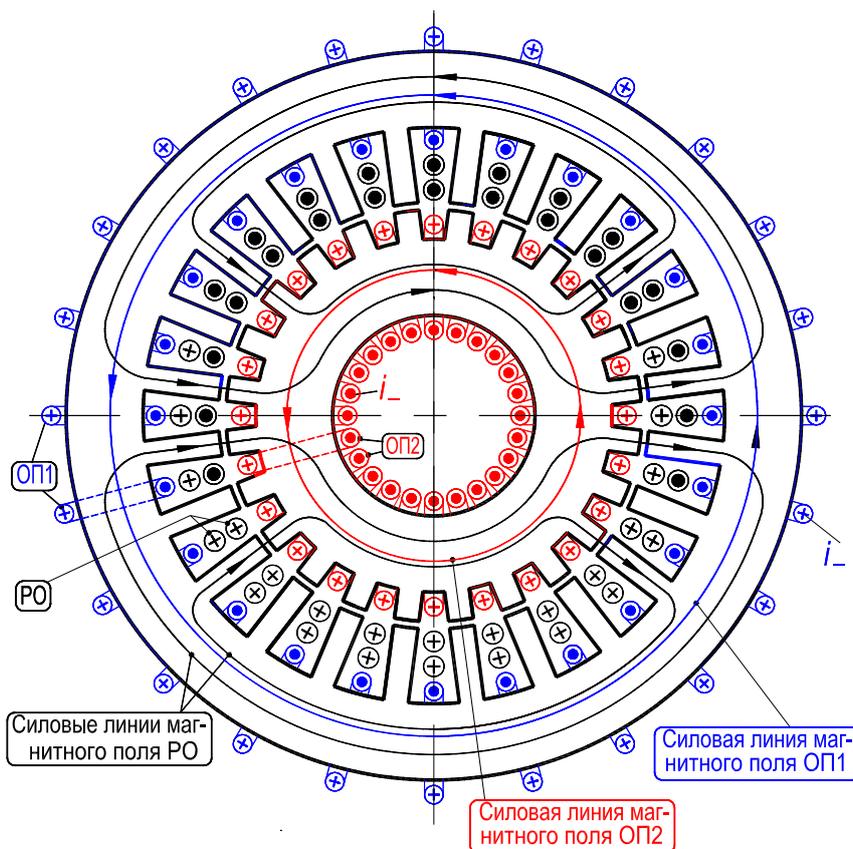


Рис. 18.15. Поперечная магнитная цепь управляемого реактора с вращающимся магнитным полем (изображение схематическое):
РО - рабочая обмотка; ОП1 – обмотка подмагничивания на внешнем ярме;
ОП2 - обмотка подмагничивания на внутреннем ярме

Рабочую трехфазную обмотку УРВ выполняют на напряжение не большее «генераторного», поэтому предпочтительнее использовать УРВ в распределительных электросетях и в системах электроснабжения промышленных предприятий, так как в этом случае реактор подключается непосредственно, без промежуточного трансформатора. Реактор используют в качестве регулирующего элемента в схеме статического компенсатора реактивной мощности, в схеме параметрического стабилизатора напряжения (в этом случае обмотка подмагничивания не нужна, и устройство работает в режиме насыщающегося реактора) и др. [7, с. 24 – 38].

Создание периодического пространственно-временного спектра гармоник насыщения магнитного поля и возможность активного влияния на его состав изменением схем пространственно-распределенных обмоток с различными числами пар полюсов, скоростями и направлениями вращения МДС, а также изменением соотношений поперечных геометрических размеров – специфические особенности управляемых реакторов с вращающимся магнитным полем. Эти свойства позволяют органично реализовать в УРВ различные режимы намагничивания: вынужденное намагничивание (ВН), самоподмагничивание и свободное намагничивание по 2-й гармонике поля (СП2) и (СН2), симметричное намагничивание (СН). Эти режимы отличаются различными проявлениями гармоник насыщения вращающегося магнитного поля от которых зависят технико-экономические показатели УРВ [7, с. 40 – 47].

Под режимом вынужденного намагничивания (ВН) по высшим гармоникам насыщения магнитного поля принято считать такой режим, когда данные гармоники проявляются в индукции магнитного поля, а в напряженности они практически отсутствуют.

Режим ВН реализуется в подмагниченном УР в том случае, если нет замкнутых электрических контуров, отфильтровывающих гармоники насыщения из магнитного потока. Если имеются замкнутые контуры, например, образованные параллельными ветвями трехфазной обмотки, то в них может протекать ток, обусловленный высшими гармониками магнитного потока. В соответствии с законом полного тока наличие высших гармоник в токе равнозначно появлению одноименных гармоник в напряженности поля (если в обмотке нет явно выраженных замкнутых контуров, то и тогда высшие гармоники магнитного поля проявляются не только в индукции,

но и в напряженности). Объясняется это тем, что каждая высшая гармоника магнитного потока обуславливает соответствующую гармонику вихревого тока, протекающего в магнитопроводе. Учитывая, что для уменьшения вихревых токов принимаются меры, общепринятые в практике электромашиностроения, можно пренебречь высшими гармониками напряженности, вызванными гармониками вихревого тока. Очевидно, что данное определение режима вынужденного намагничивания может распространяться на любые генерированные высшие четные и нечетные гармоники насыщения магнитного поля, но оно несправедливо для основной энергонесущей гармоники поля, всегда реально существующей и в индукции, и в напряженности.

Режим свободного намагничивания по высшим гармоникам насыщения – это такой режим, когда данные гармоники проявляются в напряженности магнитного поля, а в магнитной индукции они отсутствуют. Режим в управляемом реакторе возможен в том случае, если в обмотке имеются короткозамкнутые контуры, отфильтровывающие высшую гармонику из магнитного потока, причем, активное сопротивление контура равно нулю (последнее условие не выполняется полностью, поэтому гармоника, отфильтрованная короткозамкнутым контуром из магнитного потока, имеет место главным образом в напряженности и частично проявляется в индукции). Вместе с тем, активное сопротивление короткозамкнутого контура невелико и без большого ущерба для результатов анализа им можно пренебречь [7, с. 83 – 89].

В режиме самоподмагничивания по 2-й гармонике насыщения магнитного поля мощность ее посредством выпрямителя преобразуется в мощность, используемую для питания одной из обмоток подмагничивания реактора [7, с. 94 – 96].

Режимом симметричного намагничивания называется такой режим, когда при подмагничивании магнитопровода четные гармоники насыщения не проявляются ни в индукции, ни в напряженности магнитного поля. В режиме симметричного намагничивания периодические кривые распределения магнитного поля в пространстве и во времени остаются симметричными относительно оси абсцисс [7, с. 89 – 93]. На рис. 18.16 и 18.17 представлены экспериментальные модели УРВ в режиме симметричного намагничивания.

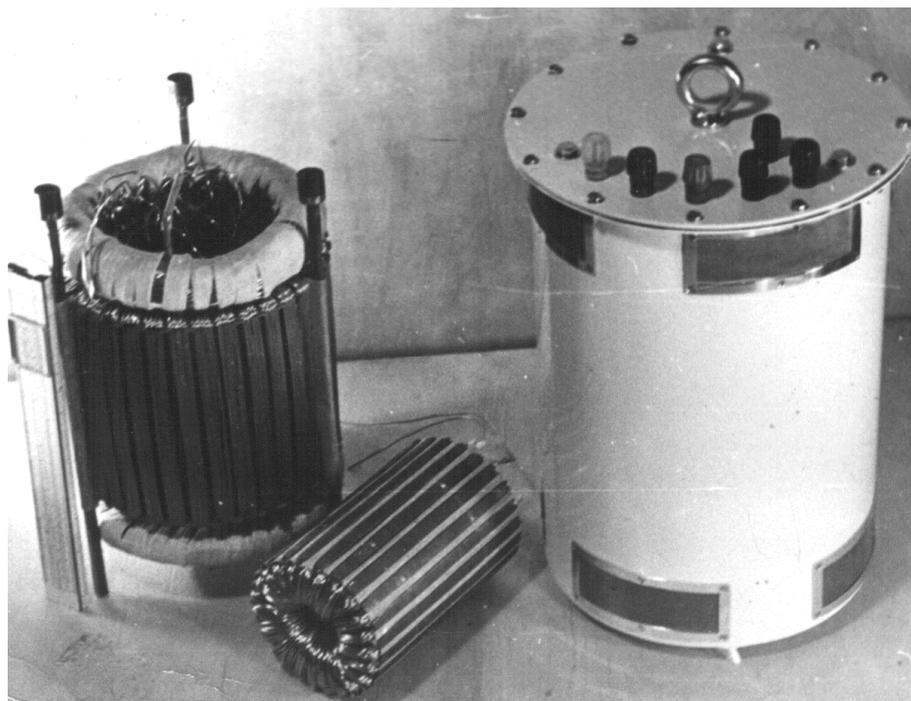


Рис. 18.16. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем:
режим намагничивания – симметричный;
экспонировался на ВДНХ РФ, отмечен бронзовой медалью

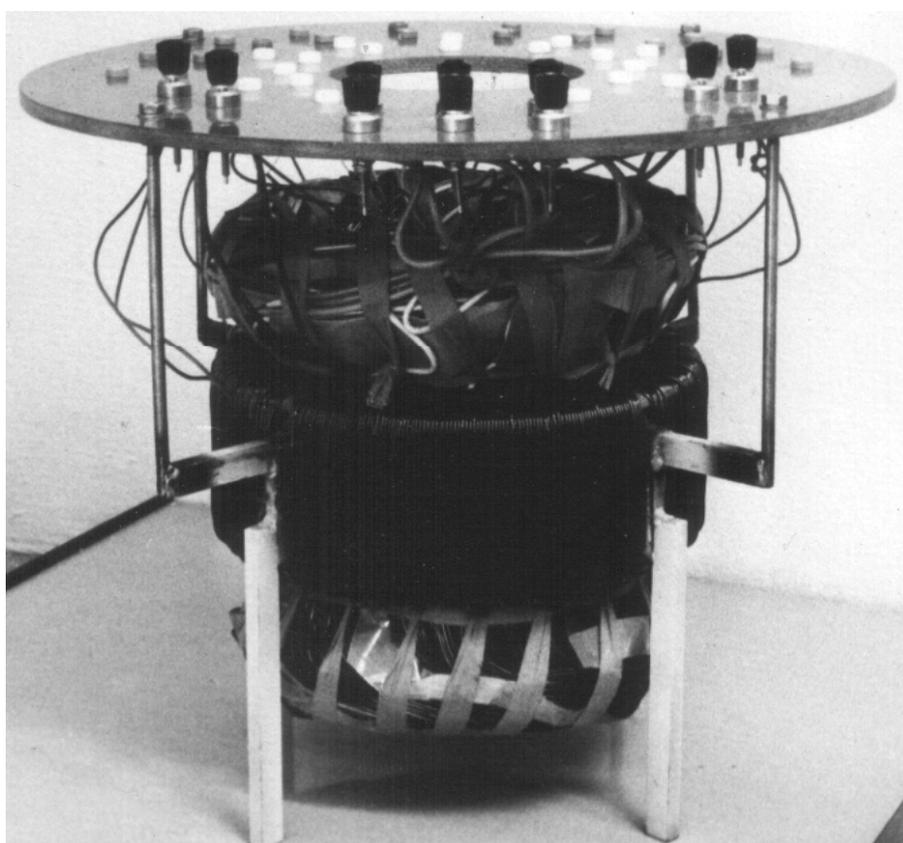


Рис. 18.17. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем:
предназначен для экспериментального исследования
пространственно-временного спектра поля

Результаты экспериментального исследования управляемых реакторов с вращающимся полем приведены в монографии [7, с. 306 – 318].

Характер изменения определенной на основе эксперимента (рис. 18.17), зависимости второй и третьей гармоник ЭДС от величины первой гармоники ЭДС (действующие значения), представлен на рис. 18.18.

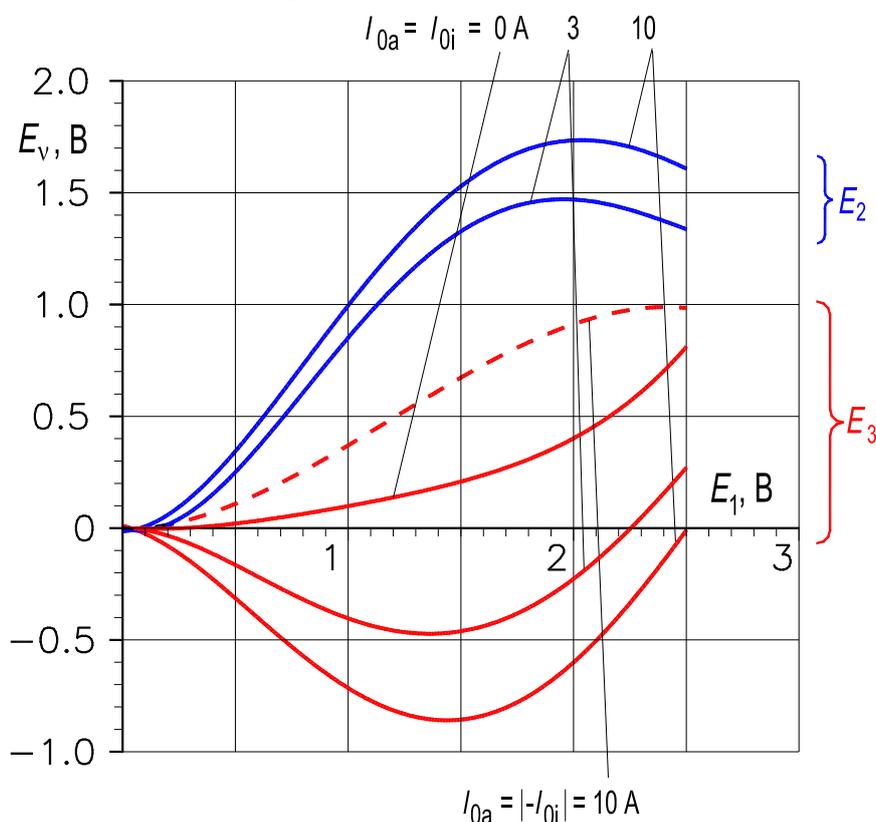


Рис. 18.18. Зависимость действующих значений 2 и 3-й гармоник ЭДС от 1-й гармоники ЭДС в режимах намагничивания:
вынужденное (сплошные линии), симметричное (пунктирные)

Из рис. 18.18 следует, что третья гармоника ЭДС (индукции) в режиме СН по сравнению с режимом х. х. имеет большие значения при любых $E_1 (B_1)$. В режиме ВН третья гармоника по сравнению с режимом х. х. изменяется не только по величине, но и меняет свою фазу на противоположную. Вторая гармоника ЭДС (индукции) в режиме ВН при определенных значениях $E_1 (B_1)$ имеет максимальное значение, а в режиме СН она равна нулю.

Вольт-амперные характеристики $U_{1\phi} = f(I_{1\phi})$ для режимов ВН, СН2 и СН показаны на рис. 18.19. Из анализа следует, что в режимах СН2 и СН по сравнению с режимом ВН увеличивается диапазон регулирования рабочего тока. В зоне, соответствующей колену кривой намагничивания, это увеличение составляет примерно 10 – 20 %.

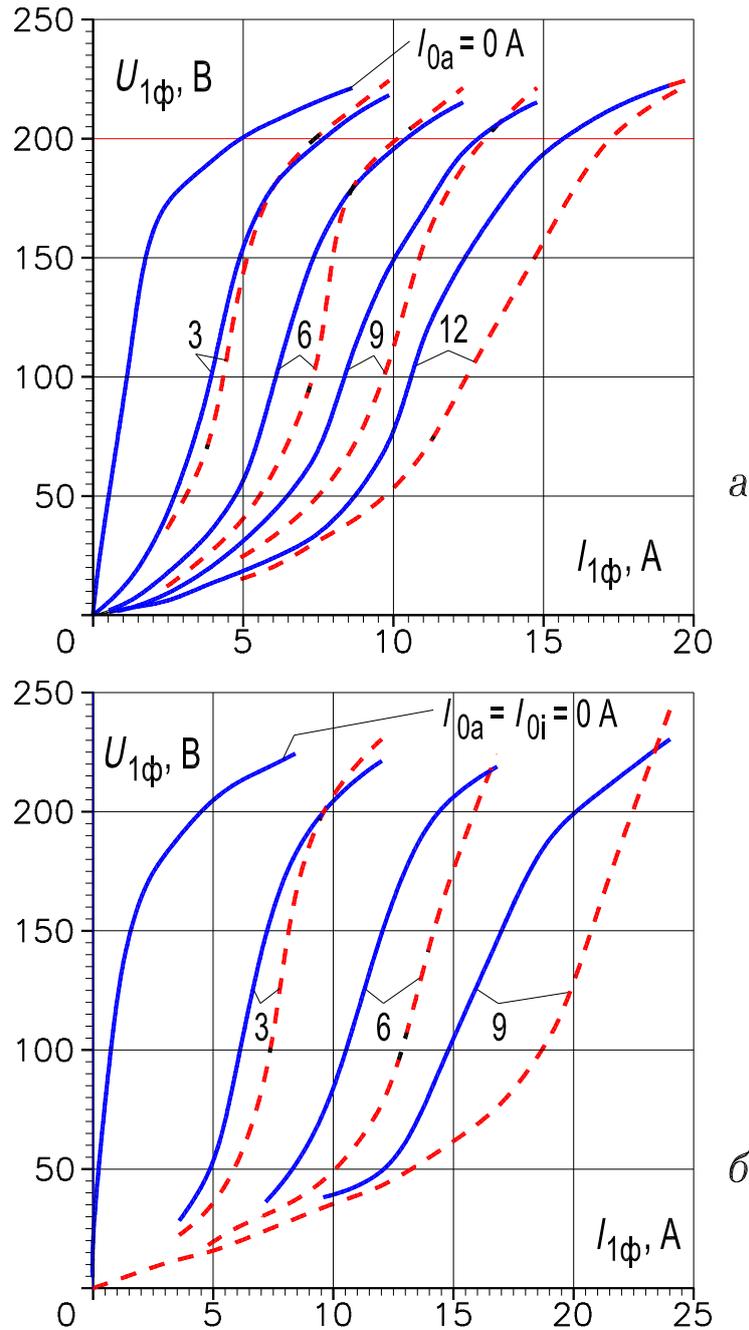


Рис. 18.19. Вольт-амперные характеристики реактора:

a – подмагничивается внешнее ярмо ОП1, режим СН2 – пунктирные линии;
б – подмагничиваются оба ярма ОП1 и ОП2, режим СН – пунктирные линии;
 режим ВН – сплошные линии

В. Управляемые реакторы и умножители частоты с пульсирующим магнитным полем рассмотрены в Прил. 4. Трансформаторы специального назначения (с. 490,сл.).

18.8. Трансформатор с вращающимся полем для преобразования числа фаз или частоты

Асинхронная машина с неподвижным ротором может быть применена для преобразования числа фаз или частоты. В этом случае поворачивать ротор относительно статора не требуется. Поэтому зазор, исключая механическое соприкосновение ротора и статора, можно не предусматривать и в целях уменьшения намагничивающего тока напрессовать внешний магнитопровод 4 на внутренний 3 (рис. 18.20). Взаимно неподвижные обмотки, первичную 1 и вторичную 2, для уменьшения рассеяния можно расположить в пазах одного из магнитопроводов (например, внутреннего 3), а другой магнитопровод (внешний 4) выполнить без пазов в виде гладкого кольца, которое напрессовывается на внутренний магнитопровод после укладки обмоток. Первичная обмотка 1 трансформатора с вращающимся полем ничем не отличается от обмотки статора асинхронной машины и представляет собой разноименнополюсную обмотку с числом периодов p_1 , числом фаз $m_1 = 3$ и числом витков в фазах w_1 . Первичная обмотка присоединяется к сети переменного тока с фазным напряжением U_1 частоты f_1 и образует вращающееся поле с числом пар полюсов p_1 , линии которого показаны на рис. 18.15. Это поле вращается с угловой скоростью $\Omega_1 = 2\pi f_1/p_1$. Устройство вторичной обмотки зависит от назначения трансформатора.

А. Трансформатор для преобразования числа фаз. В этом устройстве вторичная обмотка выполняется на то же число пар полюсов, что и первичная ($p_2 = p_1$), и отличается от нее только числом фаз m_2 и числом витков в фазах w_2 . В фазах вторичной обмотки индуцируется симметричная m_2 -фазная система ЭДС

$$E_2 = E_1 \cdot w_2 k_{o2} / w_1 k_{o1}.$$

Сдвиг между ЭДС E_2 и E_1 , зависит от взаимного расположения осей фаз в пазах магнитопровода. При холостом ходе $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$; $\underline{U}_2 = \underline{E}_2$.

Б. Трансформаторы для преобразования частоты. В этих устройствах используется эффект искажения синусоидальности распределения индукции вращающегося поля вследствие насыщения магнитопровода. Насыщение зубцов в зоне большой МДС приводит к «уплощению» кривой индукции вращающегося поля и к появлению при разложении в ряд Фурье наряду с основной гармонической с числом пар полюсов p_1 , ряда высших нечетных гармонических,

имеющих числа пар полюсов $3p_1, 5p_1, 7p_1$ и т. д. [2, с. 132,сл.]. Для усиления этого эффекта трансформатор для преобразования частоты проектируется с сильно насыщенной магнитной системой (с максимальными индукциями в зубцах более 2 Тл) и снабжается вторичной обмоткой, рассчитанной на восприятие одной из высших гармонических вращающегося поля, обычно третьей.

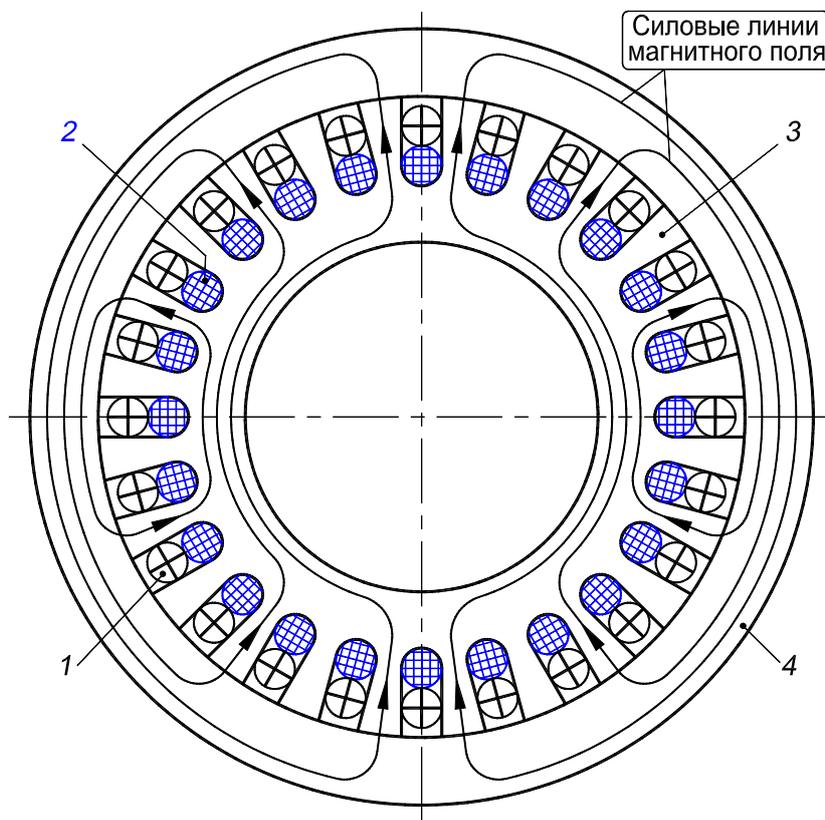


Рис. 18.20. Трансформатор с вращающимся полем

В последнем случае трансформатор позволяет получить утроение частоты. Такой трансформатор выполняется с трехфазной обмоткой ($m_1 = 3$), которая образует p_1 -периодное «уплощенное» поле, вращающееся с угловой скоростью $\Omega_1 = 2\pi f_1/p_1$. Так как форма поля при перемещении не изменяется, все его гармонические составляющие вращаются с той же угловой скоростью Ω_1 . Для получения напряжения утроенной частоты вторичная обмотка выполняется трёхфазной ($m_2 = 3$) с числом пар полюсов $p_2 = 3p_1$. В такой обмотке будет индуцироваться в основном только третья гармоническая ЭДС «уплощенного» поля с числом периодов $3p_1$, по отношению к которой вторичная обмотка обладает обмоточным коэффициентом, близким к единице. Частота этой ЭДС

$$f_2 = p_2\Omega_1/2\pi = 3f_1$$

получается утроенной по сравнению с частотой первичной обмотки.

Потокосцепление вторичной обмотки с основной гармонической индукции, а также с высшими гармоническими индукции $5p_1, 7p_1, 11p_1$ и т. д., порядок которых не кратен трем, оказывается практически равным нулю, и эти гармонические не индуцируют результирующей ЭДС во вторичной обмотке.

В целях предотвращения появления ЭДС и токов тройной частоты в первичной обмотке эта обмотка выполняется с укорочением шага на $1/3$ полюсного деления. При этом ее обмоточный коэффициент по отношению к полю с числом периодов $p_2 = 3p_1$, обращается в нуль.

Для получения удвоения частоты магнитопровод необходимо подмагнитить постоянным магнитным полем. С этой целью, например, вокруг ярма магнитопровода через пазы выполняется тороидальная кольцевая обмотка постоянного тока (см. рис. 18.15, 18.16 и 18.17). При подмагничивании в магнитном поле появляются чётные гармоники, причём у второй гармоники с числом пар полюсов $p_2 = 2p_1$, амплитуда будет большей. Четные гармоники также, как и рассмотренные выше нечётные гармоники вращаются с одной и той же скоростью основной гармоники. Во вторичной обмотке удвоителя частоты, имеющей число пар полюсов $p_2 = 2p_1$, будет индуцироваться ЭДС удвоенной частоты по сравнению с частотой первичной обмотки.

Работы по созданию теории и практики статических устройств: с вращающимся полем, выполненных на базе магнитопроводов по типу электрических машин; а также с пульсирующим полем, выполненных на базе магнитопроводов трансформаторного типа с пространственным расположением стержней, проводились на кафедре электрических машин Кишинёвского политехнического института имени С. Лазо в период с 1964 по 1995 гг.

18.9. Трансформаторы для специальных целей

А. Печные трансформаторы. В электрометаллургии широко применяются печные трансформаторы. Они строятся на мощности порядка десятков тысяч киловольт-ампер и относительно низкие вторичные напряжения – порядка 100 – 200 В, соответственно, чему вторичные токи достигают 100 кА и более.

Б. Испытательные трансформаторы. Они используются при испытании электрических машин, аппаратов и электротехнических материалов. Выполняются на мощности 1000 кВ·А и напряжения 1000 кВ и более в виде каскада из двух или трех последовательно соединённых трансформаторов [11].

19. Номинальные данные и устройство исследуемого трансформатора

Полная мощность, на которую рассчитан трансформатор, называется *номинальной*. Все другие величины, которые характеризуют его работу при этой мощности, также называются номинальными. *Основные* номинальные величины указываются в паспортной табличке (на щитке). Силовые масляные трансформаторы обычно имеют щитки со следующими данными:

- 1) мощность трансформатора, выраженная в вольт-амперах (В·А) или киловольт-амперах (кВ·А);
- 2) междуфазные (линейные) напряжения каждой обмотки в вольтах (В) или киловольтах (кВ) на основных выводах и ответвлениях;
- 3) линейные токи в амперах (А) при номинальной мощности;
- 4) частота;
- 5) число фаз;
- 6) схема и группа соединения обмоток;
- 7) напряжение короткого замыкания, характеризующее падение напряжения в обмотках;
- 8) режим работы, указывающий, рассчитан ли трансформатор в отношении нагрева на длительную или кратковременную работу при номинальной мощности;
- 9) способ охлаждения.

Кроме того, на щитке указываются данные, необходимые для монтажа и эксплуатации трансформатора: полная масса трансформатора; масса масла; масса «выемной» (активной) части трансформатора, а также тип трансформатора, название завода-изготовителя, год выпуска и др.

К нормируемым параметрам трансформатора относятся: потери холостого хода, ток холостого хода, потери короткого замыкания и др.

Далее приводятся описание устройства и номинальные данные трехфазного трансформатора типа ТС-2,5/0,269. Этот трансформатор исследуется в лабораторных работах цикла «Трансформаторы».

Краткое описание устройства. Активная часть трансформатора состоит из трехстержневого планарного шихтованного магнитопровода, двух concentрических обмоток – первичной и вторичной, и системы креплений. Число последовательно соединенных витков в фазе первичной обмотки $W_1 = 240$. Каждая фаза вторичной обмотки разделена на две части (с одинаковыми числами витков

$W_2/2 = 147$). Эта обмотка может быть соединена по схеме Y , D или Z . Обмотки выполнены медным эмалированным проводом марки ПЭТВ. Диаметр провода первичной обмотки 2,12 мм, вторичной – 1,5 мм. В трансформаторе имеется добавочная трехфазная обмотка ($W_{дб} = 10$; 2,12 мм). Магнитопровод изготовлен из тонколистовой электротехнической стали. Охлаждение трансформатора – естественное воздушное при открытом исполнении.

Таблица 19.1. Номинальные данные трехфазного трансформатора типа ТС-2,5/0,269

(Этот трансформатор исследуется в лабораторных работах №№ 1, 2, 3 и 4)

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$S_{НОМ}$	2,5	кВ·А
Первичное напряжение	$U_{1л}$	220	В
Вторичное напряжение	$U_{2л}$	269	В
Линейный ток первичной обмотки	$I_{1л}$	6,5	А
Линейный ток вторичной обмотки	$I_{2л}$	5,4	А
Частота	f	50	Гц
Число фаз	m	3	–
Схема соединения обмоток	$Y/Y (Y/Z)$	–	–
Способ охлаждения	<i>Естественное воздушное при открытом исполнении</i>		
Характер нагрузки	<i>Длительная непрерывная</i>		
Напряжение короткого замыкания*	u_k	13	В
		5,9	%
Ток холостого хода**	i_x	0,69	А
		10,6	%

* Напряжение короткого замыкания выражается в процентах от номинального первичного напряжения $U_{1л}$.

** Ток холостого хода выражается в процентах от номинального первичного тока $I_{1л}$.

20. РАБОТА №1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Оглавление

1. Цель работы	355
2. Программа работы	355
3. Основы теории	356
4. Экспериментальное исследование	357
4.1. Опыт холостого хода	357
4.2. Опыт короткого замыкания	361
4.3. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика	364
4.4. Расчет внешних характеристик	366
4.5. Расчет зависимости КПД от коэффициента нагрузки	367
4.6. Определение максимального значения КПД η_{\max} из решения уравнения $d\eta/d\beta = 0$	369
5. Содержание и оформление отчета	370
6. Контрольные вопросы	371
Перечень рисунков в 20-м разделе	354
Перечень таблиц в 19- и 20-м разделах	354

Перечень рисунков в 20-м разделе

Рис. 20.1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора: а – в режиме холостого хода; б – в режиме короткого замыкания; в – в режиме нагрузки	358
---	-----

Перечень таблиц в 19- и 20-м разделах

Табл. 19.1. Номинальные данные трехфазного трансформатора типа ТС-2,5/0,269 (этот трансформатор исследуется в лабораторном цикле)	352
Табл. 20.1. Измерение и расчёт характеристик холостого хода	359
Табл. 20.2. Измерение и расчёт характеристик короткого замыкания	362
Табл. 20.3. Измерение внешней характеристики	365
Табл. 20.4. Расчёт внешней характеристики	367
Табл. 20.5. Расчёт коэффициента полезного действия	368
Табл. 20.6. Значения максимального КПД трансформатора, определённые графически ..	368
Табл. 20.7. Расчётные значения максимального КПД трансформатора	369

1. Цель работы

Ознакомиться с устройством, принципом действия и назначением трансформатора; освоить практические методы проведения опытов холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой, а также использования опытных данных для получения параметров трансформатора и основных характеристик.

2. Программа работы

2.1. Ознакомиться с устройством испытуемого трансформатора и записать его паспортные данные.

2.2. Определить коэффициент трансформации.

2.3. Провести опыт холостого хода ($I_2 = 0$) и построить зависимости $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$.

2.4. Провести опыт короткого замыкания ($U_2 = 0$) и построить зависимости

$$I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k).$$

2.5. Провести опыт нагрузки трансформатора и построить внешнюю характеристику

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } \cos \varphi_2 = 1,0.$$

2.6. На основании данных опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры Т-образной схемы замещения трансформатора.

2.7. Определить напряжение короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие.

2.8. Рассчитать и построить внешние характеристики трансформатора при активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1,0$), активно-индуктивной ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = +0,6$) и активно-емкостной ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = -0,6$). Сравнить расчетную характеристику при $\cos \varphi_2 = 1,0$ с опытной (см. п. 2.5).

2.9. Рассчитать и построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки $\eta = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 1,0$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$. Определить нагрузку, соответствующую максимальному значению КПД.

3. Основы теории

Основы теории трансформатора в соответствии с которыми осуществляется экспериментальное исследование трансформатора изложены в разделах:

12. Режим холостого хода однофазного трансформатора, с. 216,сл.
13. Магнитные системы и способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов. Холостой ход трехфазного трансформатора, с. 226,сл.
14. Короткое замыкание трансформатора, с. 242,сл.
15. Работа трансформатора под нагрузкой, с. 258,сл.

4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке в состав которой входят: исследуемый трёхфазный трёхстержневой трансформатор I, источник регулируемого напряжения – автотрансформатор TV (см. с. 335) и нагрузочный реостат $RR_{нг}$ (см. фотографии установки на рис. П1, П2, П3, с. 25, 26).

Схемы включения трансформатора для исследования в режимах: холостого хода, короткого замыкания и активной нагрузки приведены соответственно на рис. 20.1, *а, б, в*. Фазы первичной обмотки (также как и фазы вторичной обмотки) соединены по схеме «звезда» (Y).

Описание устройства исследуемого трансформатора и значения его номинальных данных – см. разд. 19, с. 351, 352.

Записать номинальные данные исследуемого трансформатора и определить его первичный номинальный ток $I_{1ном}$ (термин 63 на с. 147).

4.1. Опыт холостого хода (см. разд. 12 и 13, с. 216, сл.)

1. Собрать схему для испытания трансформатора в режиме холостого хода, рис. 20.1, *а*. В опыте вторичная обмотка разомкнута, $I_2 = 0$. В схему включить амперметры $PA1$, $PA2$ и $PA3$ с пределом измерения 1 А, так как ток холостого хода исследуемого трансформатора $I_x < 1$ А (в общем случае ток холостого хода силового трансформатора составляет 1 – 3 % от номинального значения тока $I_{1ном}$). Значение тока холостого хода трансформатора задаётся ГОСТ.

На ваттметрах $PW1$ и $PW2$ выставить максимальные значения первичных напряжения и тока: $U_{max} = 150$ В, $I_{max} = 2,5$ А.

2. Установить рукоятку автотрансформатора TV в положение, соответствующее его выходному напряжению $U \approx 0$ В.

3. Включить автомат QF , на схему подано напряжение $U_1 = U \approx 0$ В.

4. Изменять автотрансформатором TV напряжение U_1 , подводимое к первичной обмотке исследуемого трансформатор I в пределах $(0,3 - 1,25) \cdot U_{1ф.ном}$, т. е. (40 – 150) В, с шагом $\Delta U \approx 20$ В. При каждом фиксированном значении напряжения U_1 измерять величины напряжений (вольтметры $PV1$ и $PV2$), токов (амперметры $PA1$, $PA2$ и $PA3$) и мощностей (ваттметры $PW1$ и $PW2$).

Опытные данные (6 – 7 точек, причем одна из них должна соответствовать $U_{1x} = U_{1ф.ном} = 127$ В) записать в табл. 20.1.

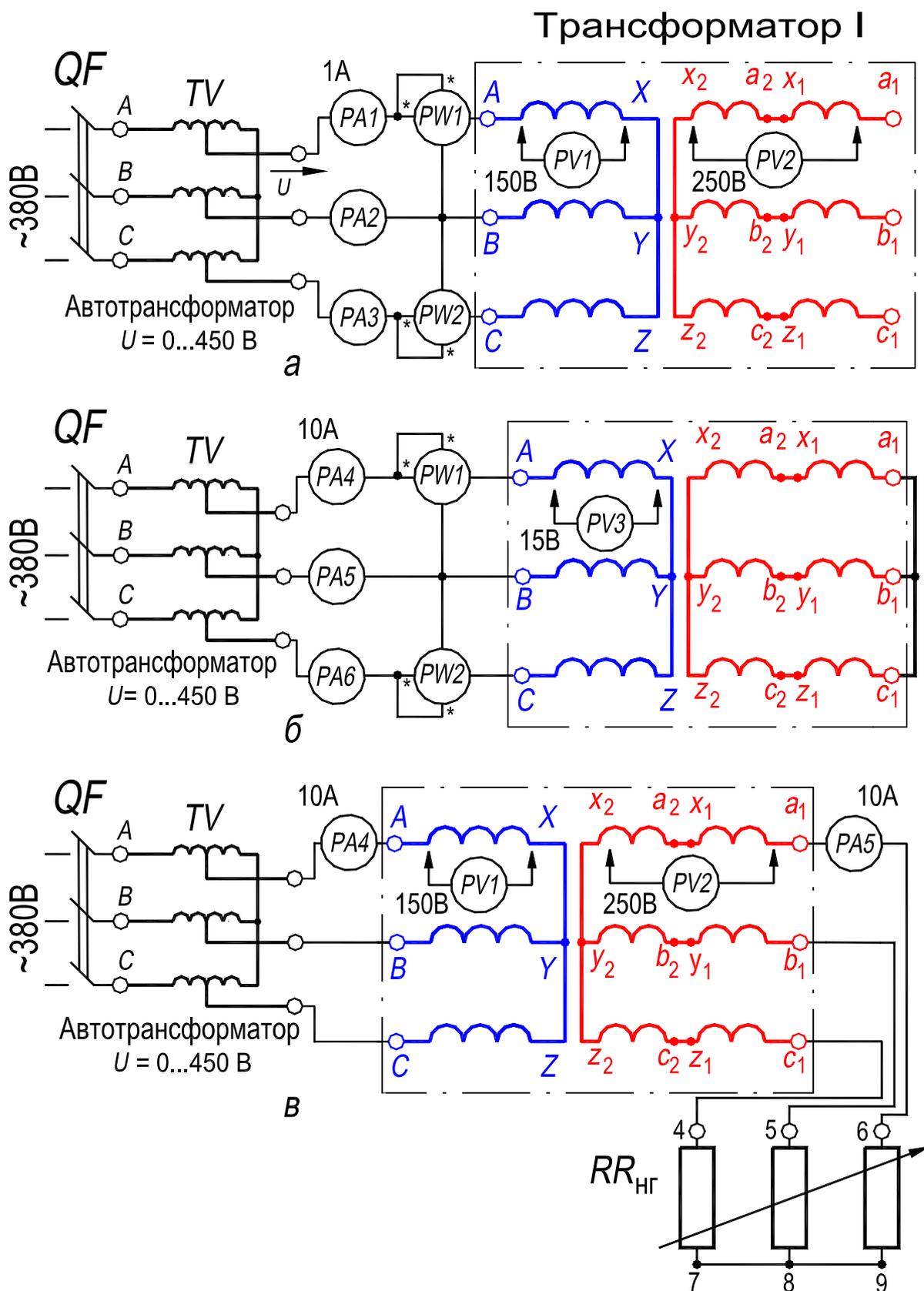


Рис. 20.1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора:

а – в режиме холостого хода; *б* – в режиме короткого замыкания;

в – в режиме нагрузки

3) коэффициент мощности трансформатора –
 $\cos \varphi_x = P_x / 3U_{1x}I_x = P_x / (P_x^2 + Q_x^2)^{1/2}$; с увеличением напряжения, подаваемого на первичную обмотку реактивная мощность Q_x , потребляемая трансформатором и затрачиваемая на создание магнитного поля, увеличивается существенно значительнее, чем активная мощность P_x , расходуемая на покрытие магнитных потерь;

4) коэффициент трансформации – $k = U_{2x} / U_{1x} = U_{вн} / U_{нн}$; исследуемый трансформатор является повышающим, так как при последовательном и согласном включении двух полуфаз вторичной обмотки по схеме «звезда» вторичное напряжение будет больше первичного /полуфазы предназначены для реализации схемы «зигзаг» (Z)/.

Расчёт параметров Т-образной схемы замещения трансформатора
 (см. разд. 14.5, с. 250, сл.)

По данным опыта холостого хода определить значения сопротивлений намагничивающего контура трансформатора Z_m , R_m и X_m . Их необходимо считать *только для одного* значения напряжения $U_{1x} = U_{1ф.ном}$ по формулам:

$$Z_x = Z_1 + Z_m = U_{1ф.ном} / I_x \approx Z_m;$$

$$R_x = R_1 + R_m = P_x / 3I_x^2 \approx R_m;$$

$$X_m = (Z_m^2 - R_m^2)^{1/2}.$$

Собственными сопротивлениями первичной обмотки трансформатора Z_1 , R_1 и X_1 в данном случае пренебрегают.

Найденные значения сопротивлений Z_m , R_m и X_m занести в табл. 20.1.

По результатам опыта построить характеристики холостого хода трансформатора I_x , P_x , $\cos \varphi_x = f(U_x)$. Все три зависимости представить на одном графике. Графическую интерпретацию характеристик выполнить в интерактивном программном пакете.

В трансформаторе имеют место два вида потерь мощности:

- 1) электрические потери в обмотках, $p_{эл}$;
- 2) магнитные потери в магнитопроводе, $p_{мг}$.

Так как ток холостого хода трансформатора невелик, то электрическими

потерями в обмотках от этого тока пренебрегают. Поэтому принимается, что потери холостого хода трансформатора практически равны магнитным потерям, $p_x \approx p_{\text{мг}}$. В опыте холостого хода определяются магнитные потери в трансформаторе в том числе и при номинальном напряжении. Именно это значение магнитных потерь будет иметь место в трансформаторе при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной, так как трансформатор работает при номинальном первичном напряжении. Магнитные потери в трансформаторе при номинальном напряжении считаются практически постоянными $p_{\text{мг}} \approx \text{const}$.

4.2. Опыт короткого замыкания (см. разд. 14, с. 242, сл.)

1. Собрать схему для испытания трансформатора в режиме короткого замыкания, рис. 20.1,б. В опыте вторичная обмотка замкнута, $U_2 = 0$. Учитывая значение номинального тока первичной обмотки в схему включить амперметры $PA4$, $PA5$ и $PA6$ с пределом измерения 10 А.

На ваттметрах $PW1$ и $PW2$ выставить максимальные значения первичных напряжения и тока: $U_{\text{max}} = 30$ В, $I_{\text{max}} = 5$ А.

Для ограничения тока короткого замыкания к трансформатору подводить существенно пониженное напряжение $U_{1\text{к}} = (0,05 - 0,1) \cdot U_{1\text{ф.ном}}$. Ток короткого замыкания первичной обмотки $I_{1\text{к}}$ в опыте должен быть не больше $1,2 \cdot I_{1\text{ном}} \approx 8,5 - 9$ А.

2. Установить рукоятку автотрансформатора TV в положение, соответствующее его выходному напряжению $U = 0$ В.

3. Включить автомат QF , медленно и плавно поворачивая рукоятку автотрансформатора установить значение напряжения U_1 (см. вольтметр $PV3$, его показание $\sim 7,5 - 8$ В), соответствующее току $I_{1\text{к}} \approx 8,5 - 9$ А.

4. Уменьшать автотрансформатором TV напряжение $U_{1\text{к}}$, подводимое к первичной обмотке исследуемого трансформатор I с шагом $\Delta U \approx 2$ В. При каждом фиксированном значении напряжения $U_{1\text{к}}$ измерять величины напряжения (вольтметр $PV3$), токов (амперметры $PA4$, $PA5$ и $PA6$) и мощностей (ваттметры $PW1$ и $PW2$). При этом одному из значений $U_{1\text{к}}$ должно соответствовать значение тока $I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}}$.

Опытные данные (4 или 5 точек, причем одна из них должна соответствовать $I_{1к} = I_{1ном}$) записать в табл. 20.2.

Таблица 20.2. Измерение и расчёт характеристик короткого замыкания

Измеренные величины						Рассчитанные величины		
Фазное напряжение	Линейные (фазные) токи			Фазные мощности				
$U_{1к}$	$I_{Ак}$	$I_{Вк}$	$I_{Ск}$	$P_{Ак}$	$P_{Ск}$	$I_{к}$	$P_{к}$	$\cos \varphi_{к}$
В	А	А	А	Вт	Вт	А	Вт	–

→ Продолжение табл. 20.2

Расчет при $I_{1к} = I_{1ном}$								
$Z_{к}$	$R_{к}$	$X_{к}$	$Z_{к75}$	$R_{к75}$	$U_{к}$	$U_{к75}$	$U_{а75}$	$U_{р}$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	%	%	%	%

По данным измерений рассчитать величины и занести в табл. 20.2:

- 1) среднее арифметическое значение токов фаз – $I_{к} = (I_{Ак} + I_{Вк} + I_{Ск})/3$;
- 2) мощность, потребляемую трансформатором из сети при коротком замыкании – $P_{к} = C_w \cdot (P_{Ак} + P_{Ск})$, C_w – цена деления ваттметра,
 $C_w = U_{max} \cdot I_{max} / 150 = 30 \cdot 5 / 150 = 1$ Вт/дел;
- 3) коэффициент мощности трансформатора – $\cos \varphi_{к} = P_{к} / 3 U_{1к} I_{к}$; в связи со спецификой маломощного трансформатора, имеющего близкие значения первичного и вторичного напряжениями (и минимальный радиальный размер канала рассеяния между обмотками), а также в связи с погрешностями

измерений, расчётное значение $\cos \varphi_k$ может получиться несколько больше единицы (это ошибочное значение). Можно принять значение $\cos \varphi_k \approx 0,9$, причем по мере увеличения U_{1k} это значение $\cos \varphi_k$ будет незначительно уменьшаться. У силовых трансформаторов, выпускаемых промышленностью $\cos \varphi_k$ будет значительно меньше, причём его значение по мере увеличения напряжения U_{1k} будет также незначительно уменьшаться.

Так как к первичной обмотке в опыте короткого замыкания подводится существенно пониженное напряжение, составляющее 5 – 10 % от номинального напряжения $U_{1ном}$, то магнитная система трансформатора не насыщена, что соответствует начальной части кривой намагничивания. Поэтому магнитными потерями в опыте короткого замыкания можно пренебречь, $p_{мг} \approx 0$. Мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания расходуется на покрытие электрических потерь в обеих обмотках, $p_k \approx p_{эл1} + p_{эл2} = p_{эл}$.

По результатам опыта построить характеристики короткого замыкания трансформатора $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_{1k})$. Все три зависимости представить на одном графике. Графическую интерпретацию характеристик выполнить в интерактивном программном пакете.

Расчёт параметров Т-образной схемы замещения трансформатора
(см. разд. 14.5, с. 250, сл.)

Параметры схемы замещения трансформатора рассчитать только для номинального значения тока первичной обмотки, $I_{1k} = I_{1ном}$; значения параметров занести в продолжение табл. 20.2):

$$Z_k = Z_1 + Z_2' = U_{1k}/I_{1ном};$$

$$R_k = R_1 + R_2' = P_k/3(I_{1ном})^2;$$

$$X_k = X_1 + X_2' = (Z_k^2 - R_k^2)^{1/2}.$$

Напряжение короткого замыкания рассчитывают по формуле

$$u_{к\%} = 100U_{1k}/U_{1ф.ном} = 100I_{1ном}Z_k/U_{1ф.ном}.$$

Для Т-образной схемы замещения исследуемого трансформатора можно принять $R_1 \approx R_2' = R_k/2, X_1 \approx X_2' = X_k/2$.

Активное сопротивление R_k следует привести к расчетной рабочей температуре трансформатора, равной 75°C для трансформаторов с изоляцией классов A, E, B (разд. В11, Г, с. 117, сл.). С этой целью можно воспользоваться приближенной формулой $R_{k75} \approx 1,2 \cdot R_k$. Тогда, с учетом приведения, полное сопротивление двух обмоток $Z_{k75} = (R_{k75}^2 + X_{k2}^2)^{1/2}$, а напряжение короткого замыкания $u_{k75\%} = 100I_{1\text{ном}}Z_{k75}/U_{1\text{ф.ном}}$. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания будут соответственно равны:

$$u_{a75\%} = 100I_{1\text{ном}}R_{k75}/U_{1\text{ф.ном}};$$

$$u_{p\%} = 100I_{1\text{ном}}X_k/U_{1\text{ф.ном}}.$$

По значению напряжения короткого замыкания $U_{k\%}$ и его составляющих $U_{a\%}$ и $U_{p\%}$ можно судить о возможности параллельной работы трансформаторов, об изменении вторичного напряжения при изменении нагрузки, о величине установившегося тока трехфазного короткого замыкания на зажимах вторичной обмотки в условиях эксплуатации.

Проведение опытов холостого хода и короткого замыкания и получаемые результаты, имеют важное практическое значение.

1) из опыта холостого хода определено значение магнитных потерь $p_{\text{мг.ном}}$, соответствующих номинальному первичному напряжению $U_{1\text{ном}}$;

2) из опыта короткого замыкания определено значение электрических потерь $p_{\text{эл.ном}}$, соответствующих номинальному первичному току $I_{1\text{ном}}$;

3) по данным этих опытов можно рассчитать коэффициент полезного действия трансформатора η , не загружая трансформатор вплоть до номинальной нагрузки, что в условиях заводских испытаний не всегда представляется возможным (см. далее разд. 4.5);

4) из опыта короткого замыкания определены значения активной $u_{a75\%}$ и реактивной $u_{p\%}$ составляющих напряжения короткого замыкания; это позволяет рассчитать внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$, также не загружая трансформатор (см. далее разд. 4.4).

4.3. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика

(см. разд. 15, с. 258, сл.)

Внешняя характеристика трансформатора есть зависимость

$$U_2 = f(I_2), \text{ при } U_{1\text{ном}}, f_{1\text{ном}}.$$

1. Собрать схему для испытания трансформатора в режиме активной нагрузки, рис. 20.1,в. В опыте к вторичной обмотке подсоединена активная нагрузка $RR_{\text{нг}}$; $\cos \varphi_{\text{нг}} = 1.0$.

2. На ваттметрах $PW1$ и $PW2$ выставить максимальные значения первичных напряжения и тока: $U_{\text{max}} = 150 \text{ В}$, $I_{\text{max}} = 5 \text{ А}$.

3. Используя автотрансформатор TV , установить на первичной обмотке исследуемого трансформатора при отключенной нагрузке $RR_{\text{нг}}$ номинальное напряжение $U_{1\text{ф.ном}}$. В процессе опыта поддерживать неизменным первичное напряжение $U_1 = U_{1\text{ф.ном}} = \text{const}$.

По определению за вторичное номинальное напряжение $U_{2\text{ф.ном}}$ трансформатора принимается значение напряжения на зажимах вторичной обмотки *при холостом ходе* трансформатора и номинальных первичном напряжении и его частоте (термин 62, с. 147).

4) Подключить реостат $RR_{\text{нг}}$ к вторичной обмотке трансформатора. Вводить ступени реостата и на каждой ступени фиксировать значения напряжений (вольтметры $PV1$ и $PV2$) и токов (амперметры $PA4$ и $PA5$). Вторичный ток I_2 в процессе опыта изменять в пределах $(0 - 1,25) \cdot I_{2\text{.ном}} \approx 0 - 7,5 \text{ А}$.

Результаты опытов (5 или 6 точек) занести в табл. 20.3.

Таблица 20.3. Измерение внешней характеристики

$U_{1\text{ф.ном}}$	$U_{2\text{ф}}$	$I_{1\text{ф}}$	$I_{2\text{ф}}$	β
В	В	А	А	—

В табл. 20.3 коэффициент $\beta = I_{2\text{ф}}/I_{2\text{ф.ном}}$ – коэффициент нагрузки трансформатора, принимающий значения $\beta = 0 - 1,0$ при изменении нагрузки трансформатора соответственно от холостого хода до номинальной.

По результатам опыта построить внешнюю характеристику трансформатора $U_{2\phi} = f(\beta)$, при $U_{1\phi.\text{ном}}$ и $f_{1\text{ном}}$, снятую при активной нагрузке, $\cos \varphi_{\text{нг}} = 1.0$.

4.4. Расчет внешних характеристик (разд. 15.4, с. 266, сл.)

Внешние характеристики можно получить расчетным путем, не загружая трансформатор, а пользуясь данными опытов холостого хода и короткого замыкания.

Определение. Изменением напряжения трансформатора ΔU называется арифметическая разность между вторичным напряжением $U_{2.\text{ном}}$ трансформатора при холостом ходе, и вторичным напряжением U_2 трансформатора при номинальном вторичном токе. Причём первичное напряжение постоянно и равно номинальному, $U_{1\text{ном}}$, а частота также постоянна и равна номинальной, $f_{1\text{ном}}$:

$$\Delta U = U_{2.\text{ном}} - U_2, \text{ В.}$$

Изменение напряжения также выражают в процентах от номинального вторичного напряжения:

$$\Delta U\% = 100(U_{2.\text{ном}} - U_2)/U_{2.\text{ном}}. \quad (20.1)$$

Изменение напряжения представляет собой важную эксплуатационную характеристику трансформатора, оно рассчитывается при различной нагрузке, по приближенной формуле (см. разд. 15.3, с. 263, сл.)

$$\Delta U\% \approx u_{a75\%} \cdot \cos \varphi_{\text{нг}} + u_{p\%} \cdot \sin \varphi_{\text{нг}}, \quad (20.2)$$

где $u_{a75\%}$ и $u_{p\%}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, определяемые по данным опыта короткого замыкания (см. выше разд. 4.2 и табл. 20.2); значения $\cos \varphi_{\text{нг}}$ и $\sin \varphi_{\text{нг}}$ определяют характер нагрузки трансформатора; при расчёте $\Delta U\%$ задают значения $\cos \varphi_{\text{нг}}$ и $\sin \varphi_{\text{нг}}$.

При номинальной нагрузке величина изменения напряжения $\Delta U\%$ составляет $\sim 2 - 5 \%$.

Значение изменения напряжения $\Delta U\%$, рассчитанное по (20.2), соответствует номинальному значению вторичного тока. Для определения значений изменения напряжения при других значениях тока необходимо умножить $\Delta U\%$, рассчитанное по (20.2), на коэффициент β : $\beta \cdot \Delta U\%$.

При любом фиксированном характере нагрузки и изменяющейся величине нагрузки трансформатора его вторичное напряжение определяется так:

$$U_{2\phi} = U_{2\phi.\text{ном}} - 0,01 \cdot \beta \cdot \Delta U\% = f(\beta), \text{ В}, \quad (20.3)$$

где $U_{2\phi.\text{ном}}$ – номинальное фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора, определяемое по данным опыта холостого хода; значение β определяет величину нагрузки трансформатора, при расчёте $U_{2\phi}$ задают коэффициент β в диапазоне 0 – 1,25; $\Delta U\%$ – определить по формуле (20.2).

Задаваясь последовательно значениями коэффициента нагрузки β равными 0; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25, при фиксированных заданных значениях $\cos \varphi_{\text{нг}}$ и $\sin \varphi_{\text{нг}}$, рассчитать по (20.2) и (20.3) значения $\Delta U\%$ и внешнюю характеристику трансформатора $U_{2\phi} = f(\beta)$ при различном характере нагрузки. Результаты расчёта занести в табл. 20.4.

Таблица 20.4. Расчёт внешней характеристики

β	Характер нагрузки					
	Активная, $\cos \varphi_{\text{нг}} = 1.0$		Активно–индуктивная, $\cos \varphi_{\text{нг}} = 0.8;$ $\sin \varphi_{\text{нг}} = +0.6$		Активно–емкостная, $\cos \varphi_{\text{нг}} = 0.8;$ $\sin \varphi_{\text{нг}} = -0.6$	
	$\beta \cdot \Delta U\%$	$U_{2\phi}$	$\beta \cdot \Delta U\%$	$U_{2\phi}$	$\beta \cdot \Delta U\%$	$U_{2\phi}$
–	%	В	%	В	%	В
0						
0,5						
0,75						
1,0						
1,25						

Построить три расчетных внешних характеристики $U_{2\phi} = f(\beta)$, представленные в табл. 20.4, в одних осях координат с экспериментальной внешней характеристикой, представленной в табл. 20.3. Графическую интерпретацию характеристик выполнить в интерактивном программном пакете.

4.5. Расчет зависимости КПД от коэффициента нагрузки

(см. разд. 15.6, с. 272,сл.)

ГОСТ 3484.1-88 (Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний) рекомендует определять КПД косвенным методом, используя значения потерь мощности в трансформаторе, получаемые из опыта холостого хода

при номинальном первичном напряжении, $p_{\text{МГ.НОМ}} = p_{\text{Х.НОМ}}$, и опыта короткого замыкания при номинальном первичном токе, $p_{\text{ЭЛ.НОМ}} = p_{\text{К.НОМ}}$. Расчетное выражение для определения КПД (см. разд. 15.6, с. 272, сл.):

$$\eta = 1,0 - (p_{\text{Х.НОМ}} + \beta^2 \cdot p_{\text{К.НОМ75}}) / (\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НГ}} + p_{\text{Х.НОМ}} + \beta^2 \cdot p_{\text{К.НОМ75}}) = f(\beta), \quad (20.4)$$

где $p_{\text{Х.НОМ}}$ – магнитные потери мощности в магнитопроводе, равные мощности потерь холостого хода при $U_{1\text{Х}} = U_{1\text{ф.НОМ}}$ (см. табл. 20.1); $p_{\text{К.НОМ75}}$ – электрические потери в обмотках, равные мощности потерь короткого замыкания при $I_{1\text{К}} = I_{1\text{НОМ}}$ и температуре 75 °С, $p_{\text{К.НОМ75}} = 3 \cdot I_{1\text{НОМ}}^2 \cdot R_{\text{К75}}$ (см. табл. 20.2); $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная полная мощность трансформатора, В·А; $S_{\text{НОМ}} = 3 \cdot U_{2\text{ф.НОМ}} \cdot I_{2\text{ф.НОМ}}$.

Рассчитать по выражению (20.4) коэффициент полезного действия при двух значениях коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_{\text{НГ}}$; результаты расчёта поместить в табл. 20.5.

Таблица 20.5. Расчёт коэффициента полезного действия

$\cos \varphi_{\text{НГ}}$	β	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
1,0	η	0							
0,8	η	0							

Обе зависимости $\eta = f(\beta)$ представить на одном графике. Графическую интерпретацию выполнить в интерактивном программном пакете. Показать на графиках максимальные значения КПД η_{max} и соответствующие им значения коэффициента $\beta = \beta_{\text{М}}$, данные занести в табл. 20.6.

Таблица 20.6. Значения максимального КПД трансформатора, определённые графически

$\cos \varphi_{\text{НГ}}$	$\beta_{\text{М}}$	η_{max}
1,0		
0,8		

4.6. Определение максимального значения КПД η_{\max} из решения уравнения $d\eta/d\beta = 0$

Исходя из выражения (20.4), можно найти приближённое значение коэффициента нагрузки β при котором КПД η трансформатора имеет максимальное значение, $\eta = \eta_{\max}$. Взяв производную от $f(\beta)$ по изменению β , и решив уравнение $d\eta/d\beta = 0$, находим:

$$\beta_M^2 \cdot p_{к.ном75} = p_{х.ном}, \quad (20.5)$$

откуда

$$\beta_M = (p_{х.ном}/p_{к.ном75})^{1/2}. \quad (20.6)$$

Следовательно коэффициент полезного действия имеет максимальное значение при такой нагрузке (то есть при таком значении коэффициента $\beta = \beta_M$) при которой электрические потери в обмотках практически равны магнитным потерям в стали.

Пользуясь выражением (20.6) рассчитать максимальное значение КПД по формуле:

$$\eta_{\max} = 1,0 - (p_{х.ном}) / (0,5 \cdot \beta_M \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_{нг} + p_{х.ном}).$$

Результаты расчёта занести в табл. 20.7

Таблица 20.7. Расчётные значения максимального КПД трансформатора

$p_{х.ном}$	$p_{к.ном75}$	β_M	η_{\max}	
			$\cos \varphi_{нг} = 1,0$	$\cos \varphi_{нг} = 0,8$

Расчётные значения КПД η_{\max} , представленные в табл. 20.7, сопоставить с максимальными значениями КПД, определёнными графически на зависимостях $\eta = f(\beta)$ (см. табл. 20.6).

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 355).
4. Номинальные данные исследованного трансформатора (разд. 19, с. 351).
5. Схемы испытаний, рис. 20.1, а, б, в.
6. Результаты опытов и расчётов, представленные в таблицах 20.1 – 20.7.
7. Экспериментальные графические зависимости:
 - 7.1. Характеристики холостого хода в осях координат
 $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$;
 - 7.2. Характеристики короткого замыкания в осях координат
 $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$;
 - 7.3. Четыре внешние характеристики трансформатора при различном характере нагрузки в осях координат $U_2 = f(I_2)$;
 - 7.4. Две зависимости коэффициента полезного действия при различном характере нагрузки в осях координат $\eta = f(\beta)$.

Каждый график расположить с соответствующей таблицей и формулами на одной странице.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Трансформаторы подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

Образец оформления отчета по лабораторной работе приведён в прил. 2, с. 451, сл.

6. Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение, устройство и принцип действия трансформатора.
2. Что такое коэффициент трансформации?
3. Почему токи холостого хода в обмотке трехфазного трехстержневого трансформатора не одинаковы по фазам?
4. Чем обусловлена необходимость проведения опытов холостого хода и короткого замыкания при испытаниях силовых трансформаторов?
5. В чем смысл определения параметров и построения схемы замещения трансформатора?
6. Дать понятие напряжения короткого замыкания трансформатора и пояснить его важность для целей практики.
7. Почему мощность, потребляемую из сети в режиме холостого хода, принимают за магнитные потери, а в режиме короткого замыкания – за электрические потери?
8. Какие потери для трансформатора считаются постоянными, а какие – переменными?
9. Что называется изменением вторичного напряжения трансформатора, от чего оно зависит и в каких единицах выражается?
10. Чем объяснить, что у трехфазного трехстержневого трансформатора с планарным расположением стержней магнитная система несимметрична? Отражается ли это обстоятельство на рабочем режиме трансформатора?
11. Дать понятие о коэффициенте полезного действия и коэффициенте мощности трансформатора. Сопоставить эти коэффициенты.

21. РАБОТА № 2.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Оглавление

1. Цель работы	374
2. Программа работы	374
3. Основы теории	375
3.1. Понятия о выводах обмоток и направлениях ЭДС	375
3.2. Схемы и группы соединения обмоток	375
3.3. Условия включения трансформаторов на параллельную работу	378
4. Экспериментальное исследование	384
4.1. Проверка маркировки выводов обмоток	384
4.2. Проверка схем и групп соединения обмоток	386
4.3. Анализ уравнительного тока параллельно включённых трансформаторов в режиме холостого хода	389
4.4. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами	392
5. Содержание и оформление отчета	395
6. Контрольные вопросы	396
Приложение 21. Формулы для расчета значений напряжений U_{bB} , U_{bC} , U_{cB}	397
Перечень рисунков в 21-м разделе.....	373
Перечень таблиц в 19- и 21-м разделах	373

Перечень рисунков в 21-м разделе

Рис. 21.1. К иллюстрации сдвига векторов ЭДС обмоток при различной маркировке их выводов	376
Рис. 21.2. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/Y-0$	378
Рис. 21.3. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/Y-4$	380
Рис. 21.4. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/D-11$	381
Рис. 21.5. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/D-5$	381
Рис. 21.6. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $D/Y-11$	382
Рис. 21.7. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $D/D-0$	382
Рис. 21.8. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/Z-11$	383
Рис. 21.9. Проверка маркировки выводов обмоток	385
Рис. 21.10. К иллюстрации метода двух вольтметров проверки групп и схем соединений обмоток	386
Рис. 21.11. Схема лабораторной установки для исследования трансформаторов при параллельной работе	388

Перечень таблиц в 19- и 21-м разделах

Табл. 19.1. Номинальные данные трехфазного трансформатора типа ТС-2,5/0,269 (этот трансформатор исследуется в лабораторном цикле)	352
Табл. 21.1. Проверка обозначений начал и концов обмотки ВН	385
Табл. 21.2. Проверка маркировки обмотки НН	385
Табл. 21.3. Измеренные и расчётные значения напряжений	387
Табл. 21.4. Анализ уравнивающего тока параллельно включенных трансформаторов	390
Табл. 21.5. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами	393
Табл. П21.1. Формулы для расчета значений напряжений, используемых при проверке схем и групп соединения обмоток	397

1. Цель работы

Овладеть методикой маркировки выводов обмоток трехфазных трансформаторов. Научиться опытным путем определять группы соединений обмоток. Усвоить условия параллельной работы трансформаторов и уметь теоретически установить распределение нагрузки между ними.

2. Программа работы

2.1. Проверить маркировку выводов обмоток двух трехфазных трансформаторов, предназначенных для параллельной работы.

2.2. Реализовать для трехфазного трансформатора схемы и группы соединений обмоток $У/Д-11$ и $Д/Д-0$ и проверить правильность соединения опытным путем (студентам может быть предложена проверка других схем и групп соединений).

2.3. В режиме холостого хода параллельно работающих трансформаторов измерить уравнивающий ток, протекающий по их обмоткам. Определить величину уравнивающего тока аналитически.

2.4. Подключить трансформаторы, соединенные по схеме $Д/Д-0$, параллельно к питающей сети. Подключить нагрузку к трансформаторам и экспериментально определить распределение ее между ними. Построить график зависимости вторичных токов трансформаторов от общего тока нагрузки, а также внешние характеристики трансформаторов. Теоретически проверить распределение мощности и токов между параллельно работающими трансформаторами.

3. Основы теории

3.1. Понятия о выводах обмоток и направлениях ЭДС

Обмотка каждой фазы трансформатора имеет начало и конец. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов осуществляется в соответствии с ГОСТ 11677–85 (разд. 4, с. 149). Исходя из методических соображений будем обозначать начала обмоток ВН латинскими буквами A, B, C а концы – X, Y, Z . Для обмоток НН – соответственно a, b, c и x, y, z .

В трансформаторах фазные ЭДС двух обмоток ВН и НН, расположенных на одном стержне магнитопровода, могут или совпадать по фазе или быть в противофазе. Это зависит от направления намотки обмоток или от обозначения их выводов, т. е. от маркировки. На рис. 21.1,*а* показаны обмотки одной фазы трансформатора, намотанные по левой винтовой линии и называемые поэтому «левыми», причем у обеих обмоток начала A и a находятся сверху, а концы X и x – снизу. Положительным направлением ЭДС, индуцируемой в обмотке магнитным потоком, условно считается *направление ее от конца обмотки к началу*. Обмотки на рис. 21.1,*а* сцепляются с одним и тем же магнитным потоком Φ .

Вследствие этого ЭДС этих обмоток в каждый момент времени действуют в одинаковых направлениях – от концов к началам или наоборот, то есть они одновременно или положительны или отрицательны. Поэтому векторы ЭДС \underline{E}_{AX} и \underline{E}_{ax} совпадают по фазе, как показано на рис. 21.1,*а*. Если же у одной из обмоток поменять начало и конец (рис. 21.1,*б*), то направление её ЭДС изменится на обратное (относительно выводов) и векторы ЭДС \underline{E}_{AX} и \underline{E}_{xa} будут иметь сдвиг на 180° . Такой же результат получится, если на рис. 21.1,*а* одну из обмоток выполнить «правой» (то есть по правой винтовой линии).

3.2. Схемы и группы соединения обмоток (разд. 13, Г, с. 233, сл.)

Понятия о схемах и группах соединения обмоток трехфазных трансформаторов имеют важное значение при эксплуатации. Фазные обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены в схемы «звезда» (условное обозначение – Y или Y), «треугольник» (D или Δ) или «зигзаг» (Z или Y). В схемах соединений «звезда» и «зигзаг» можно вывести нейтральную точку (U_n, Z_n). В зависимости от схемы соединения обмоток и порядка соединения их выводов (направление намотки обмоток предполагается одинаковым) получают различные группы соединения обмоток.

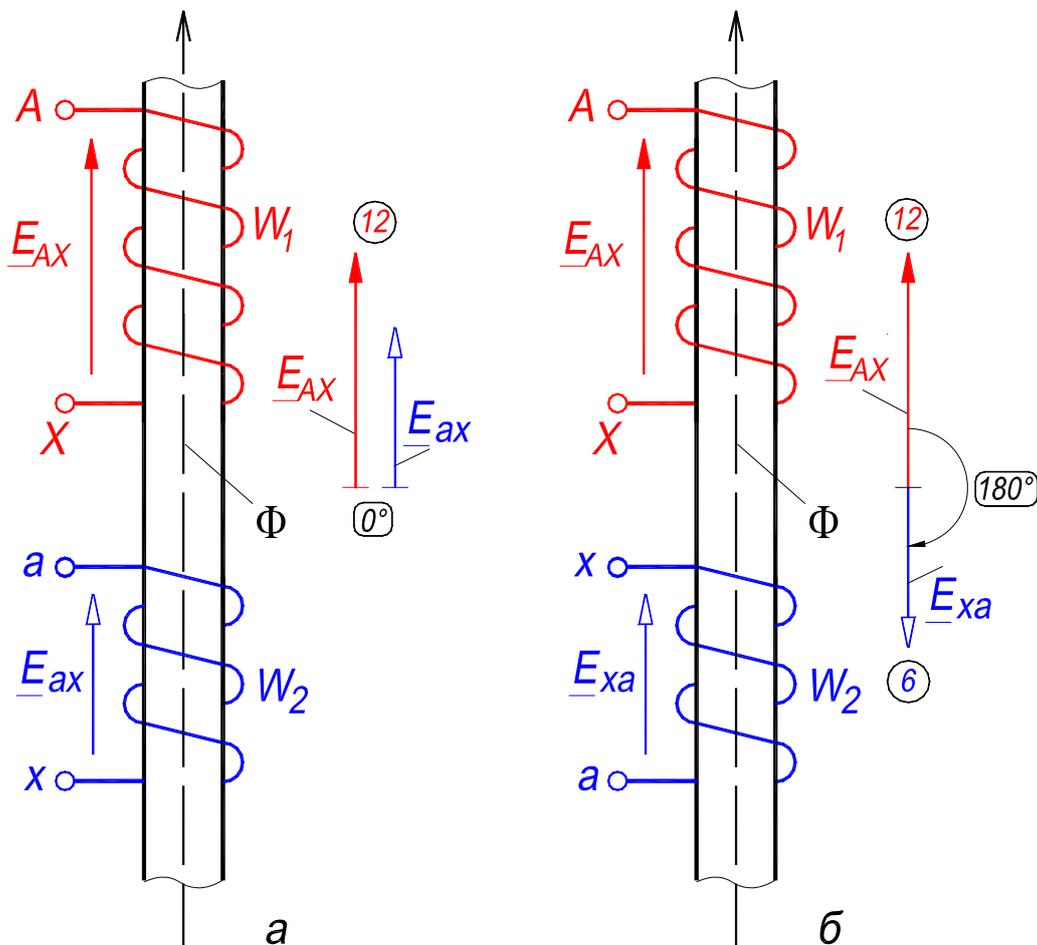


Рис. 21.1. К иллюстрации сдвига векторов ЭДС обмоток при различной маркировке их выводов

Группа соединения обмоток трансформатора определяется углом сдвига между векторами одноименных линейных ЭДС (например, \underline{E}_{AB} и \underline{E}_{ab} или \underline{E}_{BA} и \underline{E}_{ba}) обмоток высшего и низшего напряжений.

Для обозначения группы (и соответственно угла сдвига) векторы линейных ЭДС уподобляют стрелкам часового циферблата. Вектор линейной ЭДС обмотки ВН совмещают с минутной стрелкой часов и устанавливают неподвижно против цифры 12 (0). Вектор линейной ЭДС обмотки НН совмещают с часовой стрелкой и устанавливают против той цифры часового циферблата, которая определяет номер группы соединения, причем угол между стрелками равен углу сдвига между векторами одноименных линейных ЭДС. Возможно получение следующих групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов: 0, 1, 2, ... и 11-я группы. Этим группам соответствуют углы сдвига между векторами одноименных линейных ЭДС обмоток ВН и НН: 0° , 30° , 60° , ... и 330° .

ГОСТ 11677–85 предусматривает изготовление трехфазных двухобмоточных трансформаторов, имеющих следующие схемы и группы соединения обмоток: Y/Y_n-0 , $Y_n/Y-0$, $Y/D-11$, $Y_n/D-11$, Y/Z_n-11 , D/Y_n-11 , $D/D-0$. При этом первым обозначено соединение обмотки ВН, вторым – соединение обмотки НН. Однофазные двухобмоточные трансформаторы изготавливаются со схемой и группой соединения $I/I-0$ (см. рис. 21.1,а).

На рис. 21.2–21.8 приведены схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов и векторные диаграммы ЭДС, которые соответствуют следующим схемам и группам соединений обмоток: $Y/Y-0$, $Y/Y-4$, $Y/D-11$, $Y/D-5$, $D/Y-11$, $D/D-0$ и $Y/Z-11$.

В процессе эксперимента, при реализации схемы вторичной обмотки «звезда» или «треугольник», использовать только полуфазы a_1-x_1 , b_1-y_1 и c_1-z_1 . Индекс «1» на рис. 21.2 – 21.8, в обозначениях начал и концов фаз обмотки, а также в её линейных и фазных ЭДС, опущен (см. Примечание в разд. 4.2, с. 386).

Для маркировки выводов обмотки НН, согласно заданной схеме и группе соединений обмоток, необходимо (см., например, рис. 21.2):

1) вычертить заданную схему соединения обмотки ВН и произвольно (так, как общепринято) маркировать её выводы;

2) вычертить фазы обмотки НН, причём фазы между собой не соединять и зажимы не маркировать;

3) построить векторные диаграммы линейных и фазных ЭДС обмоток ВН и НН с учётом угла сдвига, заданного группой и схемой соединений (см. например, рис. 21.2 и 21.4). Точки A и a этих диаграмм совместить;

4) на векторной диаграмме отыскать те пары векторов фазных ЭДС обмоток ВН и НН, которые находятся в фазе (между ними сдвиг 0°) или в противофазе (между ними сдвиг 180°) /см. 2-й абзац разд. 3.1, с. 375/;

5) маркировать выводы обмотки НН с учетом того факта, что на одном стержне магнитопровода могут быть расположены только те фазные обмотки НН и ВН, которым соответствуют векторы фазных ЭДС этих обмоток, совпадающие по фазе или находящиеся в противофазе;

6) соединить между собой фазы обмотки НН в соответствии с заданной схемой соединения.

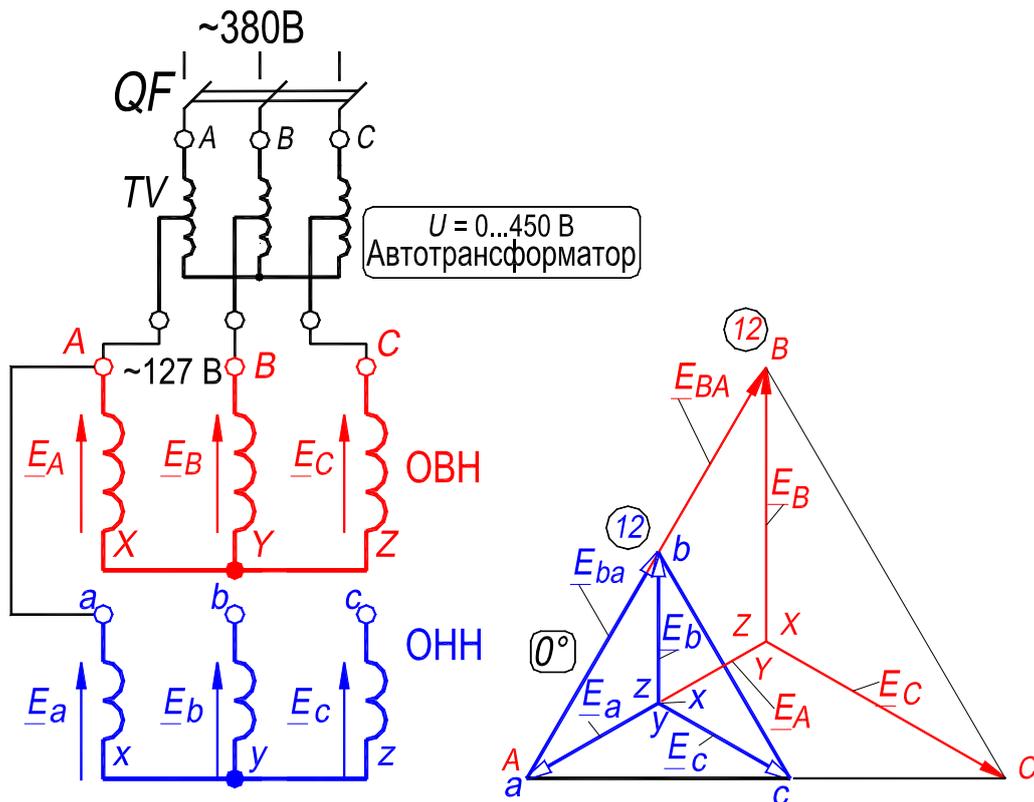


Рис. 21.2. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/Y-0$
(на рис. 21.3 – 21.8 автотрансформатор TV не показан)

3.3. Условия включения трансформаторов на параллельную работу (разд. 16.1, с. 287, сл.)

В некоторых электроустановках трансформаторы работают параллельно на общую нагрузку (разд. 16, с. 287, сл.). В этом случае проще решаются вопросы надежного электроснабжения потребителей; при сезонных и суточных изменениях нагрузки можно отключить часть трансформаторов, снижая потери электрической энергии; упрощается организация профилактических ремонтных работ и т. п.

При включении трансформаторов на параллельную работу необходимо, чтобы при холостом ходе в обмотках не возникали уравнительные токи, а при нагрузке общая нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально номинальным мощностям. Для этого требуется соблюдение следующих четырёх условий (рис. 16.1, с. 288):

1) равенство номинальных первичных и вторичных напряжений (первые индексы «1» и «2»), например для двух параллельно работающих трансформаторов (вторые индексы «I» и «II»):

$$U_{1I} = U_{1II}; U_{2I} = U_{2II},$$

т.е. трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации, $k_I = k_{II}$. Практически ГОСТ допускает разницу в коэффициентах трансформации не более $\pm 1\%$;

2) тождественность групп соединения обмоток, что обеспечивает совпадение по фазе одноименных вторичных напряжений;

3) равенство напряжений короткого замыкания, $U_{KI\%} = U_{KII\%}$. ГОСТ допускает отклонение напряжения короткого замыкания $U_{K\%}$ каждого трансформатора от среднеарифметического значения напряжений короткого замыкания всех трансформаторов не более чем на $\pm 10\%$;

4) рекомендуется включать на параллельную работу трансформаторы, отличающиеся по мощности не более чем в 3 раза.

При соблюдении первых двух условий исключается появление уравнительного тока при холостом ходе параллельно работающих трансформаторов:

$$I_{ур} = \Delta U / (Z_{KI} + Z_{KII}), \quad (21.1)$$

где ΔU – векторная разность вторичных напряжений трансформаторов при холостом ходе; Z_{KI} и Z_{KII} – сопротивления короткого замыкания трансформаторов I и II (см. описание Работы №1, разд. 4.2, с. 361, сл.).

Уравнительный ток обуславливает неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь мощности и нагрева.

Третье условие необходимо соблюдать для распределения нагрузки между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. Если напряжения $U_{K\%}$ трансформаторов не равны, то перегружается трансформатор с меньшим значением $U_{K\%}$, т. е. с меньшим сопротивлением Z_K . Распределение нагрузки между двумя трансформаторами можно оценить из выражения

$$S_I / S_{II} = (S_{номI} / S_{номII}) \cdot (U_{KII\%} / U_{KI\%}), \quad (21.2)$$

где S_I , S_{II} – мощности нагрузки параллельно работающих трансформаторов; $S_{номI}$, $S_{номII}$ – номинальные мощности трансформаторов.

Таким образом, как следует из (21.2), мощность нагрузки S_I и S_{II} между параллельно работающими трансформаторами распределяется обратно про-

порционально их напряжениям короткого замыкания $U_{кI\%}$ и $U_{кII\%}$. Мощность нагрузки параллельно работающего трансформатора можно определить по формуле

$$S_I = S_{нг} \cdot S_{номI} \cdot U_{кII\%} / (S_{номI} \cdot U_{кII\%} + S_{номII} \cdot U_{кI\%}), \quad (21.3)$$

где $S_{нг} = S_I + S_{II}$ – мощность общей нагрузки трансформаторов.

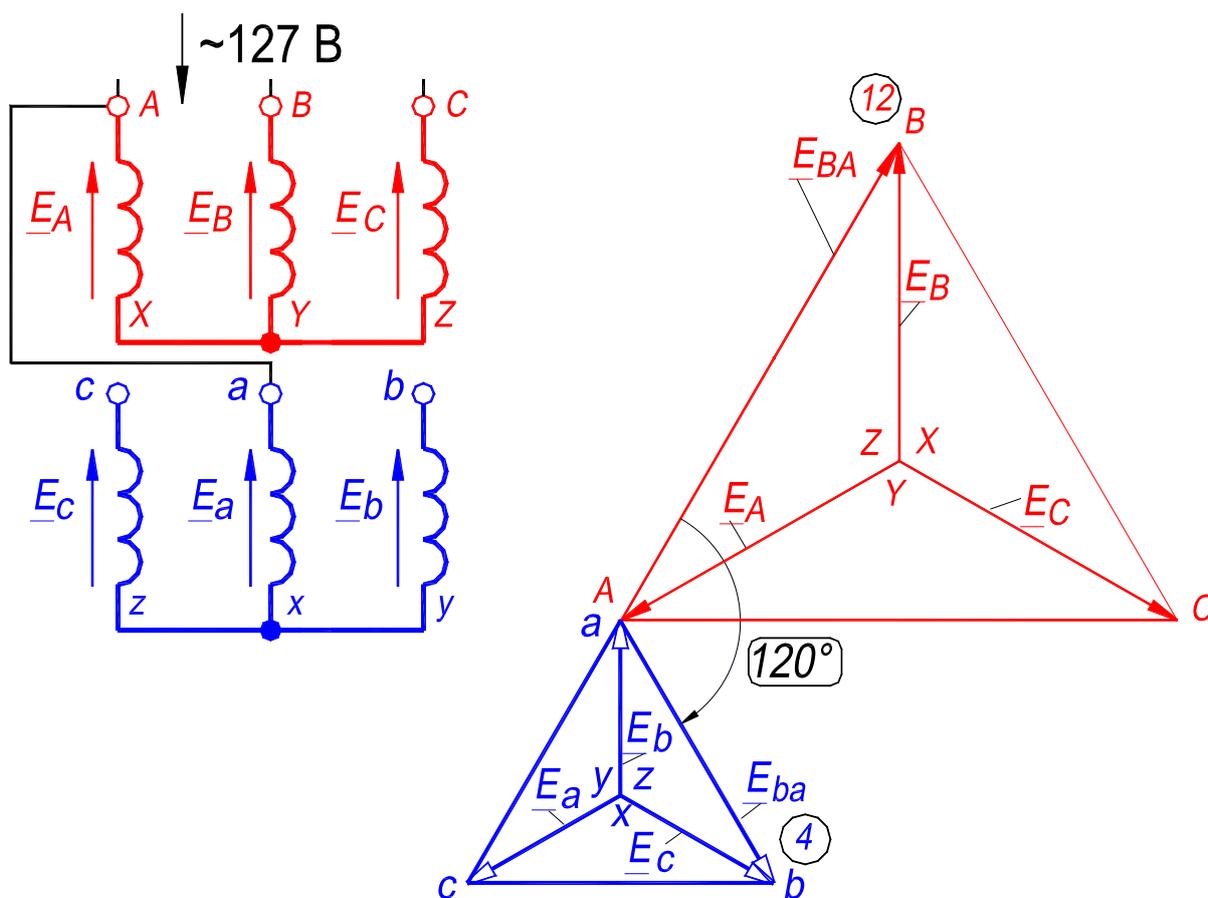


Рис. 21.3. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений У/У-4

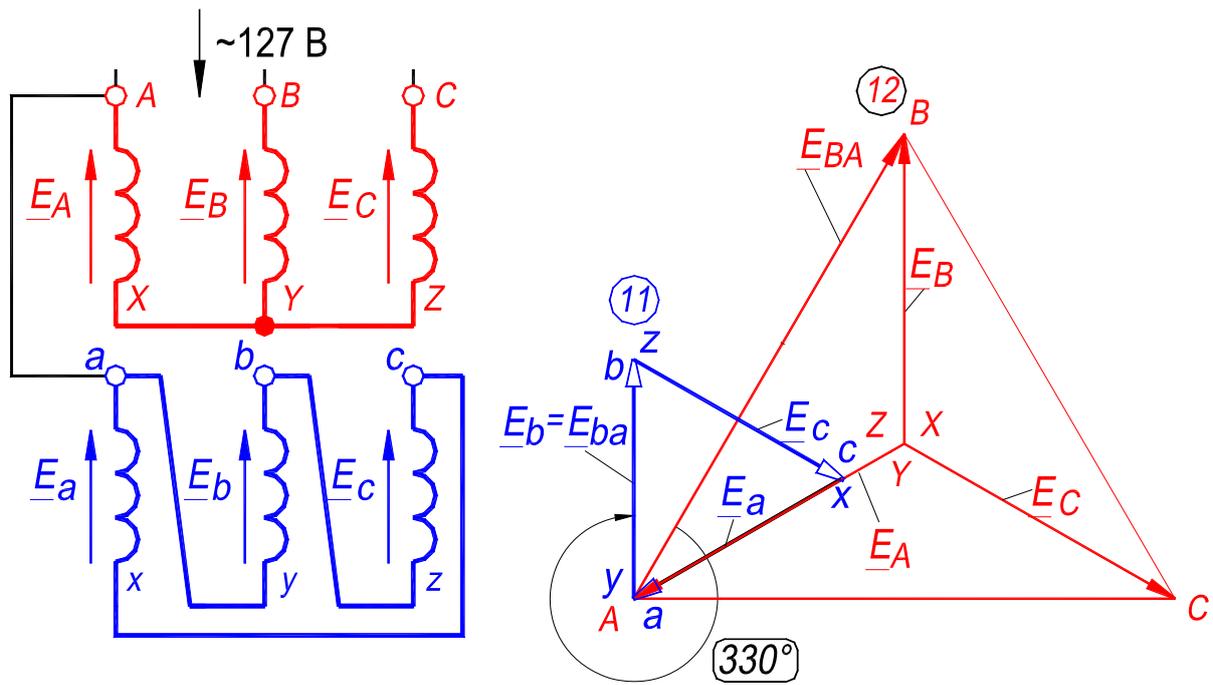


Рис. 21.4. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений У/Д-11

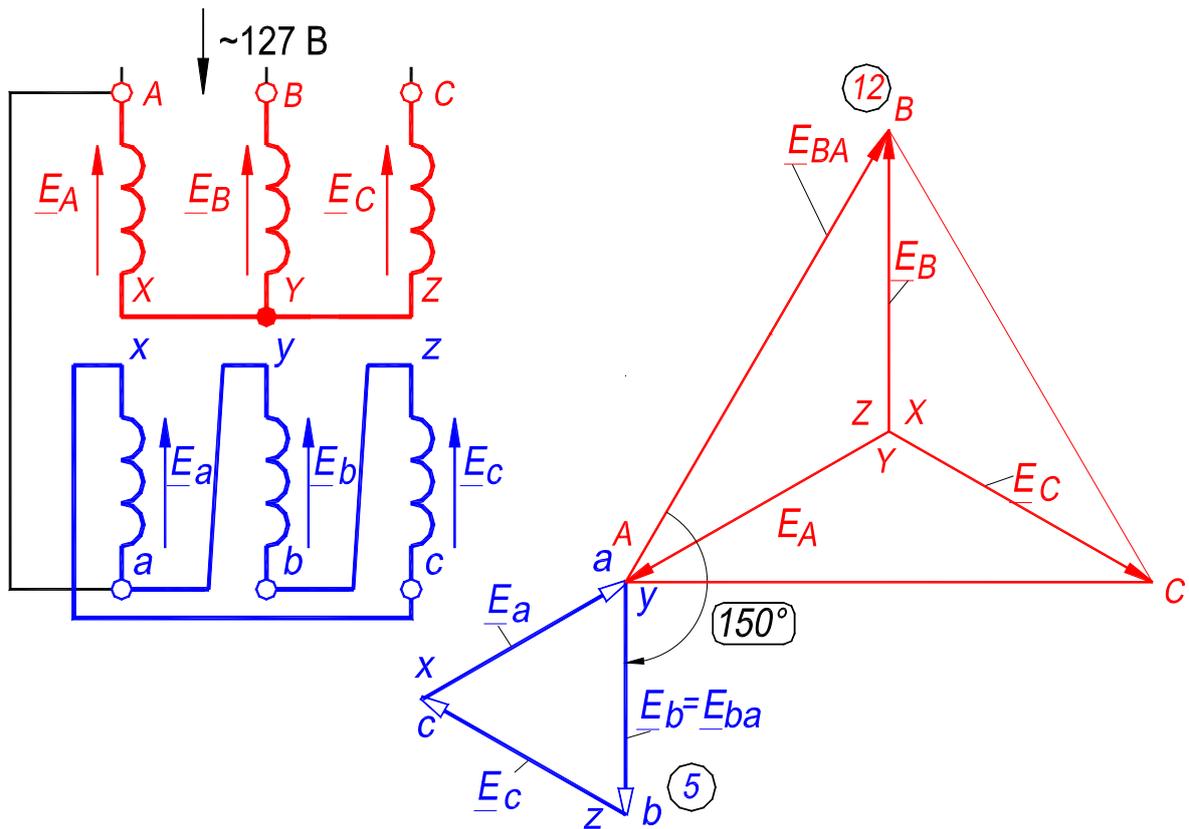


Рис. 21.5. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений У/Д-5

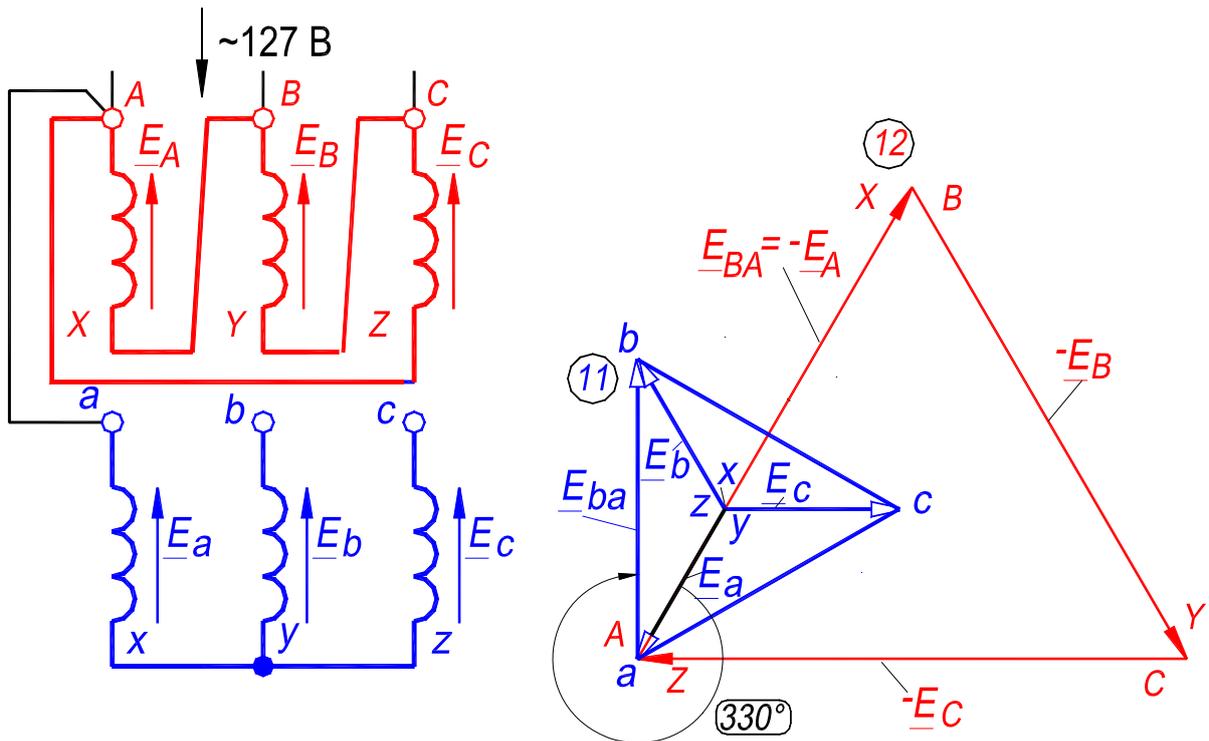


Рис. 21.6. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $D/Y-11$

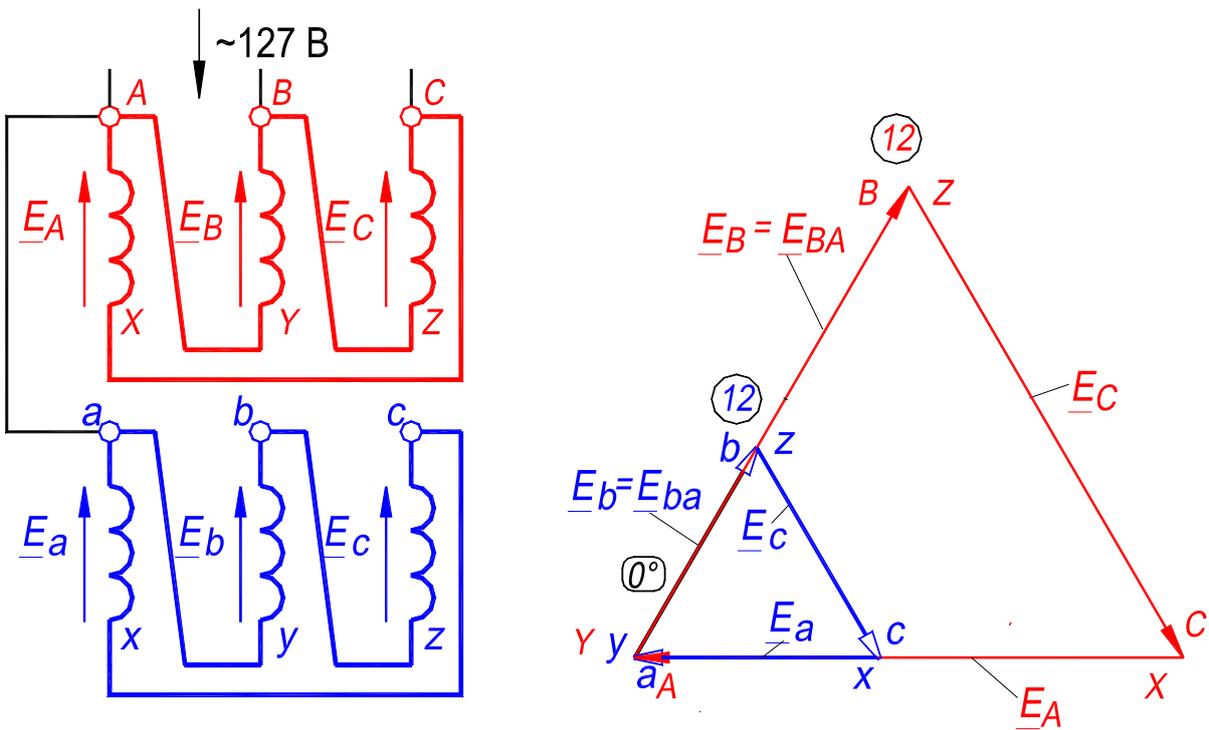


Рис. 21.7. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений $D/D-0$

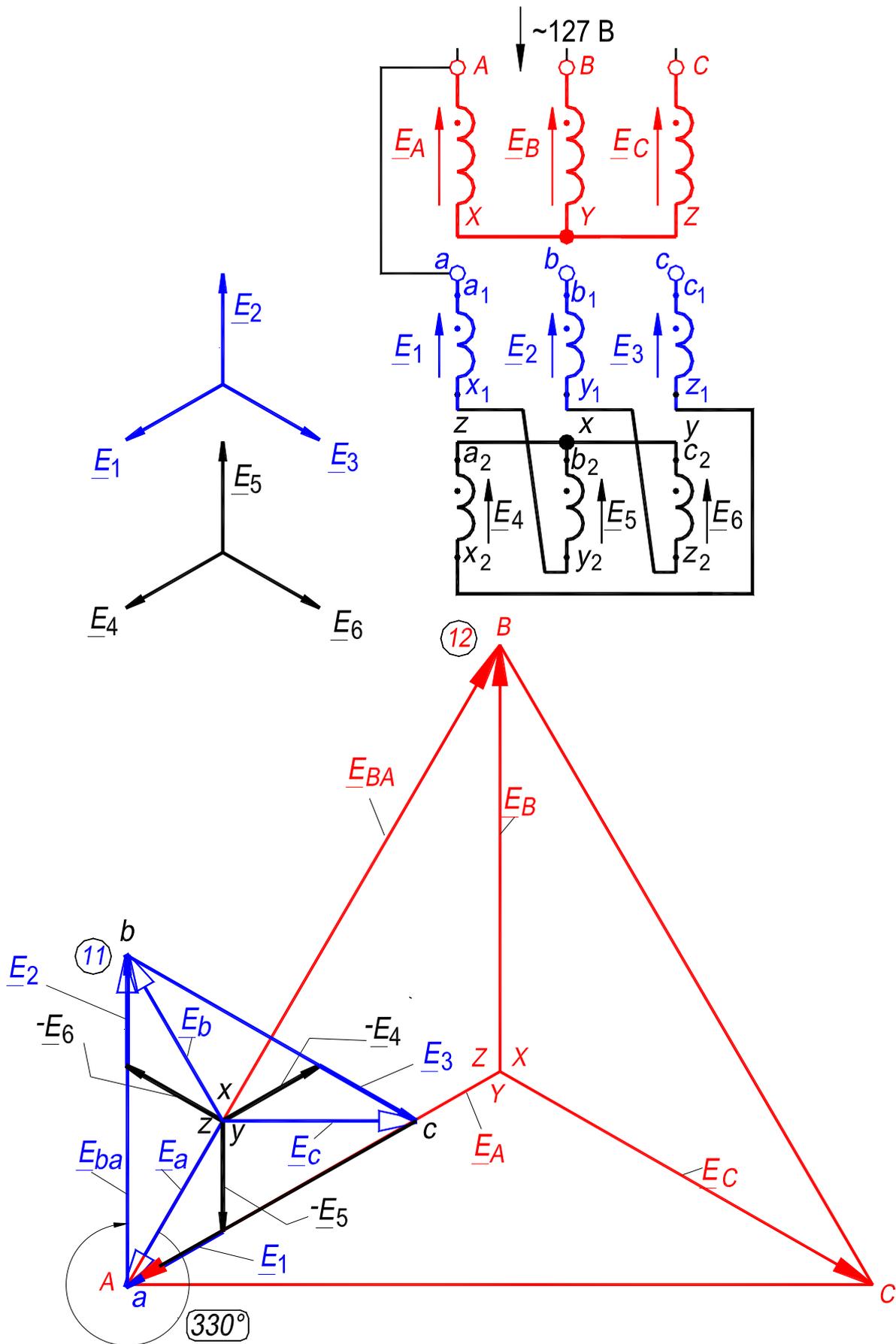


Рис. 21.8. Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений Y/Z-11

4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке в состав которой входят: два исследуемых трёхфазных трёхстержневых трансформатора I и II, включаемых на параллельную работу, источник регулируемого напряжения – автотрансформатор TV и нагрузочный реостат $RR_{нг}$ (см. фотографии установки на рис. П1, П2, П3, с. 25, 26).

Схемы включения трансформаторов для проведения экспериментальных исследований приведены на рис. 21.2 – 21.11. Фазы обмоток трансформаторов I и II на рис. 21.11 (с. 388) соединены по схеме «треугольник» (Δ). В качестве первичной используется обмотка, каждая фаза которой состоит из двух последовательно и согласно соединенных полуфаз, например a_1-x_1 и a_2-x_2 (см. рис. 21.11).

Описание устройства исследуемых трансформаторов и значения номинальных данных – см. разд. 19, с. 351, 352.

Записать номинальные данные одного исследуемого трансформатора (см. термины 60 – 63 на с. 147).

4.1. Проверка маркировки выводов обмоток

У трехфазных трансформаторов, предназначенных для включения на параллельную работу, маркировка выводов обмоток указана, поэтому необходимо только убедиться, что она выполнена правильно.

Прежде всего следует проверить обозначения начал и концов обмотки ВН. Для этого фазные обмотки ВН соединяют «звездой», подключают фазу $B-Y$ к сети с напряжением 127 В (рис. 21.9,а) и измеряют напряжения и ЭДС U_{BY} , E_{AX} , E_{CZ} , U_{AB} , U_{BC} . Так как магнитный поток в среднем стержне трансформатора, где расположена обмотка фазы $B-Y$, в два раза больше, чем магнитные потоки в крайних стержнях, и имеет противоположное им направление, то измеренные при правильной маркировке обмоток напряжения и ЭДС будут равны: $E_{BY} \approx U_{BY}$, $E_{XA} = E_{ZC} \approx 0,5U_{BY}$, $U_{AB} = U_{BC} = 1,5U_{BY}$.

Если маркировка обмоток выполнена неправильно, то одно из напряжений U_{AB} или U_{BC} (или оба) будут равны $0,5U_{BY}$. Например, для рис. 21.9,б $U_{AB} = 0,5U_{BY}$, $U_{BC} = 1,5U_{BY}$. Результаты измерений и заключение по ним записать в табл. 21.1.

Таблица 21.1. Проверка обозначений начал и концов обмотки ВН

Трансформатор	U_{bB}	U_{AX}	U_{CZ}	U_{AB}	U_{BC}	Заключе- ние
	В	В	В	В	В	
I						
II						

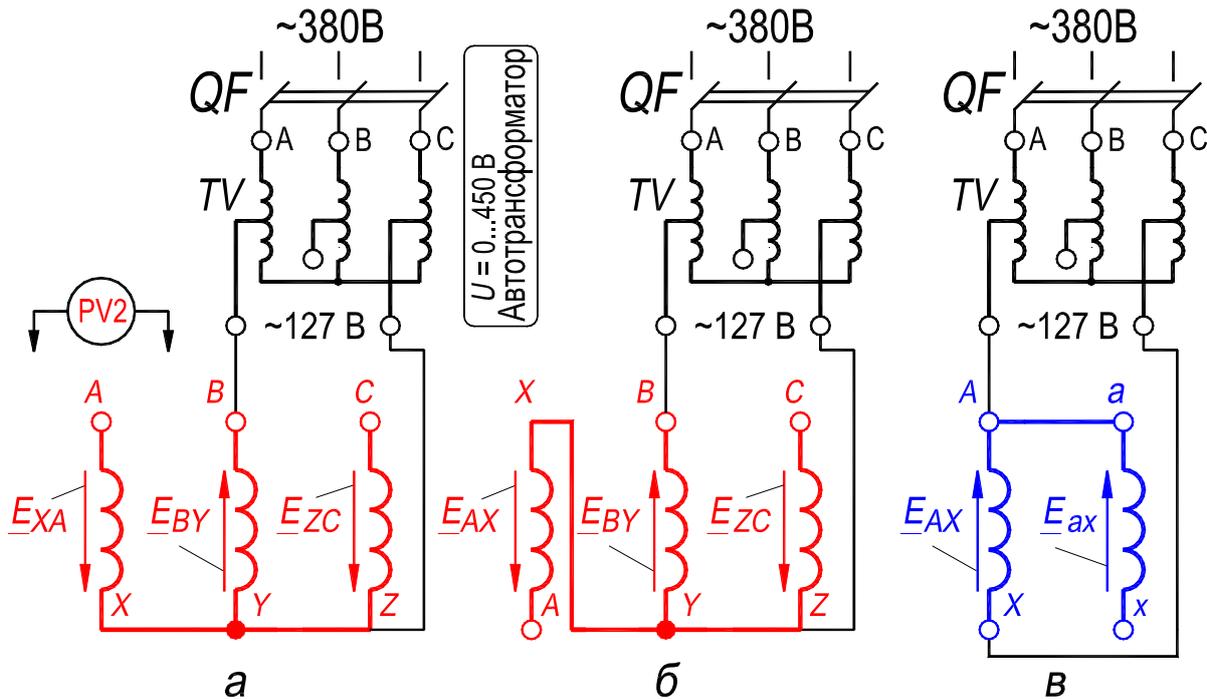


Рис. 21.9. Проверка маркировки выводов обмоток:

а, б – высокого напряжения; *в* – низкого напряжения

Маркировку обмоток НН проверяют поочередно для каждой фазы. На рис. 21.9,в приведена схема для проверки маркировки фазы *а-х* обмотки НН (аналогично и для других фаз). При правильной маркировке фазы *а-х* напряжение $U_{Xx} = U_{AX} - U_{ax}$. Результаты измерений записать в табл. 21.2.

Таблица 21.2. Проверка маркировки обмотки НН

Транс- форматор	Фаза <i>A-X</i>			Фаза <i>B-Y</i>			Фаза <i>C-Z</i>			Заклю- чие
	U_{ax}	U_{AX}	U_{Xx}	U_{by}	U_{BY}	U_{Yy}	U_{cz}	U_{CZ}	U_{Zz}	
	В	В	В	В	В	В	В	В	В	
I										
II										

4.2. Проверка схем и групп соединения обмоток (разд. 3.1 и 3.2, с. 375,сл.)

На практике проверку схем и групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов выполняют по методу двух вольтметров, который основан на *измерении напряжений* между соответствующими выводами обмоток трансформатора (рис. 21.10) с последующим их сравнением с *расчетными значениями напряжений*, определёнными по формулам, приведенным в табл. П21.1, с. 397. Измеренные напряжения должны быть равны расчетным для заданной группы соединений.

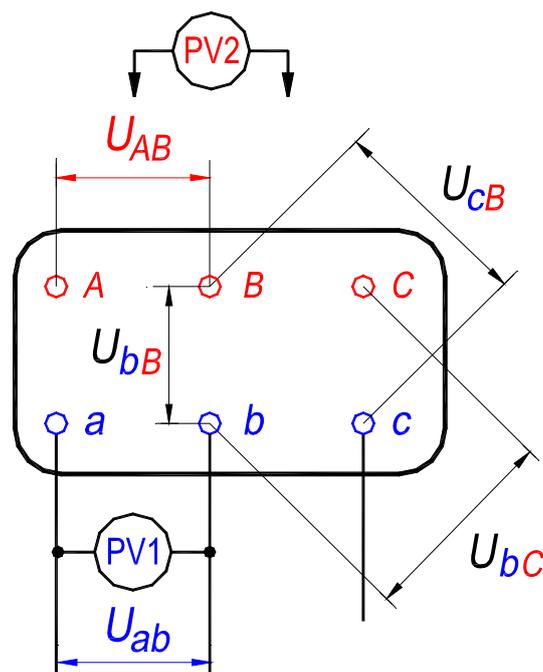


Рис. 21.10. К иллюстрации метода двух вольтметров проверки групп и схем соединений обмоток

Примечание. Число витков в каждой фазе первичной обмотки трансформаторов I и II равно $W_1 = 240$ витков. Фазы вторичной обмотки состоят из двух полуфаз с одинаковым числом витков в каждой $W_2/2 = 147$ витков (это необходимо для реализации схемы «зигзаг», рис. 21.8). Если соединить последовательно полуфазы вторичной обмотки, то в фазе вторичной обмотки будет 294 витка. Тогда трансформаторы I и II будут повышающими. Но формулы, приведенные в табл. П21.1 (с. 397), составлены для понижающих (распределительных) трансформаторов. Поэтому при выполнении эксперимента (разд. 4.2), при сборке заданных схем («звезда» или «треугольник») и групп соединения обмоток, необходимо использовать для реализации вторичной обмотки только полуфазы a_1-x_1 , b_1-y_1 и c_1-z_1 . В обозначениях линейных и фазных вторичных напряжений в формулах, приведенных в табл. П21.1, индекс «1» исключён. Он также опущен на рис. 21.2 – 21.7.

В работе следует проверить две схемы и группы соединения *У/Д-11* и *Д/Д-0* (студентам может быть предложено осуществить и проверить другие схемы и группы соединений). Расчетные напряжения определяются по формулам (см. табл. П21.1, с. 397):

а) для группы *У/Д-11*

$$U_{bV} = U_{cB} = U_{ab} \sqrt{1 - k_L \sqrt{3} + k_L^2}, U_{bC} = U_{ab} \sqrt{1 + k_L^2};$$

б) для группы *Д/Д-0*

$$U_{bC} = U_{cB} = U_{ab} \sqrt{1 - k_L + k_L^2}, U_{bV} = U_{ab} (k_L - 1),$$

где $k_L = U_{AB}/U_{ab}$ – линейный коэффициент трансформации. Фазы вторичной обмотки включают только одну полуфазу, то есть $U_{ab} = U_{a_1b_1}$.

Схема измерений для трансформаторов со схемой и группой соединения обмоток *У/Д-11* и *Д/Д-0* приведена соответственно на рис. 21.4 и 21.7. На первичной обмотке (ВН) установить автотрансформатором *ТV* напряжение 127 В (см. рис. 21.2). Результаты измерений и расчетов поместить в табл. 21.3.

Таблица 21.3. Измеренные и расчётные значения напряжений

Схема и группа соединения обмоток	Трансформатор I *					Трансформатор II *				
	U_{AB}	U_{ab}	U_{bV}	U_{bC}	U_{cB}	U_{AB}	U_{ab}	U_{bV}	U_{bC}	U_{cB}
	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В
<i>У/Д-11</i>										
<i>Д/Д-0</i>										

* П р и м е ч а н и е. В верхнюю часть ячеек записываются измеренные значения напряжения, а в нижнюю их часть – расчетные.

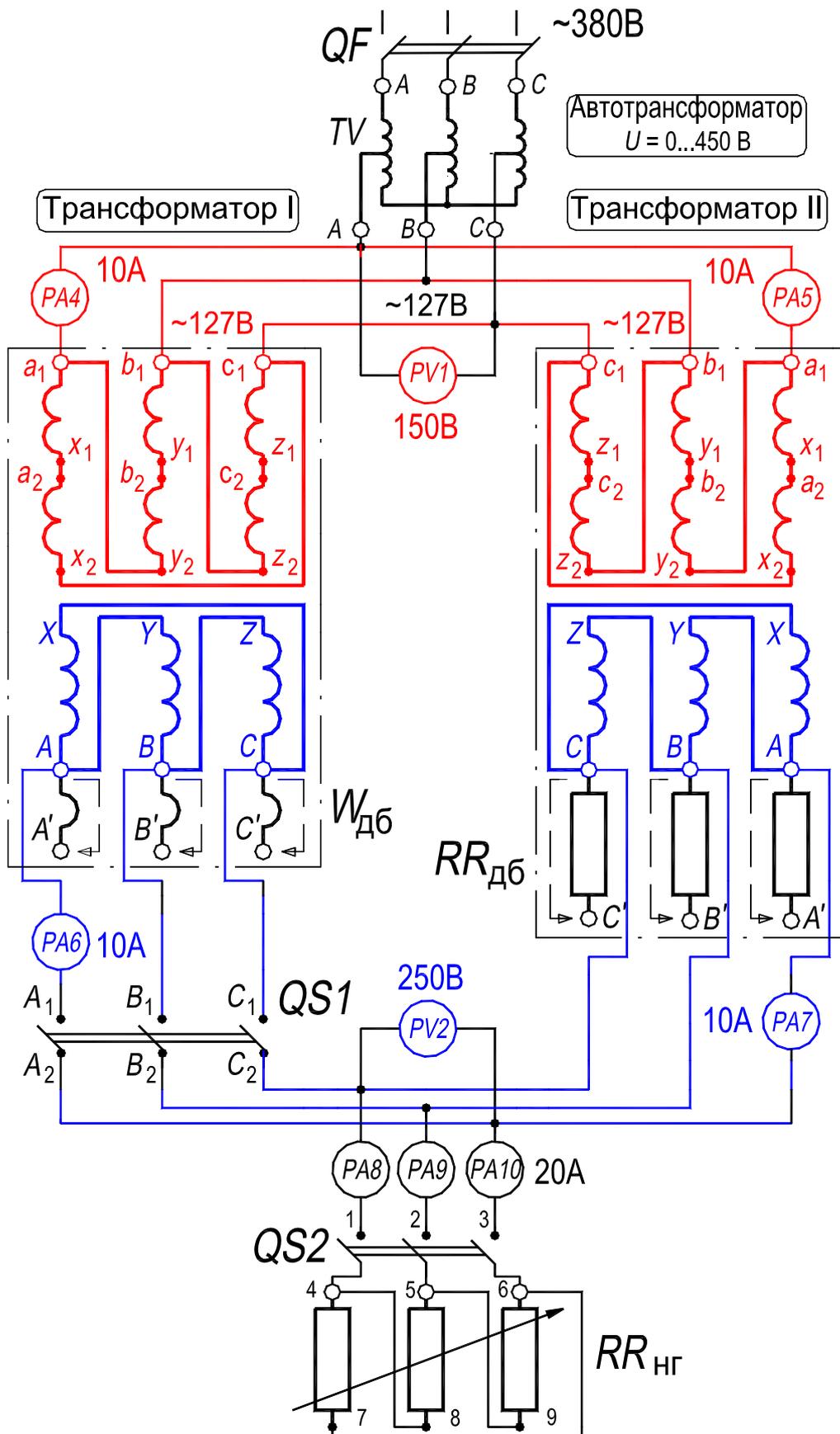


Рис. 21.11. Схема лабораторной установки для исследования трансформаторов при параллельной работе

4.3. Анализ уравнивающего тока параллельно включённых трансформаторов в режиме холостого хода

(нагрузка $RR_{нг}$ отключена) (см. разд. 3.3, с. 378, сл.)

Для оценки величины и влияния уравнивающего тока, протекающего во вторичных обмотках трансформаторов при невыполнении 1-го условия включения их на параллельную работу и, соответственно, при неравенстве коэффициентов трансформации трансформаторов I и II, $k_I \neq k_{II}$, проводят следующие опыты (при этом условия 2, 3 и 4 считаются выполненными).

Собрать схему опыта, рис. 21.11.

1. Перед параллельным включением трансформаторов I и II, проверить равнопотенциальность выводов вторичных обмоток, которые подключены к зажимам выключателя $QS1$. С этой целью осуществить следующее.

1. Отключить автомат QF и выключатели $QS1$ и $QS2$ (напряжение со схемы снято);

2. Соединить проводником зажимы (например, C_1 и C_2) выключателя $QS1$;

3. Включить автомат QF , установить автотрансформатором TV напряжение 127 В (вольтметр PVI) и измерить напряжение между парами зажимов A_1 и A_2 , затем – B_1 и B_2 .

Вывод. Если фазы напряжений вторичных обмоток трансформаторов совпадают, то напряжения между этими парами зажимов будут равны нулю, что свидетельствует о выполнении 1 и 2-го условий включения трансформаторов на параллельную работу. Если напряжения не равны нулю, то это означает, что схема собрана неправильно. *До устранения неисправностей включать трансформаторы на параллельную работу нельзя.*

4. При выполнении условий 1 и 2, отключить автомат QF , повернуть рукоятку автотрансформатора TV против часовой стрелки до упора и удалить перемычку, соединяющую зажимы C_1 и C_2 .

2. Для анализа уравнивающего тока параллельно работающих трансформаторов последовательно провести опыты А, Б, В и Г. В процессе всех опытов переключатель $QS2$ разомкнут, нагрузка $RR_{нг}$ отключена.

Опыт А. Вторичные обмотки трансформаторов между собой не соединять, выключатель $QS1$ разомкнуть. Добавочное сопротивление $RR_{дб}$

и добавочные витки $W_{дб}$ из схемы исключить. Коэффициенты трансформации практически равны между собой, $k_I \approx k_{II}$ (с учётом допуска). Заменить амперметры $PA4$, $PA5$ и $PA6$, соответственно, на амперметры $PA1$, $PA2$ и $PA3$. Амперметр $PA7$ из схемы исключить. Включить автомат QF , медленно и плавно поднять автотрансформатором TV напряжение до значения 127 В (вольтметр $PV1$). Занести показания амперметров и вольтметров в табл. 21.4.

Автомат QF оставить в положении «Включено».

Таблица 21.4. Анализ уравнивающего тока параллельно включенных трансформаторов

U_1	U_2	Трансформатор I		Трансформатор II	
		I_{I1}	$I_{2Iур}$	I_{II1}	$I_{2IIур}$
В	В	А	А	А	А
$PV1$	$PV2$	$PA1$	$PA3$	$PA2$	$PA3$
Данные опыта А, вторичные обмотки разомкнуты, $k_I \approx k_{II}$					
127			0		0
Данные опыта Б, вторичные обмотки замкнуты, $k_I \approx k_{II}$					
127					
Данные опыта В, вторичные обмотки разомкнуты, $k_I < k_{II}$					
127	$\Delta U =$		0		0
Данные опыта Г, вторичные обмотки замкнуты, $k_I < k_{II}$					
$PV1$	$PV2$	$PA4$	$PA6$	$PA5$	$PA6$
127					

Опыт Б. Замкнуть выключатель QSI (этим опыт Б отличается от опыта А). Занести показания амперметров и вольтметров в табл. 21.4.

Автомат QF перевести в положении «Выключено», со схемы снято напряжение. Выставить рукоятку автотрансформатора TV в положение «0».

Опыт В. Выключатель QSI перевести в положение «Отключено». Опыт провести при неравенстве коэффициентов трансформации, $k_I \neq k_{II}$. Включить добавочные витки $W_{дб}$ во вторичную обмотку трансформатора I, $k_I < k_{II}$. Включить автомат QF , медленно и плавно поднять напряжение до значения 127 В (вольтметр $PV1$). Величина ΔU – это значение напряжение между зажимами,

например C_1 и C_2 , разомкнутого выключателя QSI . Оно используется при расчете уравнительного тока по формуле (21.1) /измерение ΔU осуществить мультиметром, щупами с изолированными рукоятками/. Занести показания амперметров, вольтметра и мультиметра в табл. 21.4.

Автомат QF перевести в положение «Выключено», со схемы снято напряжение. Выставить рукоятку автотрансформатора TV в положение «0».

Опыт Г. Заменить амперметры $PA1$, $PA2$ и $PA3$, соответственно, на амперметры $PA4$, $PA5$ и $PA6$. Замкнуть выключатель QSI (этим **опыт Г** отличается от **опыта В**). Коэффициенты трансформации не равны, $k_I < k_{II}$. Включить автомат QF , медленно и плавно увеличить автотрансформатором TV напряжение до значения 127 В (вольтметр PVI). Занести показания амперметров и вольтметров в табл. 21.4.

Автомат QF перевести в положение «Отключено»; выставить рукоятку автотрансформатора TV в положение «0»; разомкнуть выключатель QSI ; отключить добавочные витки $W_{дб}$; включить амперметр $PA7$.

Эксперимент по исследованию уравнительного тока параллельно работающих трансформаторов, при невыполнении 1-го условия, завершён.

Сопоставить значения токов, полученных в **опытах А, Б, В, Г** и представленных в табл. 21.4, и выполнить сравнительный анализ этих токов. Следует иметь в виду, что вторичный уравнительный ток трансформируется в первичные обмотки и геометрически складывается с токами холостого хода.

При параллельной работе трансформаторов на общую нагрузку $RR_{нг}$ уравнительный ток обусловит неравномерную загрузку трансформаторов (сравнить данные **опытов А, Б**, представленные далее в табл. 21.5).

Теоретическая проверка уравнительного тока выполняется по выражению (21.1), в котором сопротивления короткого замыкания трансформаторов I и II, вычисляются по формулам:

$$Z_{KI} = U_{KI\%} \frac{U_{2I}^2}{100S_{номI}}, \text{ Ом}; \quad Z_{KII} = U_{KII\%} \frac{U_{2II}^2}{100S_{номII}}, \text{ Ом}.$$

Значения напряжений короткого замыкания – см. описание Работы №1, табл. 20.2, с. 362.

Результаты расчета уравнивающего тока по формуле (21.1) сравнить с данными табл. 21.4, опыт Г.

4.4. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

Для исследования распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами последовательно провести опыты А, Б и В. В процессе всех опытов переключатель $QS2$ замкнут, нагрузка $RR_{нг}$ включена.

Опыт А. Опыт провести при условиях: а) равенство коэффициентов трансформации, $k_I \approx k_{II}$ (с учётом допуска); б) равенство напряжений короткого замыкания, $U_{кI} = U_{кII}$. Включить трансформаторы I и II на параллельную работу с общей активной нагрузкой $RR_{нг}$, с этой целью последовательно (один за другим) включить автомат QF и выключатели $QS1$ и $QS2$. Вращая рукоятку автотрансформатора TV медленно и плавно поднять напряжение до значения 127 В (вольтметр PVI). Поддерживать это значение неизменным в процессе опыта, $U_I = U_{II} = U_{III} = 127 \text{ В} = \text{const}$. Постепенно ступенями увеличивать нагрузку, на каждой ступени занести показания амперметров и вольтметров в табл. 21.5. Фиксировать показания для 4 или 5-ти различных значений общего тока нагрузки $I_{нг}$, в том числе фиксировать точку при номинальных токах трансформаторов.

Автомат QF перевести в положение «Выключено», со схемы снято напряжение. Выставить рукоятку автотрансформатора TV в положение «0».

Опыт Б. Опыт провести при условиях: а) равенство коэффициентов трансформации, $k_I \approx k_{II}$ (с учётом допуска); б) неравенство напряжений короткого замыкания, $U_{кI} \neq U_{кII}$. Включить добавочное сопротивление $RR_{дб}$. Последовательно (один за другим) включить автомат QF и выключатели $QS1$ и $QS2$. Вращая рукоятку автотрансформатора TV медленно и плавно поднять напряжение до значения 127 В (вольтметр PVI). Поддерживать это значение неизменным в процессе опыта, $U_I = U_{II} = U_{III} = 127 \text{ В} = \text{const}$. Постепенно ступенями увеличивать нагрузку, на каждой ступени занести показания амперметров и вольтметров в табл. 21.5.

Автомат QF перевести в положение «Выключено», со схемы снято напряжение. Выставить рукоятку автотрансформатора TV в положение «0». Отключить добавочное сопротивление $RR_{дб}$.

Таблица 21.5. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

Нагрузка			Трансформатор I				Трансформатор II			
U_2	$I_{нг}$	$P_{нг}$	U_1	I_{1I}	I_{2I}	S_I	U_1	I_{1II}	I_{2II}	S_{II}
<i>PV2</i>	<i>PA8</i>	–	<i>PV1</i>	<i>PA4</i>	<i>PA6</i>	–	<i>PV1</i>	<i>PA5</i>	<i>PA7</i>	–
В	А	Вт	В	А	А	В·А	В	А	А	В·А
Опыт А. $k_I \approx k_{II}$; $U_{кI} = U_{кII}$										
Опыт Б. $k_I \approx k_{II}$; $U_{кI} \neq U_{кII}$										
Опыт В. $k_I < k_{II}$; $U_{кI} = U_{кII}$										

Опыт В. Опыт провести при условиях: а) неравенство коэффициентов трансформации, $k_I < k_{II}$; б) равенство напряжений короткого замыкания, $U_{кI} = U_{кII}$. Включить добавочные витки $W_{дб}$. Последовательно (один за другим) включить автомат QF и выключатели $QS1$ и $QS2$. Вращая рукоятку автотрансформатора TV медленно и плавно поднять напряжение до значения 127 В (вольтметр $PV1$). Поддерживать это значение неизменным в процессе опыта, $U_1 = U_{1I} = U_{1II} = 127 \text{ В} = \text{const}$. Постепенно ступенями увеличивать

нагрузку, на каждой ступени занести показания амперметров и вольтметров в табл. 21.5.

Автомат QF перевести в положении «Выключено», со схемы снято напряжение. Выставить рукоятку автотрансформатора TV в положение «0». Отключить добавочные витки $W_{дб}$.

Эксперимент по исследованию распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами I и II завершён.

Значения мощностей рассчитать по формулам:

$$P_{нг} = 1,732U_2I_{нг}, S_I = 1,732U_1I_{1I}, S_{II} = 1,732U_1I_{1II}.$$

По данным табл. 21.5, опыты А, Б и Г, построить зависимости $I_{2I}, I_{2II} = f(I_{нг})$, а также внешние характеристики трансформаторов $U_2 = f(I_{2I}, I_{2II})$. Графическую интерпретацию характеристик выполнить в интерактивном программном пакете.

5. Содержание и оформление отчёта отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 374).
4. Номинальные данные исследованного трансформатора (разд. 19, с. 351).
5. Схемы испытаний, рис. 21.4, 21.7 (*студентам может быть предложено осуществить и проверить другие схемы и группы соединений*), рис. 21.9 и 21.11.
6. Результаты опытов, представленные в таблицах 21.1 – 21.5. Ниже таблиц приводить соответствующие формулы.
7. Экспериментальные графические зависимости:
 - 7.1. Зависимости $I_{2I}, I_{2II} = f(I_{нр})$ для каждого опыта А, Б и В (табл. 21.5);
 - 7.2. Внешние характеристики трансформаторов I и II $U_2 = f(I_{2I}, I_{2II})$ (табл. 21.5);

Указанные графики расположить за таблицей 21.5.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Трансформаторы подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

Образец оформления отчета по лабораторной работе приведён в прил. 2, с. 451, сл.

6. Контрольные вопросы

1. Назовите условия включения трансформаторов на параллельную работу.
2. В каких случаях при включении трансформаторов на параллельную работу будет протекать значительный уравнивающий ток?
3. Почему трансформатор с меньшим значением напряжения короткого замыкания больше перегружается при параллельной работе, чем остальные трансформаторы?
4. Почему не рекомендуется включать на параллельную работу трансформаторы, у которых номинальные мощности отличаются более чем в 3 раза?
5. Что означает номер группы соединения обмоток трансформатора? Как он определяется опытным путем?
6. Как опытным путем выполнить маркировку обмоток трансформатора?
7. Осуществить маркировку выводов обмотки НН согласно заданной схеме и группе соединения обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Приложение 21

П21. Формулы для расчета значений напряжений U_{bB} , U_{bC} , U_{cB}

Таблица П21.1. Формулы для расчета значений напряжений, используемых при проверке схем и групп соединения обмоток

Группа соединения	Угловое смещение ЭДС	Возможные схемы соединения обмоток	$U_{bB} (U_{xX})$	U_{bC}	U_{cB}
0	0°	Y/Y Д/Д Д/З	$U_{ab}(k_{л} - 1)$	$U_{ab}\sqrt{1 - k_{л} + k_{л}^2}$	
1	30°	Y/Д Д/У Y/З	$U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$		$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л}}$
2	60°	Y/Y Д/Д Д/З	$U_{ab}\sqrt{1 - k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}(k_{л} - 1)$	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л} + k_{л}^2}$
3	90°	Y/Д Д/У Y/З	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$
4	120°	Y/Y Д/Д Д/З	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}(1 + k_{л})$
5	150°	Y/Д Д/У Y/З	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$
6	180°	Y/Y Д/Д Д/З	$U_{ab}(1 + k_{л})$	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л} + k_{л}^2}$	
7	210°	Y/Д Д/У Y/З	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$		$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л}^2}$
8	240°	Y/Y Д/Д Д/З	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}(1 + k_{л})$	$U_{ab}\sqrt{1 - k_{л} + k_{л}^2}$
9	270°	Y/Д Д/У Y/З	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$
10	300°	Y/Y Д/Д Д/З	$U_{ab}\sqrt{1 - k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л} + k_{л}^2}$	$U_{ab}(k_{л} - 1)$
11	330°	Y/Д Д/У Y/З	$U_{ab}\sqrt{1 - k_{л}\sqrt{3} + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + k_{л}^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - k_{л}\sqrt{3} + k_{л}^2}$
			$U_{bB} (U_{xX})$	U_{bC}	U_{cB}

22. РАБОТА № 3.

НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Оглавление

1. Цель работы	400
2. Программа работы	400
3. Основы теории	401
3.1. Трансформатор со схемой соединения Y/U_H	401
3.2. Трансформатор со схемой соединения D/U_H	406
3.3. Трансформатор со схемой соединения Y/Z_H	407
4. Экспериментальное исследование	410
4.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке	410
4.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора	411
4.3. Аналитическое определение распределения токов трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке	414
4.4. Определение величины смещения нейтрали на основе векторной диаграммы	414
4.5. Аналитическое определение величины смещения нейтрали	415
5. Содержание и оформление отчета	416
6. Контрольные вопросы	417
Перечень рисунков в 22-м разделе	399
Перечень таблиц в 19- и 22-м разделах	399

Перечень рисунков в 22-м разделе

Рис. 22.1. Симметричные составляющие несимметричной трёхфазной системы вторичных токов I_a, I_b, I_c при однофазной нагрузке трансформатора	402
Рис. 22.2. Несимметричная трёхфазная система токов I_a, I_b, I_c вторичной обмотки трансформатора при однофазной нагрузке	402
Рис. 22.3. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора при однофазной нагрузке со схемой соединения: $a - Y/Y_n, \bar{b} - D/Y_n, \bar{в} - Y/Z_n$	403
Рис. 22.4. Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности: $a -$ схема соединений $Y/Y_n, \bar{b} -$ схема соединений D/Y_n	405
Рис. 22.5. К иллюстрации возникновения ЭДС нулевой последовательности (см. рис.22.2)	406
Рис. 22.6. Схема лабораторной установки для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения: $a - Y/Y_n, \bar{b} - D/Y_n, \bar{в} - Y/Z_n$	413

Перечень таблиц в 19- и 22-м разделах

Табл. 19.1. Номинальные данные трехфазного трансформатора типа ТС-2,5/0,269 (этот трансформатор исследуется в лабораторном цикле)	352
Табл. 22.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке	411
Табл. 22.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора	412

1. Цель работы

Провести сравнительный анализ влияния схемы соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора на искажение симметрии первичных и вторичных линейных и фазных напряжений. Овладеть методикой определения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения Y/Y_n , D/Y_n , Y/Z_n .

2. Программа работы

2.1. Собрать на лабораторном стенде, поочередно, схемы соединения обмоток трансформатора Y/Y_n , Y/Z_n , D/Y_n , нагрузить трансформатор однофазной нагрузкой, измерить распределение токов в обмотках, линейные и фазные напряжения.

2.2. Определить опытным путем для всех вышеуказанных схем величину сопротивления нулевой последовательности трансформатора в целом.

2.3. Рассчитать распределение токов в первичных обмотках и сравнить с результатами эксперимента (п. 2.1).

2.4. Построить в масштабе векторные диаграммы вторичных напряжений, на основании экспериментальных данных (п. 2.1). Определить из диаграмм величину смещения нейтрали (E_n).

2.5. Рассчитать величину смещения нейтрали для всех вышеуказанных схем. При расчете использовать экспериментальные данные (п.п. 2.1 и 2.2). Сравнить результаты расчета со значением E_n (п. 2.4).

3. Основы теории (разд. 15.8, с. 278, сл.)

В трансформаторе со схемой соединения обмоток U/U_n , U/Z_n или D/U_n при несимметричной нагрузке в токах вторичной обмотки имеют место составляющие нулевой последовательности. При отсутствии в первичной обмотке контуров для протекания токов нулевой последовательности (схемы U/U_n , U/Z_n) они не трансформируются в эту обмотку. Поэтому токи нулевой последовательности вторичной обмотки, не уравновешенные аналогичными токами первичной обмотки, являются намагничивающими, т. е. создают *основное магнитное поле нулевой последовательности*. Оно индуцирует в фазах первичной и вторичной обмоток электродвижущие силы нулевой последовательности, которые, накладываясь на ЭДС, обусловленные *основным магнитным потоком прямой последовательности*, искажают симметрию фазных напряжений.

В зависимости от устройства магнитопровода (*трехстержневой или групповой*) и схемы соединения обмоток (Y , D или Z), а также от режима нейтрали обмоток (*нейтральная точка изолирована или заземлена*) искажение симметрии различно.

На рис. 22.1 показаны симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности трехфазного тока, протекающего во вторичной обмотке трансформатора, при несимметричной *однофазной* нагрузке (загружена фаза $a-x$). На рис. 22.2 приведена система трехфазного тока \underline{I}_a , \underline{I}_b , \underline{I}_c вторичной обмотки трансформатора при этой нагрузке (метод симметричных составляющих основан на принципе наложения; допускаем: магнитная система исследуемого трансформатора не насыщена, что обуславливает возможность применения этого принципа).

3.1. Трансформатор со схемой соединения U/U_n (рис. 22.3,а)

Для упрощения анализа влияния схемы соединения на проявление составляющих нулевой последовательности будем рассматривать трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 1,0$ и током холостого хода $I_x = 0,0$.

В лабораторной установке все опыты проводятся на одном и том же трансформаторе, вторичная обмотка которого разделена на две равные секции, например, a_1-x_1 и a_2-x_2 . Число витков в каждой секции вторичной обмотки –

$W_2/2 = 147$. Число последовательно соединенных витков в фазе первичной обмотки – $W_1 = 240$. Токи первичной обмотки обозначим I_A, I_B, I_C , токи вторичной обмотки – I_a, I_b, I_c , ток в нейтральном проводе вторичной обмотки – I_n .

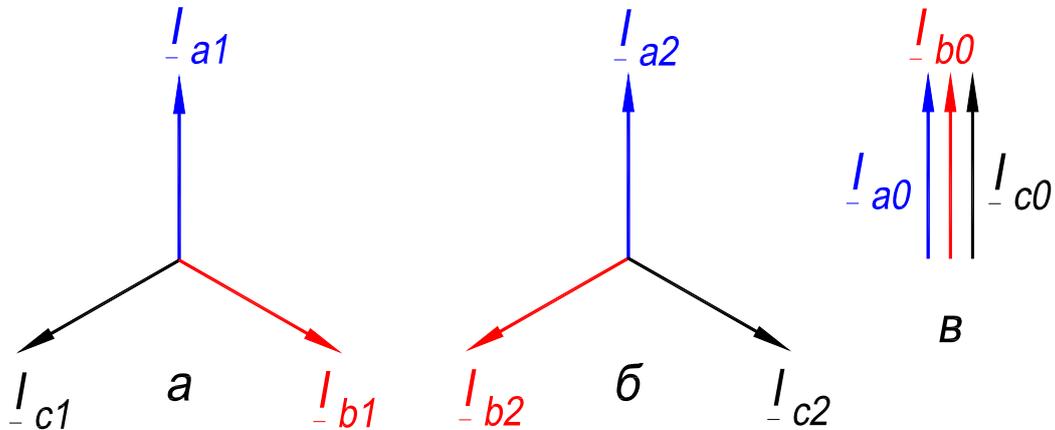


Рис. 22.1. Симметричные составляющие несимметричной трёхфазной системы вторичных токов I_a, I_b, I_c при однофазной нагрузке трансформатора;
 последовательность токов: a – прямая, b – обратная, c – нулевая

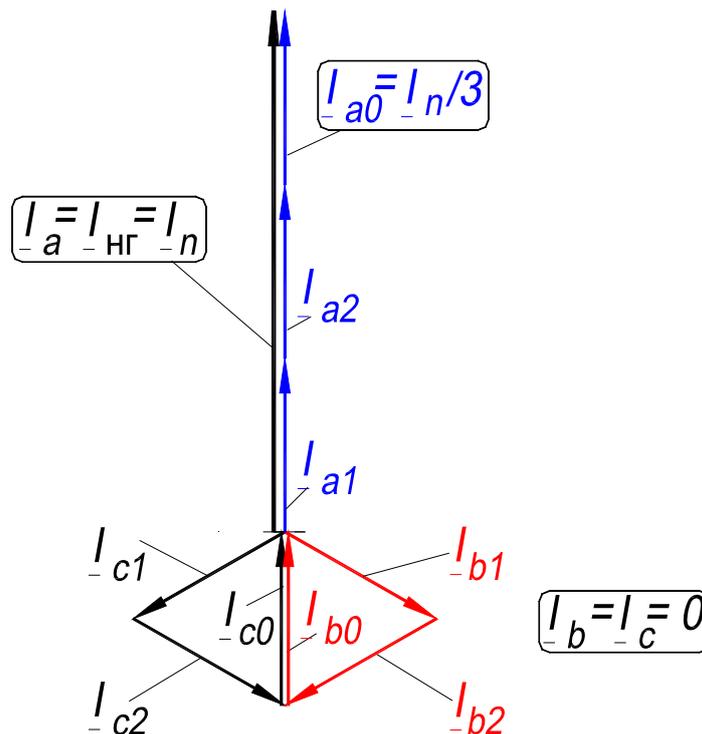


Рис. 22.2. Несимметричная трёхфазная система токов I_a, I_b, I_c вторичной обмотки трансформатора при однофазной нагрузке

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для магнитной цепи с учетом принятых допущений можно записать (обход по замкнутому контуру)

$$\underline{I}_A - \underline{I}_a + \underline{I}_b - \underline{I}_B = 0; \quad (22.1)$$

$$\underline{I}_A - \underline{I}_a + \underline{I}_c - \underline{I}_C = 0. \quad (22.2)$$

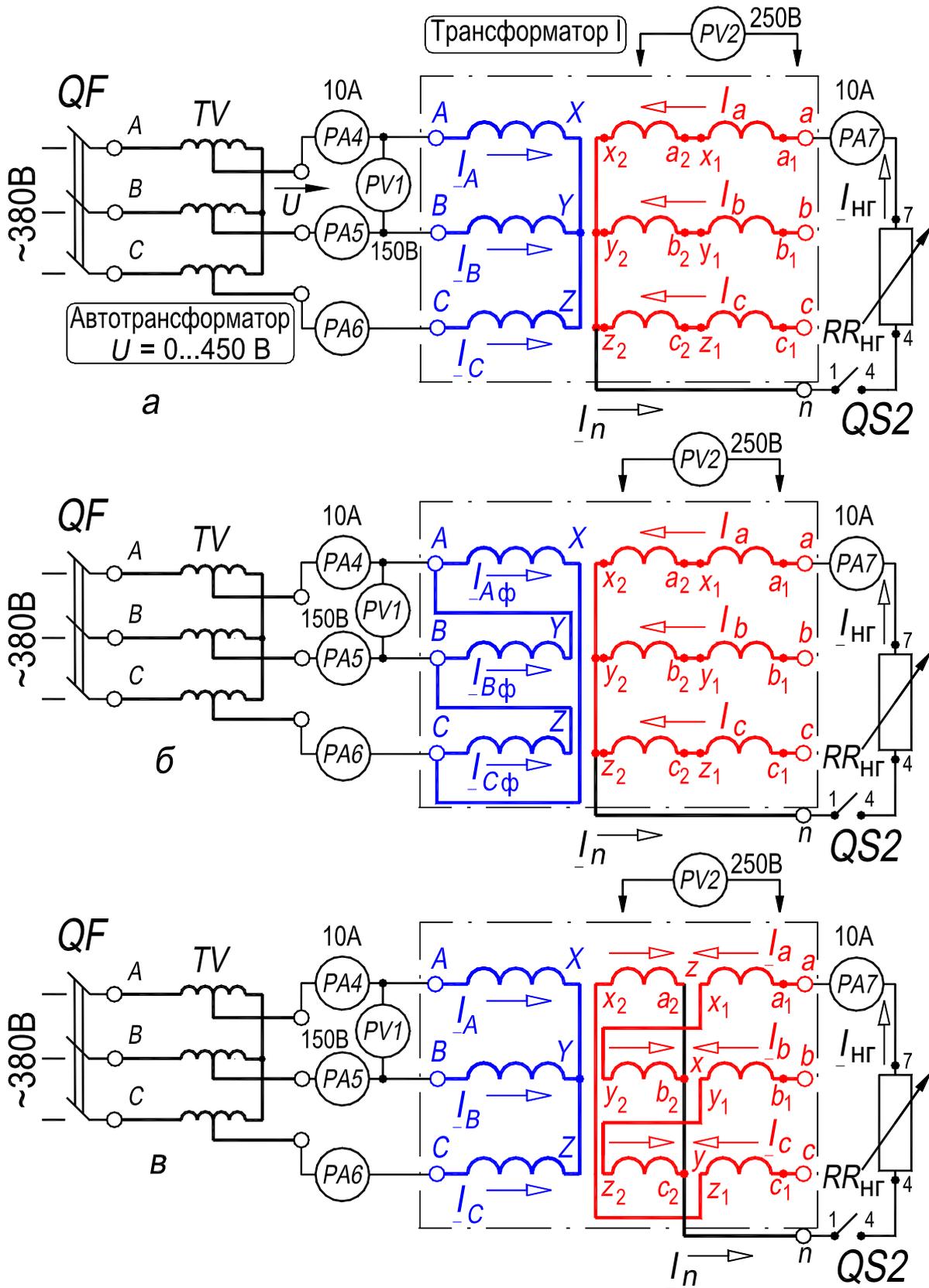


Рис. 22.3. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора при однофазной нагрузке со схемой соединения:

a – Y/Y_н, *б* – Д/Y_н, *в* – Y/Z_н

На основании (22.1) и (22.2) получаем

$$\underline{I}_A - \underline{I}_a = \underline{I}_B - \underline{I}_b = \underline{I}_C - \underline{I}_c. \quad (22.3)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа для электрической цепи имеем

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0; \quad (22.4)$$

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c - \underline{I}_n = 0. \quad (22.5)$$

Вычитая (22.5) из (22.4), запишем с учетом (22.3):

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a - \underline{I}_n/3 = \underline{I}_a - \underline{I}_{a0}. \quad (22.6)$$

Аналогично получим:

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b - \underline{I}_n/3 = \underline{I}_b - \underline{I}_{b0}; \quad (22.7)$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c - \underline{I}_n/3 = \underline{I}_c - \underline{I}_{c0}. \quad (22.8)$$

Из выражений (22.6), (22.7), (22.8) следует, что вторичные токи I_a , I_b , I_c не полностью трансформируются на первичную сторону трансформатора.

Некоторая доля, а именно ток $\underline{I}_n/3 = \underline{I}_{a0} = \underline{I}_{b0} = \underline{I}_{c0}$, являющийся током нулевой последовательности, протекает только во вторичной обмотке и замыкается через нейтральный провод. Токи нулевой последовательности \underline{I}_{a0} , \underline{I}_{b0} , \underline{I}_{c0} , совпадают во времени во всех фазах (рис. 22.1, в).

В частном случае, когда нагружена только одна фаза вторичной обмотки (например, фаза $a-x$), токи в фазах этой обмотки равны (рис. 22.3, а):

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{\text{нг}} = \underline{I}_n; \quad \underline{I}_b = \underline{I}_c = 0,$$

а фазные (линейные) токи первичной обмотки определяются из выражений:

$$\underline{I}_A = 2\underline{I}_{\text{нг}}k_{21}/3; \quad \underline{I}_B = -2\underline{I}_{\text{нг}}k_{21}/3; \quad \underline{I}_C = -2\underline{I}_{\text{нг}}k_{21}/3, \quad (22.9)$$

где $k_{21} = U_{ab}/U_{AB}$ – линейный коэффициент трансформации.

Схема замещения трансформатора для тока нулевой последовательности I_{a0} приведена на рис. 22.4, а (разд. 14.5, с. 250, сл.). На схеме замещения приняты следующие обозначения: $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ – полное сопротивление вторичной обмотки; X_{m0} – индуктивное сопротивление нулевой последовательности, обусловленное основным магнитным потоком нулевой последовательности Φ_0 ; R_{m0} – активное сопротивление нулевой последовательности,

обусловленное потерями в стали магнитопровода и в баке, вызванными потоком Φ_0 ; $\underline{Z}_{m0} = R_{m0} + jX_{m0}$ – полное сопротивление нулевой последовательности намагничивающей ветви 1-2 схемы замещения.

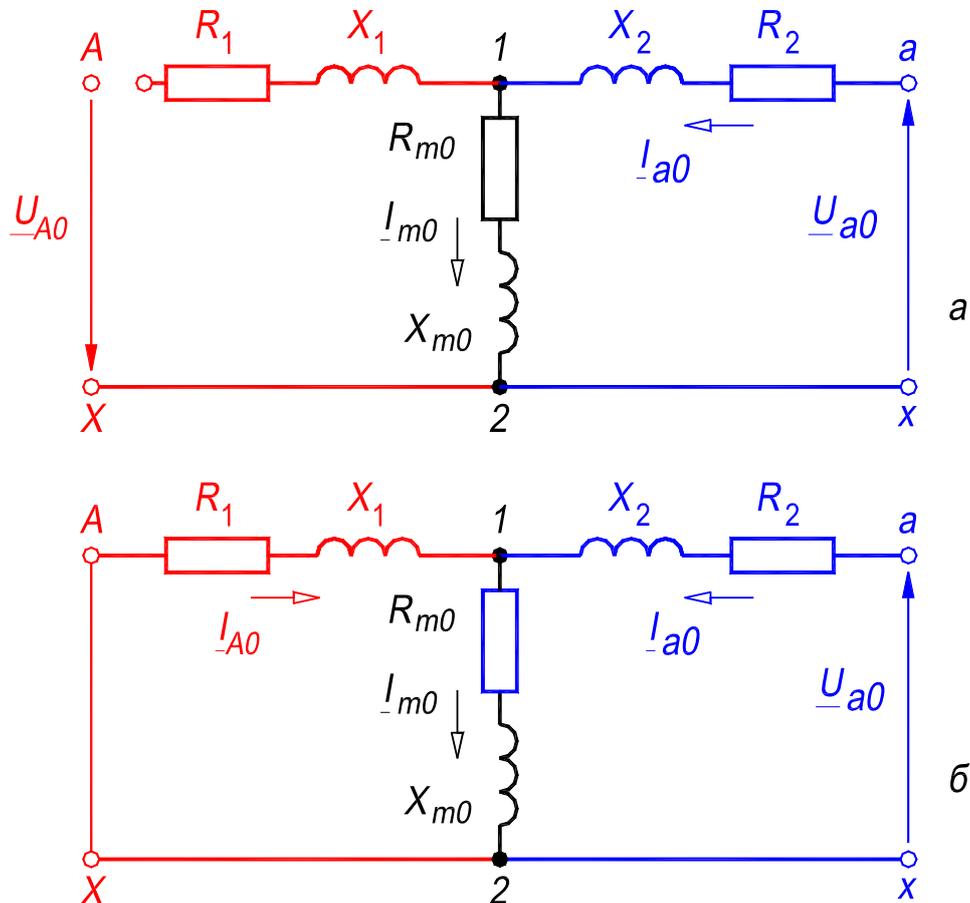


Рис. 22.4. Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности:
 а – схема соединений Y/Y_n , б – схема соединений D/Y_n

Сопротивление нулевой последовательности Z_{0n} трансформатора току нулевой последовательности I_{a0} в целом равно сумме сопротивлений Z_2 и Z_{m0} , то есть $Z_{0n} = Z_2 + Z_{m0}$, что составляет значительную величину.

Основной магнитный поток Φ_0 , созданный намагничивающим током нулевой последовательности $I_{a0} = I_{m0}$, замыкается в трехстержневом трансформаторе от ярма к ярму и индуцирует в фазах первичной и вторичной обмоток ЭДС нулевой последовательности, соответственно $\underline{E}_{A0} = \underline{E}_{B0} = \underline{E}_{C0}$ и $\underline{E}_{a0} = \underline{E}_{b0} = \underline{E}_{c0}$ (рис. 22.5). Фазные напряжения в этом случае будут равны (например, для фазы $A-X$ первичной обмотки и фазы $a-x$ вторичной обмотки):

$$\underline{U}_A = -\underline{E}_A - \underline{E}_{A0} + \underline{I}_A \underline{Z}_1; \quad \underline{U}_a = \underline{E}_a + \underline{E}_{a0} - \underline{I}_a \underline{Z}_2; \quad (22.10)$$

Электродвижущие силы нулевой последовательности, направленные во всех фазах на комплексной плоскости в одну сторону, вызывают искажение симметрии системы фазных напряжений как первичной, так и вторичной обмоток. При построении векторной диаграммы (рис. 22.5) не учитывались потери в стали, обусловленные магнитным потоком нулевой последовательности.

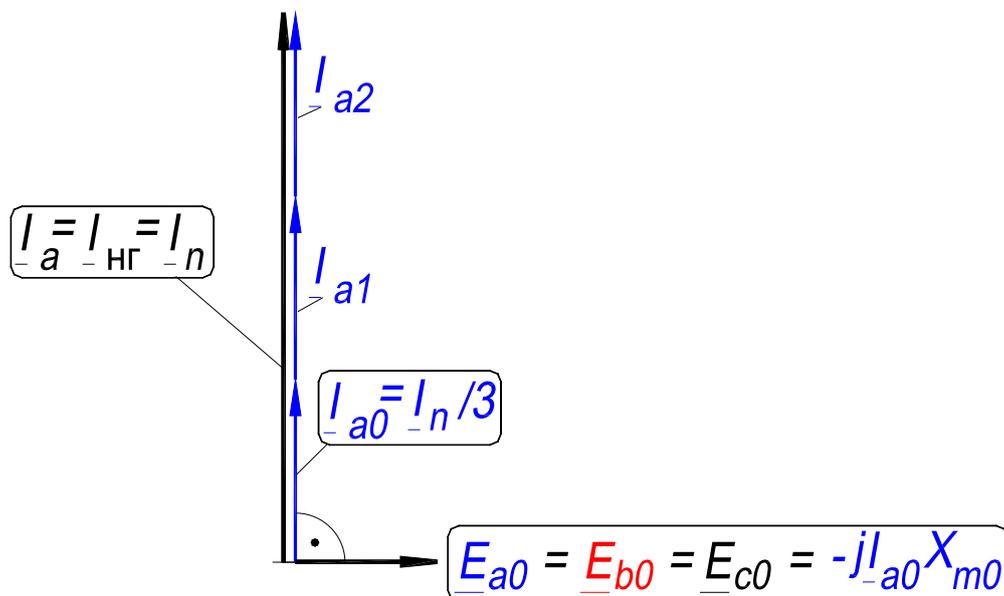


Рис. 22.5. К иллюстрации возникновения ЭДС нулевой последовательности (см. рис. 22.2)

Таким образом, в трансформаторе с соединением обмоток Y/Y_n токи нулевой последовательности могут вызвать сильные искажения значений фазных напряжений, что неприемлемо и опасно для потребителей.

3.2. Трансформатор со схемой соединения D/Y_n (рис. 22.3,б)

Схема D/Y_n позволяет существенно уменьшить величину основного магнитного потока нулевой последовательности Φ_0 и, следовательно, величину ЭДС нулевой последовательности. В замкнутом контуре первичной обмотки могут протекать токи нулевой последовательности (они индуцируются с вторичной стороны) и поэтому магнитодвижущие силы нулевой последовательности вторичной и первичной обмоток практически уравниваются.

С учетом допущения, что ток холостого хода равен нулю, фазные и линейные токи определяются из выражений:

$$\underline{I}_{A\phi} = -k_{21}\underline{I}_A; \underline{I}_A = \underline{I}_{A\phi} - \underline{I}_{B\phi}; \quad (22.11)$$

$$\underline{I}_{B\phi} = -k_{21}\underline{I}_b; \underline{I}_B = \underline{I}_{B\phi} - \underline{I}_{C\phi}; \quad (22.12)$$

$$\underline{I}_{C\phi} = -k_{21}\underline{I}_c; \underline{I}_C = \underline{I}_{C\phi} - \underline{I}_{A\phi}; \quad (22.13)$$

В частном случае, при однофазной нагрузке (нагружена фаза a -х вторичной обмотки), имеем: $\underline{I}_a = \underline{I}_{\text{нг}} = \underline{I}_n$; $\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0$ (рис. 22.3,б). Фазные и линейные токи определяются из выражений:

$$\underline{I}_{A\phi} = -k_{21}\underline{I}_{\text{нг}}; \underline{I}_A = -k_{21}\underline{I}_{\text{нг}}; \quad (22.14)$$

$$\underline{I}_{B\phi} = 0; \underline{I}_B = 0; \quad (22.15)$$

$$\underline{I}_{C\phi} = 0; \underline{I}_A = +k_{21}\underline{I}_{\text{нг}}. \quad (22.16)$$

Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности приведена на рис. 22.4,б. (разд. 14.5, с. 250,сл.). Намагничивающий ток нулевой последовательности в этой схеме пренебрежимо мал, так как сопротивление Z_{m0} существенно больше сопротивления $Z_k = Z_1 + Z_2$ (для трехстержневого трансформатора $Z_{m0} \approx (7 - 15) Z_k$). Также малы магнитный поток Φ_0 и ЭДС нулевой последовательности.

Сопротивление нулевой последовательности Z_{0n} трансформатора току нулевой последовательности в целом примерно равно сумме сопротивлений Z_1 и Z_2 , то есть $Z_{0n} \approx Z_k$, что составляет относительно небольшую величину.

Несимметрия напряжения невелика и определяется падениями напряжения на сопротивлениях Z_1 и Z_2 обмоток трансформатора. Поскольку напряжения на фазах трансформатора при несимметричной нагрузке сравнительно симметричны, схема D/U_n предпочтительнее при преобладании однофазных нагрузок. Недостатком схемы является то, что непосредственно к фазной обмотке трансформатора прикладывается линейное напряжение сети, что повышает требования к фазной изоляции.

3.3. Трансформатор со схемой соединения U/Z_n (рис. 22.3,в)

Особенностью схемы «зигзаг» является то, что каждую фазу обмотки разделяют на две равные части (полуфазы), которые располагают на разных стержнях магнитопровода и соединяют между собой последовательно и встречно. ЭДС фазы обмотки, соединенной в «зигзаг», равна

геометрической разности ЭДС полуфаз, которые сдвинуты на 120° (см. рис. 21.8 в описании Работы № 2, с. 383). Поэтому для достижения равенства фазных ЭДС обмотки, соединенной по схеме «звезда», и обмотки, соединенной по схеме «зигзаг», число витков последней должно быть увеличено в $2/\sqrt{3} \approx 1,15$ раза (разд. 19, с. 351, сл.). Это является недостатком схемы «зигзаг», так как при таком соединении увеличивается расход обмоточного провода. Число витков в каждой секции вторичной обмотки исследуемого трансформатора – $W_2/2 = 147$. Число последовательно соединенных витков в фазе первичной обмотки – $W_1 = 240$.

Первичные токи трансформатора, с учетом коэффициента трансформации, определяются по выражениям:

$$\underline{I}_A = k_{21}(\underline{I}_a - \underline{I}_c)/\sqrt{3}; \quad (22.17)$$

$$\underline{I}_B = k_{21}(\underline{I}_b - \underline{I}_a)/\sqrt{3}; \quad (22.18)$$

$$\underline{I}_C = k_{21}(\underline{I}_c - \underline{I}_b)/\sqrt{3}; \quad (22.19)$$

В частном случае для однофазной нагрузки (например, нагружена фаза a -х вторичной обмотки), имеем: $\underline{I}_a = \underline{I}_{\text{нг}} = \underline{I}_n$; $\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0$. Фазные (линейные) токи определяются из выражений (рис. 22.3, в):

$$\underline{I}_A = k_{21}\underline{I}_{\text{нг}}/\sqrt{3}; \underline{I}_B = -k_{21}\underline{I}_{\text{нг}}/\sqrt{3}; \underline{I}_C = 0. \quad (22.20)$$

В трансформаторе со схемой соединения обмоток Y/Z_n токи нулевой последовательности вторичной обмотки в первичную не трансформируются (так как в первичной обмотке для них нет проводящего контура). Магнитодвижущие силы нулевой последовательности полуфаз вторичной обмотки, расположенных на каждом стержне, направлены навстречу друг к другу и в значительной степени взаимно компенсируются (см. рис. 22.3, в). Поэтому основной магнитный поток Φ_0 и ЭДС нулевой последовательности, а также сопротивление нулевой последовательности Z_{m0} сравнительно невелики.

Сопротивление нулевой последовательности Z_{0n} трансформатора току нулевой последовательности в целом несколько меньше сопротивления Z_k трансформатора и составляет относительно небольшую величину.

Несимметрия напряжения невелика и определяется падениями напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора. Рассматриваемая схема применяется при наличии однофазных токоприемников, влияющих на несимметрию нагрузки. *В частности, трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Z_N рекомендуется применять для сельской электрификации.*

Согласно ГОСТ 11677–85, *двухобмоточный трансформатор должен быть рассчитан на продолжительную нагрузку нейтрали обмотки НН:*

- до 25 % номинального тока обмотки НН – для схемы Y/Y_N ;
- до 75 % номинального тока обмотки НН – для схемы D/Y_N ;
- до 75 % номинального тока обмотки НН – для схемы Y/Z_N .

При этом ни в одной из фаз ток не должен превышать 1,05 номинального значения.

Практически симметричная трехфазная система напряжений – такая трехфазная система напряжений, для которой напряжение обратной последовательности не превышает 1 % от напряжения прямой последовательности (при разложении данной трехфазной системы напряжений на системы прямой и обратной последовательности).

Практически симметричная трехфазная система токов – такая трехфазная система токов, для которой ток обратной последовательности не превышает 5 % от тока прямой последовательности (при разложении данной трехфазной системы токов на системы прямой и обратной последовательности).

4. Экспериментальное исследование трансформатора

Работа выполняется на лабораторной установке в состав которой входят: исследуемый трёхфазный трёхстержневой трансформатор I, источник регулируемого напряжения – автотрансформатор TV и трёхфазный нагрузочный реостат $RR_{нг}$ (в опытах используется только одна его фаза). Фотографии установки представлены на рис. П1, П2, П3, с. 25, 26.

Схемы включения трансформатора для проведения экспериментальных исследований приведены на рис. 22.3 и 22.6 (с. 403 и 413).

Описание устройства исследуемого трансформатора и значения номинальных данных – см. разд. 19, с. 351, сл.

Записать номинальные данные исследуемого трансформатора (термины 60 – 63 на с. 147).

4.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке

(разд. 15.8, Г, Д, с. 283, сл.)

Обмотки трансформатора I соединять поочередно в соответствии со схемами, представленными на рис. 22.3,а, 22.3,б и 22.3,в. В качестве нагрузки использовать одну фазу трехфазного реостата $RR_{нг}$.

1. Собрать схему соединений обмоток трансформатора V/U_H , представленную на рис. 22.3,а.

2. Установить рукоятку автотрансформатора TV в положение, соответствующее его выходному напряжению $U \approx 0$ В.

3. Включить автомат QF , на схеме установлено напряжение $U_1 = U \approx 0$ В.

4. На первичной обмотке исследуемого трансформатора с помощью автотрансформатора TV увеличить напряжение U_1 до значения, примерно равного половине номинального.

5. Переключая ступени реостата $RR_{нг}$ нагрузить трансформатор однофазной нагрузкой так, чтобы ток во вторичной обмотке был приближен к номинальному значению, $I_a = I_{нг} = 6$ А (амперметр $PA7$). Показания амперметров ($PA4$, $PA5$, $PA6$ и $PA7$) и значения линейных и фазных напряжений обмоток (вольтметры $PV1$ и $PV2$) занести в соответствующую строку табл. 22.1.

6. Отключить автомат QF , рукоятку автотрансформатора TV установить в положение «0».

7. Повторить опыт (п.п. 1 – 6) для схем соединений D/Y_H и Y/Z_H .

Таблица 22.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке

Схема соединения	Первичная обмотка								Вторичная обмотка						
	Измерение				Расчет				Измерение						
	U_{AB}	I_A	I_B	I_C	k_{21}	I_A	I_B	I_C	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	$U_{aф}$	$U_{bф}$	$U_{сф}$	$I_{нл}=I_a$
	В	А	А	А	–	А	А	А	В	В	В	В	В	В	А
Y/Y_H															6
D/Y_H															6
Y/Z_H															6

4.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора

Для определения величины сопротивления трансформатора току нулевой последовательности поочередно собрать схемы, приведенные на рис. 22.6,а, 22.6,б и 22.6,в.

Поскольку при несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности возникает во вторичной обмотке трансформатора, последнюю при определении опытным путем сопротивления нулевой последовательности $Z_{0п}$ используют в качестве питающей обмотки, подводя к ней напряжение U однофазного переменного тока. Однофазный ток I при этом соответствует току нулевой последовательности (рис. 22.6).

1. Собрать схему, представленную на рис. 22.6,а, эквивалентную схеме соединений обмоток трансформатора Y/Y_H .

2. Установить рукоятку автотрансформатора TV в положение, соответствующее его выходному напряжению $U \approx 0$ В.

3. Включить автомат QF , на схеме установлено напряжение $U_1 = U \approx 0$ В.

4. На первичной обмотке исследуемого трансформатора с помощью автотрансформатора TV постепенно увеличивать напряжение $U_1 = U$, переключая ступени реостата $RR_{нг}$. Установить ток I , измеряемый амперметром $PA4$, равным току однофазной нагрузки: $I_{нг} = I_a = 6$ А (см. табл. 22.1).

5. Показания амперметра $PA4$, вольтметра $PV2$ и ваттметра PW занести в соответствующую строку табл. 22.2.

6. Отключить автомат QF , рукоятку автотрансформатора TV установить в положение «0».

7. Повторить опыт (п.п. 1 – 6) для схем, эквивалентных схемам соединений D/Y_H и Y/Z_H .

Таблица 22.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора

Схема соединения	Измерение				Расчет				
	U	P	I	E_n	Z_{0n}	R_{0n}	X_{0n}	$I_{0n} = I_{нг}/3$	E_{0n}
	В	Вт	А	В	Ом	Ом	Ом	А	В
Y/Y_H			6					2	
D/Y_H			6					2	
Y/Z_H			6					2	

Величину сопротивления трансформатора току нулевой последовательности Z_{0n} и его составляющих рассчитать по формулам:

$$Z_{0n} = U/3I; R_{0n} = P/3I^2; X_{0n} = (Z_{0n}^2 - R_{0n}^2)^{1/2},$$

где P – активная мощность, потребляемая трансформатором из сети.

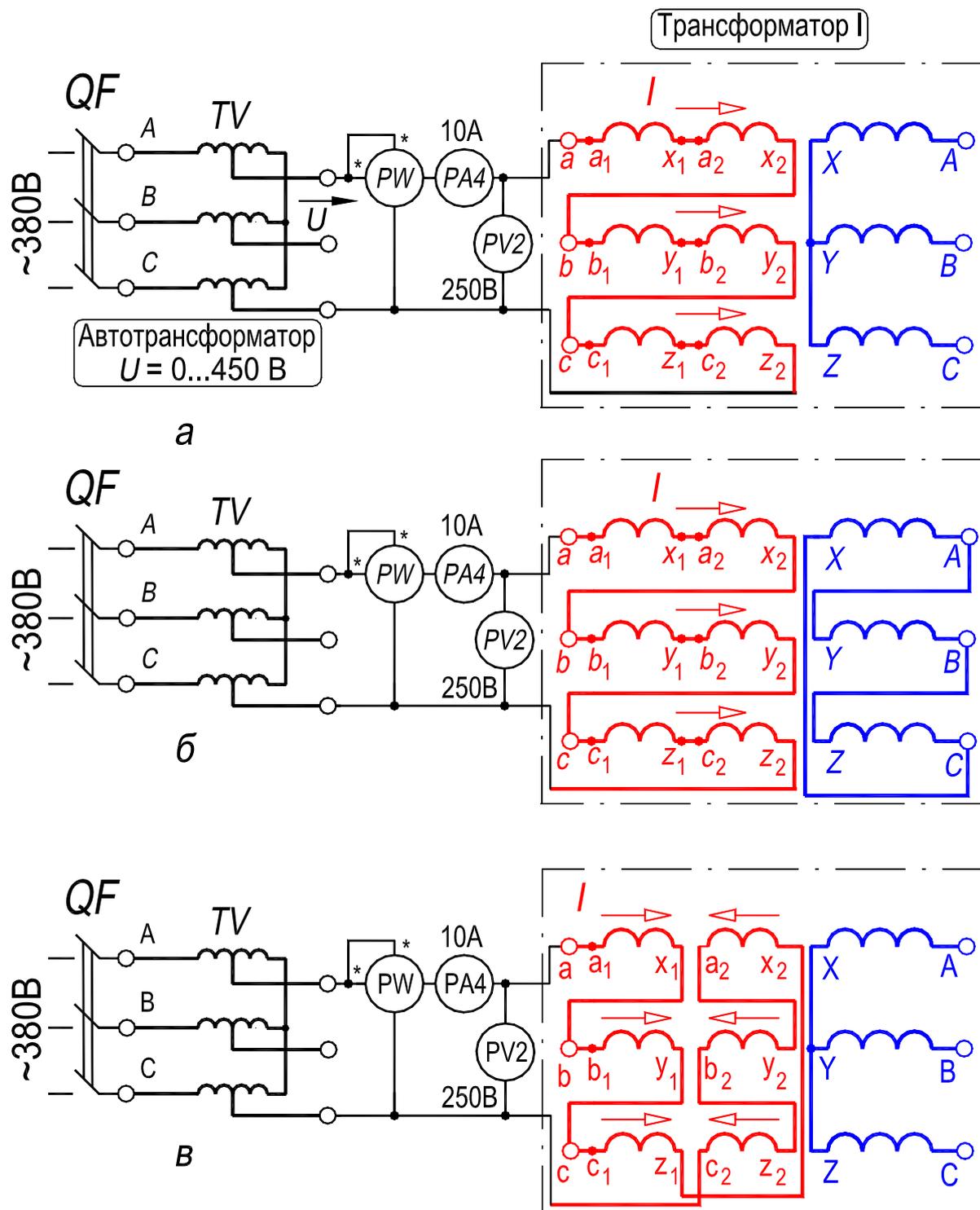


Рис. 22.6. Схема лабораторной установки для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения:

a – Y/Y_n , *б* – D/Y_n , *в* – Y/Z_n

4.3. Аналитическое определение распределения токов трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке

Распределение линейных токов I_A , I_B , I_C первичной обмотки рассчитать по формулам, представленным в разд. 3:

- для схемы Y/Y_H – по формулам (22.9),
- для схемы D/Y_H – по формулам (22.14), (22.15) и (22.16),
- для схемы Y/Z_H – по формулам (22.20).

Результаты расчетов занести в табл. 22.1 (графа «Расчет») и сравнить с распределением токов, полученным из опыта (графа «Измерение»). Необходимо учесть, что при выводе формул (22.9), (22.14), (22.15), (22.16) и (22.20) величина тока холостого хода принята равной нулю.

4.4. Определение величины смещения нейтрали на основе векторной диаграммы

Для определения и анализа величины смещения нейтрали (ЭДС E_n) при схемах соединений обмоток Y/Y_H , D/Y_H , Y/Z_H необходимо построить векторную диаграмму линейных U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} и фазных U_{af} , U_{bf} , U_{cf} напряжений вторичной обмотки для каждой из указанных схем (см. данные в табл. 22.1, графа «Вторичная обмотка»).

1. На миллиметровой бумаге с помощью циркуля и линейки построить треугольник линейных напряжений и звезду фазных напряжений (принять масштаб – 10 В/см).

2. Для определения величины ЭДС E_n найти центр тяжести (точка пересечения медиан) треугольника линейных напряжений и измерить в сантиметрах расстояние между центром тяжести и нейтральной точкой звезды фазных напряжений. Полученная величина является ЭДС E_n , см.

3. Выразить ЭДС E_n в вольтах и результат записать в табл. 22.2 (графа «Измерение»).

4. Пункты 1 – 3 выполнить последовательно для схем соединений обмоток Y/Y_H , D/Y_H , Y/Z_H .

4.5. Аналитическое определение величины смещения нейтрали

Определить величину смещения нейтрали по данным, представленным в табл. 22.2 для каждой из схем соединений обмоток Y/Y_H , D/Y_H , Y/Z_H .

Величину смещения нейтрали определить по формуле

$$E_{0n} \approx I_{0n}Z_{0n}.$$

Величину тока нулевой последовательности определить так

$$I_{0n} = I_n/3 = I_{нГ}/3 = 2 \text{ А},$$

где $I_{нГ} = I_a = 6 \text{ А}$ есть ток однофазной нагрузки (табл. 22.1).

Расчетные значения ЭДС E_{0n} и значение тока I_{0n} для рассматриваемых схем занести в табл. 22.2 (графа «Расчет») и сравнить со значениями ЭДС E_n , полученными из векторных диаграмм (табл. 22.2, графа «Измерение»).

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

8. Титульный лист.
9. Оглавление.
10. Программу лабораторной работы (с. 400).
11. Номинальные данные исследованного трансформатора (разд. 19, с. 351).
12. Схемы испытаний, рис. 22.3 и 22.6.
13. Результаты опытов, представленные в таблицах 22.1 и 22.2.
21. Формулы по которым осуществлялись расчёты; расположить соответствующие формулы ниже таблиц 22.1 и 22.2.
22. Построения векторных диаграмм, выполненные в масштабе (10 В/см) по данным табл. 22.1, в соответствии с разд. 4.4, представленные на листе миллиметровой бумаги (формат А4); на листе указать значения ЭДС E_n , выраженные в вольтах.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Трансформаторы подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

Образец оформления отчета по лабораторной работе приведён в прил. 2, с. 451, сл.

6. Контрольные вопросы

1. Какая схема соединения обмоток трансформатора обуславливает неуравновешенность его магнитной системы (по отношению к основному потоку нулевой последовательности)?
2. Как влияет конструкция магнитной системы на работу трансформатора при несимметричной нагрузке?
3. С какой целью в силовых трансформаторах стремятся уменьшить величину потоков нулевой последовательности, каким образом это делается?
4. Почему ограничивается величина тока в нейтральном проводе? Какова его допустимая величина, если на подстанции установлен трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n ? Какова величина допустимой несимметрии напряжений?
5. Что такое сопротивление нулевой последовательности трансформатора в целом, почему схема соединения обмоток влияет на его величину?

23. РАБОТА № 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Оглавление

1.	Цель работы	420
2.	Программа работы	420
3.	Основы теории	421
3.1.	Холостой ход однофазного трансформатора	421
3.2.	Холостой ход трехфазного группового трансформатора	426
3.2.1.	Схема соединения обмоток U/U	426
3.2.2.	Схема соединения обмоток D/U	430
3.2.3.	Схема соединения обмоток U/D	430
3.3.	Холостой ход трехфазного трехстержневого трансформатора	432
3.3.1.	Схема соединения обмоток U/U	432
3.3.2.	Схема соединения обмоток U/D	434
3.3.3.	Схема соединения обмоток D/U	436
4.	Экспериментальное исследование	438
4.1.	Трансформатор со схемой соединения обмоток U/U	438
4.2.	Трансформатор со схемой соединения обмоток U/D	440
4.3.	Трансформатор со схемой соединения обмоток D/U	442
5.	Содержание и оформление отчета	444
6.	Контрольные вопросы	445
Перечень рисунков в 23-м разделе		419
Перечень таблиц в 19- и 23-м разделах		419

Перечень рисунков в 23-м разделе

Рис. 23.1. Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода	422
Рис. 23.2. Магнитная характеристика магнитопровода трансформатора	423
Рис. 23.3. Определение формы кривой тока холостого хода: <i>a</i> – реактивная составляющая $I_{x,p}$ тока; <i>b</i> – полный ток I_x	425
Рис. 23.4. Гармонический состав реактивной составляющей тока холостого хода однофазного трансформатора	425
Рис. 23.5. Иллюстрация совпадения по фазе третьих гармоник в фазах трёхфазной системы	426
Рис. 23.6. Определение формы кривой магнитного потока: <i>a</i> – при синусоидальном токе; <i>b</i> – разложение в гармонический ряд	427
Рис. 23.7. Форма кривой фазной ЭДС при наличии третьей гармоники в магнитном потоке стержня	429
Рис. 23.8. Возникновение потокосцепления Ψ_3 , обусловленного токами i_3 тройной частоты, создающего электромагнитные помехи в линиях связи	430
Рис. 23.9. Намагничивающие токи при соединении первичной обмотки треугольником, вторичной – звездой в групповом трехфазном трансформаторе	431
Рис. 23.10. Векторная диаграмма третьей гармоники – <i>a</i> ; определение реактивной составляющей тока – <i>b</i>	432
Рис. 23.11. Магнитное поле в трёхфазном трёхстержневом трансформаторе	433
Рис. 23.12. Реактивные составляющие намагничивающего тока трёхстержневого трансформатора; схема соединения обмоток U/U (иллюстрация несимметрии токов, обусловленная несимметрией магнитопровода)	434
Рис. 23.13. Форма кривой намагничивающего тока, протекающего во вторичной обмотке, соединённой треугольником	435
Рис. 23.14. Реактивные составляющие намагничивающего тока трёхстержневого трансформатора; схема соединения обмоток U/D	435
Рис. 23.15. Реактивные составляющие намагничивающего тока трёхстержневого трансформатора; схема соединения обмоток D/U	436
Рис. 23.16. Электрическая схема установки для исследования явлений, возникающих при намагничивании магнитопровода трансформатора	439

Перечень таблиц в 19- и 23-м разделах

Табл. 19.1. Номинальные данные трехфазного трансформатора типа ТС-2,5/0,269 (этот трансформатор исследуется в лабораторном цикле)	352
Табл. 23.1. Данные исследования трансформатора со схемой соединения обмоток U/U ..	440
Табл. 23.2. Данные исследования трансформатора со схемой соединения обмоток U/D ..	441
Табл. 23.3. Данные исследования трансформатора со схемой соединения обмоток D/U ..	443

1. Цель работы

Изучить причины возникновения высших гармоник тока, потока и ЭДС в трансформаторах; степень влияния конструкции магнитопровода, схемы соединения обмоток и величины питающего напряжения на частотный спектр тока, потока и ЭДС, а также степень влияния отрицательного воздействия высших гармоник на режимы работы электротехнического оборудования. Исследовать способы устранения высших гармоник или исключения их влияния.

2. Программа работы

2.1. Собрать трехфазный *групповой* трансформатор по заданной схеме, используя три однофазных *броневых* трансформатора;

2.1.1. В режиме холостого хода измерить линейные и фазные напряжения, токи первичной и вторичной обмоток;

2.1.2. Снять копии осциллограмм всех измеряемых величин;

2.1.3. Для каждой схемы определить величину третьей гармоники тока или ЭДС.

2.2. Провести указанное исследование для *трехстержневого* трехфазного трансформатора.

3. Основы теории

Процесс намагничивания магнитной системы трансформатора сопровождается рядом явлений, которые могут оказывать влияние на его работу. Характер этих явлений зависит от конструкции магнитопровода, числа фаз и схем соединения обмоток трансформатора. Особый характер намагничивания магнитной системы трансформатора имеет место при включении его в сеть на холостой ход (см. разд. 17.4, с. 308, сл.).

3.1. Холостой ход однофазного трансформатора

При рассмотрении процесса намагничивания будем исходить из того, что приложенное к трансформатору напряжение является синусоидальным, а трансформатор работает в режиме холостого хода (х. х.). Если пренебречь относительно небольшим значением падения напряжения $I_x Z_1$, то уравнение равновесия напряжений u_1 первичной обмотки трансформатора записывается в виде:

$$u_1 = -e_1 = W_1 d\Phi/dt, \quad (23.1)$$

где W_1 – число витков первичной обмотки; Φ – мгновенное значение основного магнитного потока.

Поэтому при синусоидальном напряжении сети магнитный поток Φ также должен изменяться во времени t практически по синусоидальному закону:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (23.2)$$

где Φ_m – амплитудное значения магнитного потока; $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50$ рад/с – угловая частота напряжения сети.

Мгновенное значение фазной ЭДС e_1 , индуцируемой основным магнитным потоком в обмотке трансформатора, определяется так:

$$e_1 = -W_1 d\Phi/dt = -W_1 d(\Phi_m \sin \omega t)/dt = -\omega W_1 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2), \quad (23.3)$$

где $\omega W_1 \Phi_m = 2\pi f W_1 \Phi_m$ – амплитудное значение ЭДС первичной обмотки, а ее действующее значение составляет

$$E_1 = \omega W_1 \Phi_m / \sqrt{2} = 2\pi f W_1 \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44 f W_1 \Phi_m. \quad (23.4)$$

Из сопоставления (23.2) и (23.3) следует, что *фазная ЭДС отстает от магнитного потока на угол $\pi/2$ рад.*

На рис. 23.1 приведена векторная диаграмма трансформатора при х. х., которая интерпретирует графически уравнение равновесия напряжений первичной обмотки трансформатора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_x \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_x R_1 + j \underline{I}_x X_1, \quad (23.5)$$

где R_1 – активное сопротивление фазы первичной обмотки, X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы первичной обмотки. Оно обусловлено её магнитным потоком рассеяния $\Phi_{1\sigma}$.

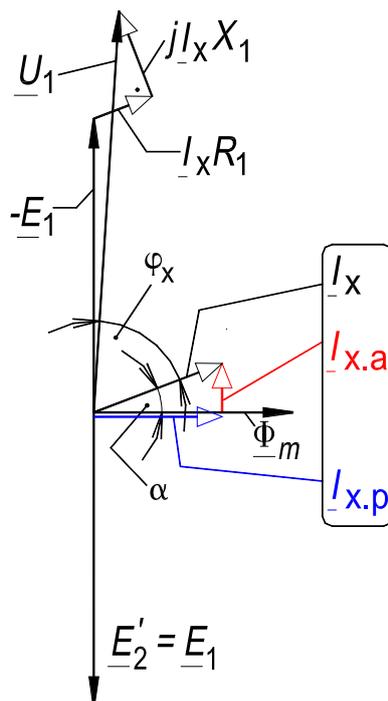


Рис. 23.1. Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Трансформатор, работая в режиме х. х., потребляет из сети ток холостого хода I_x , который имеет две составляющие: активную – $I_{x.a}$ и реактивную – $I_{x.p}$. Активной составляющей тока х. х. соответствует активная мощность, потребляемая трансформатором из сети и затрачиваемая на покрытие магнитных потерь в стали (электрические потери в обмотке при х. х. пренебрежимо малы); реактивной составляющей тока х. х. соответствует *реактивная мощность, потребляемая трансформатором из сети и затрачиваемая на создание магнитного поля*. Реактивная составляющая тока холостого хода называется *намагничивающим током* (разд. 12, с. 216, сл.).

Во всех трансформаторах и электрических машинах переменного тока реактивная мощность затрачивается на создание магнитного поля устройства

Как следует из рис. 23.1, вектор тока \underline{I}_x опережает вектор основного магнитного потока на угол α . Угол α обусловлен магнитными потерями в стали и называется углом магнитного запаздывания.

Очевидно, что при синусоидальном первичном напряжении U_1 активная составляющая $I_{x.a}$ тока х. х. также синусоидальна.

Пренебрегая потерями в стали, потребляемый из сети ток холостого хода можно принять чисто реактивным: $I_x = I_{x.p}$. Между мгновенными значениями реактивной составляющей $I_{x.p}$ тока х. х. и магнитного потока Φ первичной обмотки существует нелинейная зависимость, определяемая свойствами электротехнической стали, размерами и конструкцией магнитной системы. Примерный вид этой зависимости, носящей название магнитной характеристики, представлен на рис. 23.2. Она может быть аппроксимирована* выражением вида:

$$I_{x.p} = a\Phi + b\Phi^\beta, \quad (23.6)$$

где a , b и показатель степени β – коэффициенты аппроксимации – могут быть найдены по двум точкам характеристики и ее начальному наклону к оси абсцисс.

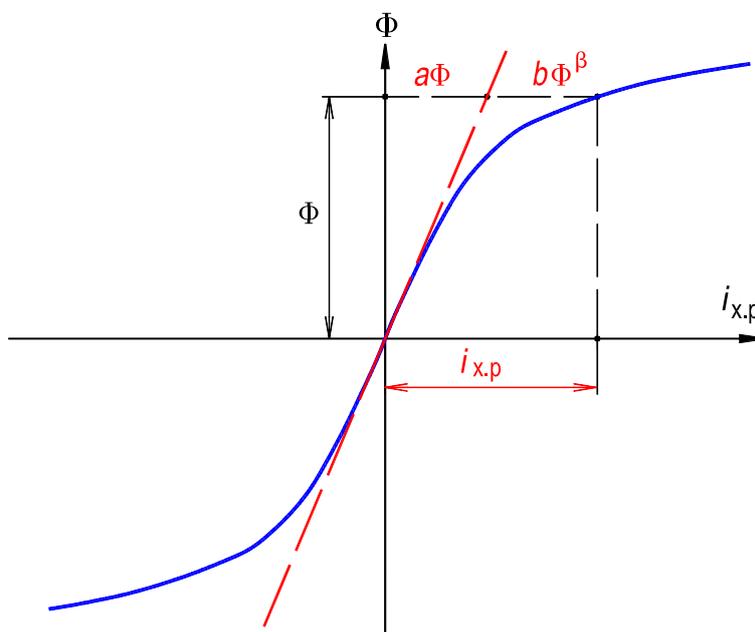


Рис. 23.2. Магнитная характеристика магнитопровода трансформатора

Подставив формулу (23.2) в (23.6), после ряда преобразований получим выражение для реактивной составляющей тока х. х.:

$$i_{x.p} = a\Phi_m \sin \omega t + b\Phi_m^\beta \sin^\beta \omega t =$$

* аппроксимация – (лат. *approximo* – приближение).

$$= I_{1x,p} \sin \omega t - I_{3x,p} \sin 3\omega t + I_{5x,p} \sin 5\omega t - I_{7x,p} \sin 7\omega t + I_{9x,p} \sin 9\omega t - \\ - I_{11x,p} \sin 11\omega t + I_{13x,p} \sin 13\omega t - I_{15x,p} \sin 15\omega t + \dots, \quad (23.7)$$

где $I_{1x,p}$ – амплитуда 1-й гармоники реактивной составляющей тока x . x .; $\mu = 3, 9, 15, \dots$ – порядок высшей гармоники реактивной составляющей тока, кратной трём [в общем виде $\mu = m \cdot (2 \cdot k - 1)$, $m = 3$, $k = 1, 2, 3, \dots$]; $\nu = 5, 7, 11, 13, \dots$ – порядок высшей гармоники реактивной составляющей тока [в общем виде $\nu = 6 \cdot k \mp 1$, $k = 1, 2, 3, \dots$]; $I_{\mu x,p}$, $I_{\nu x,p}$ – амплитуда гармоник порядка μ , ν ; $\mu \cdot \omega$, $\nu \cdot \omega$ – угловая частота колебаний гармоник. Угловая частота 3-й гармоники ($\mu = 3$) составляет $3 \cdot \omega = 3 \cdot 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 150$ рад/с.

Как следует из (23.7), *реактивная* составляющая тока x . x . содержит кроме первой гармоники спектр нечетных высших гармоник порядков $\mu = 3, 9, 15, \dots$ и $\nu = 5, 7, 11, 13, \dots$ (*активная* составляющая тока изменяется по синусоидальному закону и не содержит высших гармоник). В реактивной составляющей тока наиболее сильно выражена 3-я гармоника, причем *амплитуда ее зависит от насыщения стали магнитопровода и от формы магнитной характеристики*. Амплитуда 3-й гармоники может достигать примерно 30 % от амплитуды 1-й гармоники, а у 5-й гармоники – 15 %.

Форма кривой тока $I_{x,p}$, указывающая на наличие в ней высших гармоник, может быть легко найдена графически (рис. 23.3,а). Координаты точки искомой зависимости $i_{x,p} = f(t)$ определяются по кривым $\Phi = f(i_{x,p})$ и $\Phi = f(t)$ при одном и том же значении потока Φ . На рис. 23.3,б показана кривая тока i_x однофазного трансформатора как результат сложения его активной $i_{x,a}$ и реактивной $i_{x,p}$ составляющих. Активная составляющая $i_{x,a}$ невелика и обусловлена магнитными потерями в стали. Наличие именно этой составляющей приводит к сдвигу тока i_x относительно потока Φ на угол α (рис. 23.1).

На рис. 23.4 показана кривая тока $i_{x,p}$, а также кривые 1, 3 и 5-й гармоник этого тока. Гармоники более высокого порядка имеют относительно малые амплитуды и в первом приближении могут не учитываться.

При построении векторной диаграммы (рис. 23.1) было принято следующее: ток I_x и его составляющие $I_{x,a}$ и $I_{x,p}$ являются синусоидальными, а их действующие значения равны действующим значениям реальных токов.

Таким образом, ток I_x однофазного трансформатора при насыщении стали магнитопровода *не является синусоидальным, а имеет ярко выраженный остроугольный характер*.

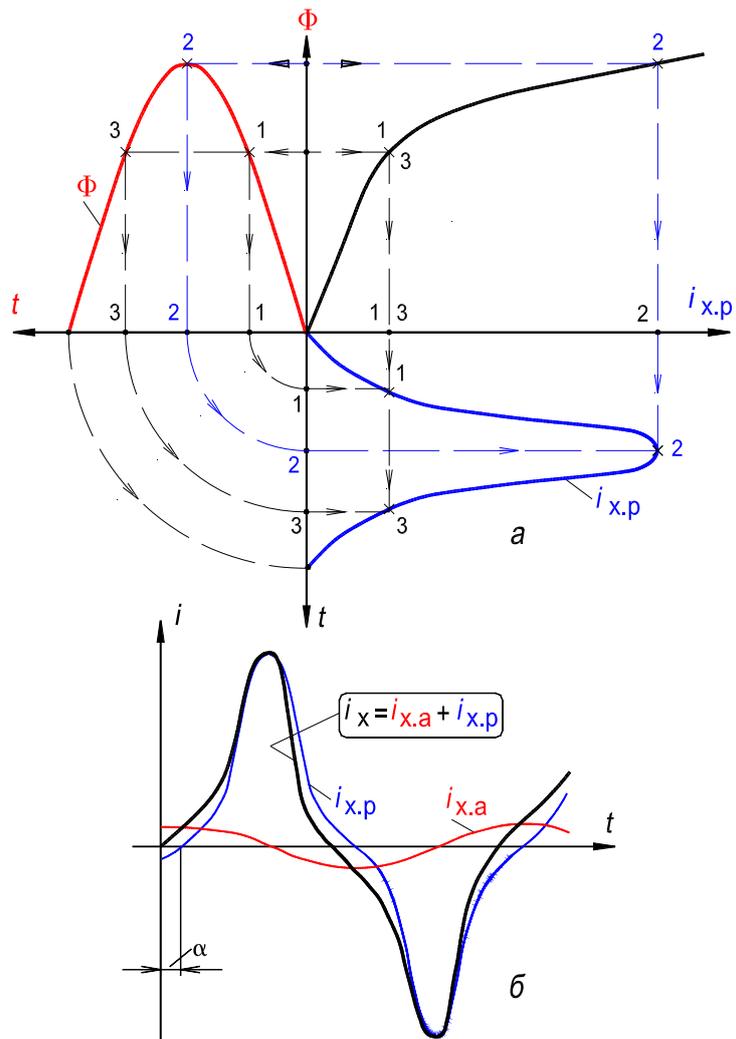


Рис. 23.3. Определение формы кривой тока холостого хода:
 а – реактивная составляющая $I_{x,p}$ тока; б – полный ток I_x

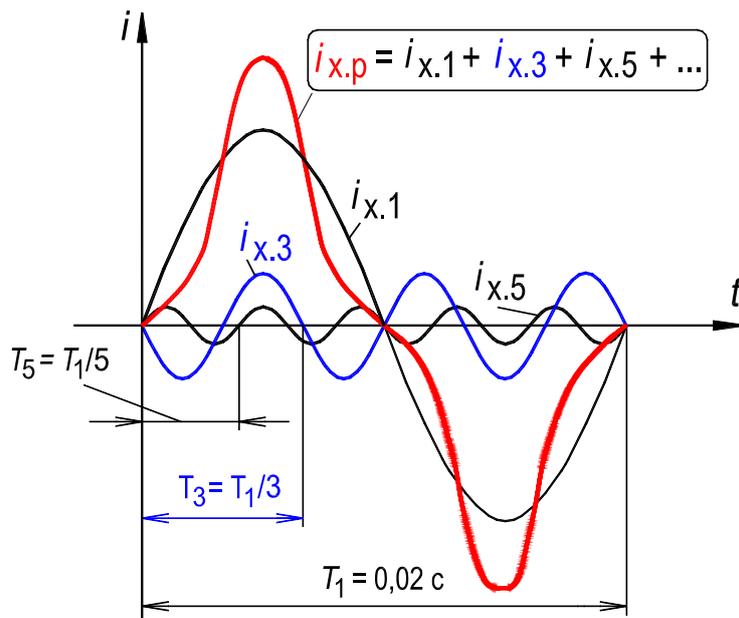


Рис. 23.4. Гармонический состав реактивной составляющей тока холостого хода однофазного трансформатора: 7, 9, 11-я, ... гармоники не показаны

3.2. Холостой ход трехфазного группового трансформатора

3.2.1. Схема соединения обмоток У/У

При рассмотрении процесса намагничивания приняты следующие условия: первичные обмотки трехфазного трансформатора присоединены к сети с трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений; трансформатор находится в режиме холостого хода.

Напоминание! Трехфазный групповой трансформатор представляет собой трехфазную группу однофазных трансформаторов. Их обмотки соединены между собой (рассматривается схема У/У), а магнитопроводы раздельны; магнитный поток каждой фазы замыкается в пределах своего магнитопровода.

Третьи гармоники тока и кратные им в трехфазной системе совпадают во времени во всех фазах (рис. 23.5), поэтому в первичной обмотке, соединенной по схеме У с изолированной нейтралью, эти гармоники отсутствуют, благодаря чему форма кривой фазного намагничивающего тока I_x улучшается, то есть приближается к синусоиде.

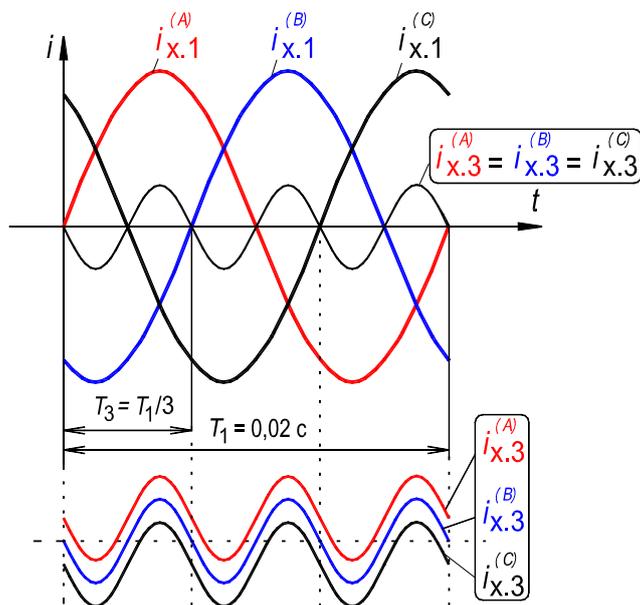


Рис. 23.5. Иллюстрация совпадения по фазе третьих гармоник в фазах трёхфазной системы

Исключение 3, 9, 15-й, ... гармоник из намагничивающего тока приводит к появлению третьих и кратных им гармоник в магнитном потоке Φ и, следовательно, в фазных ЭДС. Другие гармоники (5, 7, 11, 13-я, ...) в фазных ЭДС и соответственно в магнитном потоке Φ невозможны, так как линейные напряжения сети, к которой подключен трансформатор, синусоидальны.

Форма кривой магнитного потока Φ , указывающая на наличие в ней высших гармоник, может быть легко найдена графически (рис. 23.6,а). Координаты точки искомой зависимости $\Phi = f(t)$ определяются по кривым $\Phi = f(i_{x.p})$ и $i_{x.p} = f(t)$ при одном и том же значении тока $i_{x.p}$. На рис. 23.6,б показана кривая магнитного потока Φ , а также кривые 1-й и 3-й гармоник потока (9, 15-я, ... гармоники не показаны в силу их малости). Для наглядности при построении зависимости $\Phi = f(t)$ принят синусоидальный характер намагничивающего тока i_x , то есть 5, 7, 11, 13-я, ... гармоники тока не учитываются. Как следует из рис. 23.6 кривая потока Φ вследствие насыщения принимает уплощенную, как бы затупленную сверху форму.

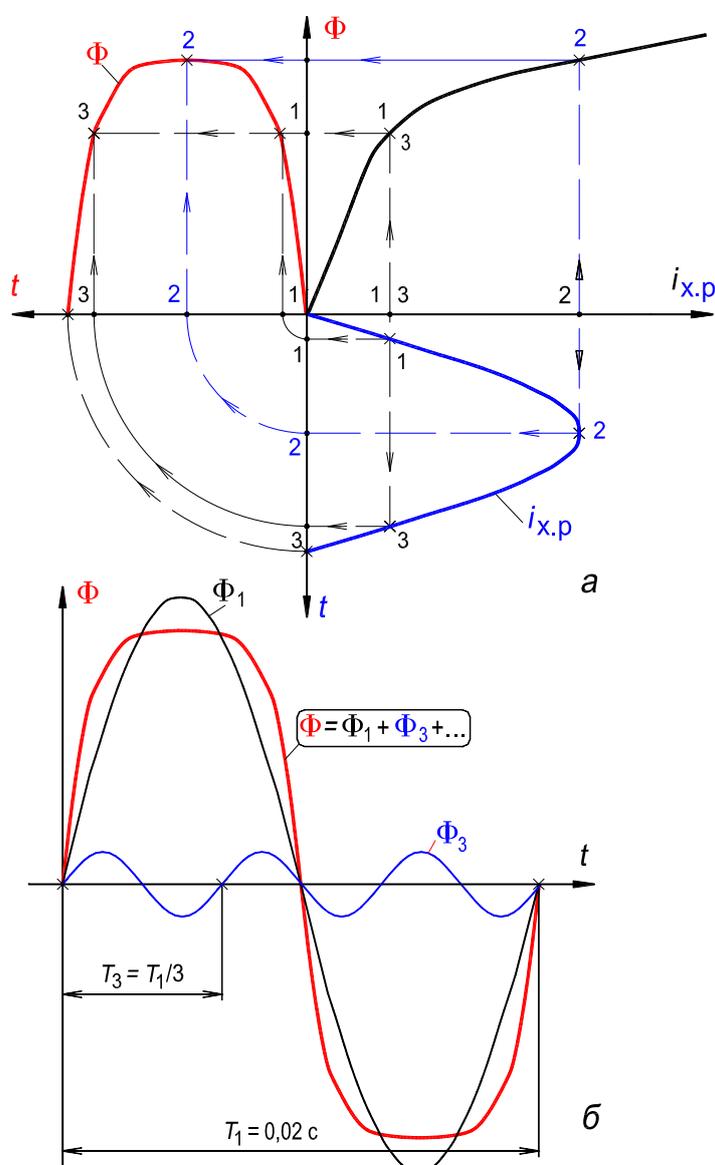


Рис. 23.6. Определение формы кривой магнитного потока:
 а – при синусоидальном токе; б – разложение в гармонический ряд,
 5, 7, 9, 11-я, ... гармоники не показаны

Таким образом, магнитный поток фазы $A-X$ определяется выражением вида:

$$\Phi^{(A)} = \Phi_{1m} \sin \omega t + \Phi_{3m} \sin 3 \omega t + \dots \quad (23.8)$$

Для фаз $B-Y$ и $C-Z$ выражения для магнитных потоков записываются с учетом сдвига по фазе *первых* гармоник:

$$\Phi^{(B)} = \Phi_{1m} \sin (\omega t - 2\pi/3) + \Phi_{3m} \sin 3 \omega t + \dots \quad (23.9)$$

$$\Phi^{(C)} = \Phi_{1m} \sin (\omega t - 4\pi/3) + \Phi_{3m} \sin 3 \omega t + \dots \quad (23.10)$$

Третьи гармоники потока Φ_3 (в каждом из трех магнитопроводов группового трансформатора) в любой момент времени одинаковы по величине и направлению и индуцируют в фазах обмоток равные по величине и совпадающие во времени третьи гармоники ЭДС.

Выражение для результирующей фазной ЭДС фазы $A-X$ определяется дифференцированием (23.8):

$$\begin{aligned} e^{(A)} &= -W_1 d\Phi^{(A)}/dt = \\ &= \omega W_1 \Phi_{1m} \sin (\omega t - \pi/2) - 3\omega W_1 \Phi_{3m} \sin 3(\omega t - \pi/2) \dots, \end{aligned} \quad (23.11)$$

где $\omega W_1 \Phi_{1m}$ и $3\omega W_1 \Phi_{3m}$ – амплитудные значения 1 и 3-й гармоник фазной ЭДС, а их действующие значения:

$$\begin{aligned} E_1 &= \omega W_1 \Phi_{1m} / \sqrt{2} = 4,44 f W_1 \Phi_{1m}; \\ E_3 &= 3\omega W_1 \Phi_{3m} / \sqrt{2} = 4,44 f_3 W_1 \Phi_{3m}, \end{aligned} \quad (23.12)$$

причем частота изменения 3-й гармоники $f_3 = 3f$.

Поскольку в трехфазном групповом трансформаторе третьи гармоники потока проходят по замкнутому сердечнику каждого из трансформаторов, величина их может составлять 0,15 – 0,2 значения потока основной гармоники и даже больше, $\Phi_{3m} \approx (0,15 - 0,2)\Phi_{1m}$. Так как третьи гармоники потока изменяются с трехкратной частотой, величины третьих гармоник фазных ЭДС могут быть значительными, например уже при $\Phi_{3m} = 0,1\Phi_{1m}$ действующее значение ЭДС E_3 составит 30 % от E_1 . Линейная ЭДС при соединении обмотки звездой представляет собой разность фазных ЭДС, например $\underline{E}_l^{(AB)} = \underline{E}_\phi^{(A)} - \underline{E}_\phi^{(B)}$. Третьи гармоники в фазных ЭДС (а также 9, 15-я, ... гармоники), будучи равными между собой, в линейных ЭДС отсутствуют.

В условиях эксплуатации следует избегать наличия 3-й гармоники в фазной ЭДС и в магнитном потоке по следующим причинам. Наличие третьей гармонической в фазной ЭДС искажает ее форму (рис. 23.7), повышает максимальное значение ЭДС, способствует возрастанию напряженности электрического поля в изоляции. При заземлении нейтральной точки первичной обмотки в линии высокого напряжения могут возникнуть токи тройной частоты, замыкающиеся через емкости линии на землю и создающие электромагнитные помехи в линиях связи (рис. 23.8). Эти токи могут вызвать резонансные явления и нарушить правильное действие релейной защиты. Наличие третьей гармонической в магнитном потоке приводит к увеличению потерь в стали и снижению КПД трансформатора.

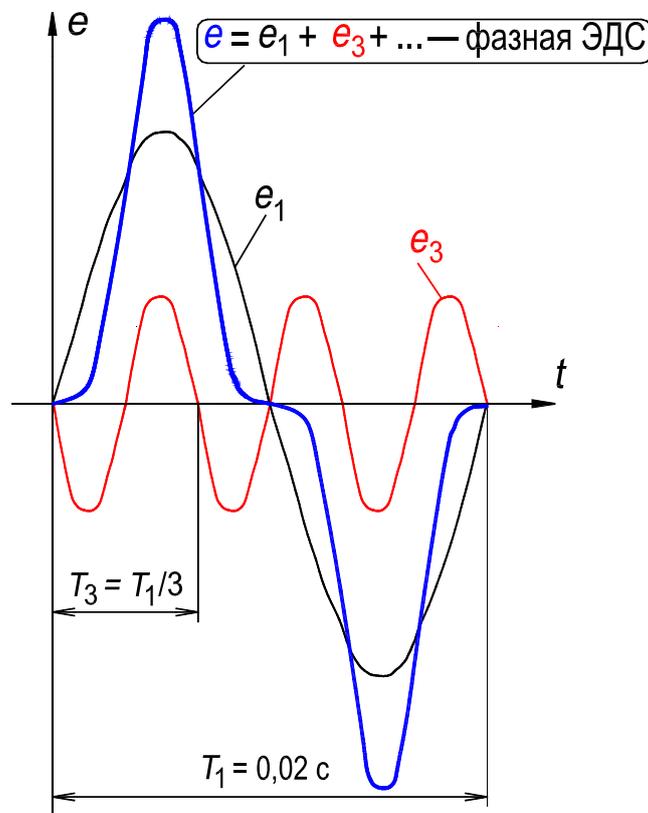


Рис. 23.7. Форма кривой фазной ЭДС при наличии третьей гармоники в магнитном потоке стержня

По этим причинам обмотки трехфазного группового трансформатора избегают соединять по схеме звезда–звезда и, как правило, соединяют обмотку низшего напряжения в треугольник, то есть схема соединения обмоток – У/Д.

Запомните! Третья гармоника может выполнять и полезную функцию, в частности в утроителе частоты (см. прил. П4.1, с. 495, сл.).

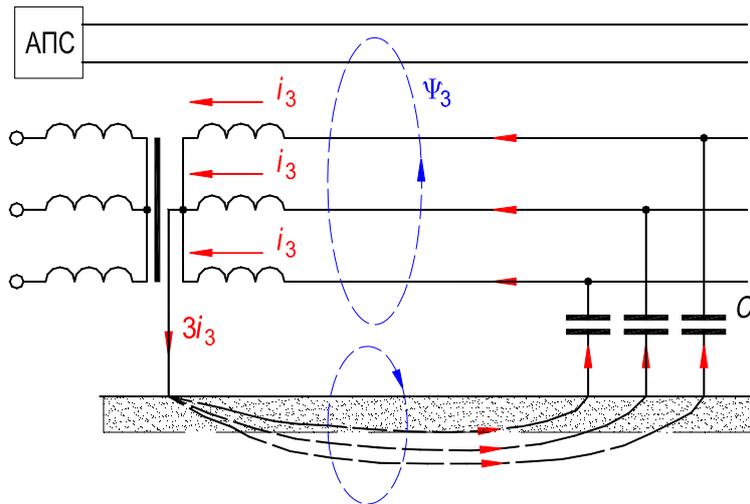


Рис. 23.8. Возникновение потокоцепления Ψ_3 , обусловленного токами i_3 тройной частоты, создающего электромагнитные помехи в линиях связи.

C – ёмкость проводов относительно земли; АПС – аппаратура проводной связи

3.2.2. Схема соединения обмоток Д/У

При намагничивании со стороны *треугольника* каждая фаза трехфазного группового трансформатора может рассматриваться как независимый однофазный трансформатор. В этом случае реактивная составляющая намагничивающего *фазного* тока $i_{x,p}$ имеет форму, показанную на рис. 23.3,а (см. с. 425), причем третьи и кратные им гармоники, будучи в любой момент времени равными по величине и совпадая по направлению, циркулируют внутри замкнутого треугольника, образуя общий ток утроенной частоты (рис. 23.9,а). Реактивная составляющая намагничивающего *линейного* тока не содержит третьих гармоник и имеет характерную седлообразную форму (рис. 23.9,б).

Так как третьи гармоники и кратные им проявляются в фазных токах, то они отсутствуют в магнитных потоках фаз и в фазных ЭДС, а следовательно, исключены неблагоприятные явления, которые имеют место при соединении обмоток по схеме У/У (разд. 3.2.1, с. 426,сл.).

3.2.3. Схема соединения обмоток У/Д

При намагничивании со стороны *звезды* третья гармоника магнитного потока Φ_3 , обусловленная насыщением стали магнитопровода, индуцирует ЭДС утроенной частоты E_3 в фазах треугольника. В результате в треугольнике протекает ток утроенной частоты I_3 , который создает свой магнитный поток $\Phi_3^{(1)}$, сдвинутый по фазе относительно потока Φ_3 на угол, близкий к 180° . Результирующий

магнитный поток утроенной частоты Φ_{3p} практически отсутствует (это иллюстрирует векторная диаграмма рис. 23.10,а), поэтому исключены неблагоприятные явления, которые имеют место при схеме соединения обмоток У/У (разд. 3.2.1).

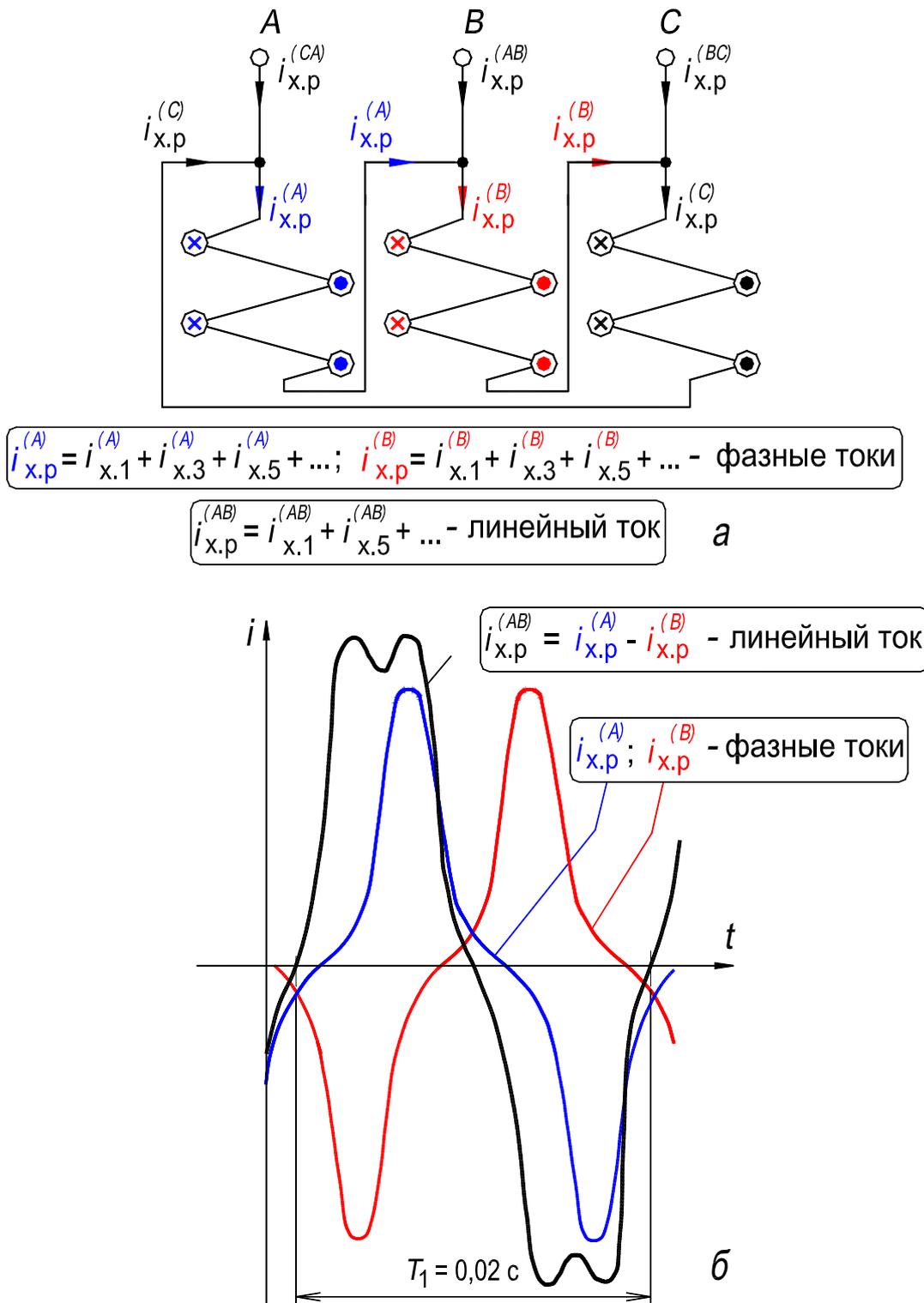


Рис. 23.9. Намагничивающие токи при соединении первичной обмотки треугольником, вторичной – звездой (на рисунке не показана) в групповом трехфазном трансформаторе: а – линейные и фазные токи; б – определение реактивной составляющей линейного тока

При схеме соединения обмоток Y/Δ реактивную составляющую намагничивающего тока в первичной обмотке можно рассматривать как разность реактивной составляющей $i_{x.p}$ намагничивающего тока однофазного трансформатора (рис. 23.3,а на с. 425) и ее 3-й гармонической $i_{3\Delta}$, которая теперь протекает не по первичной, а по вторичной обмотке, создавая то же намагничивающее действие (рис. 23.10,б).

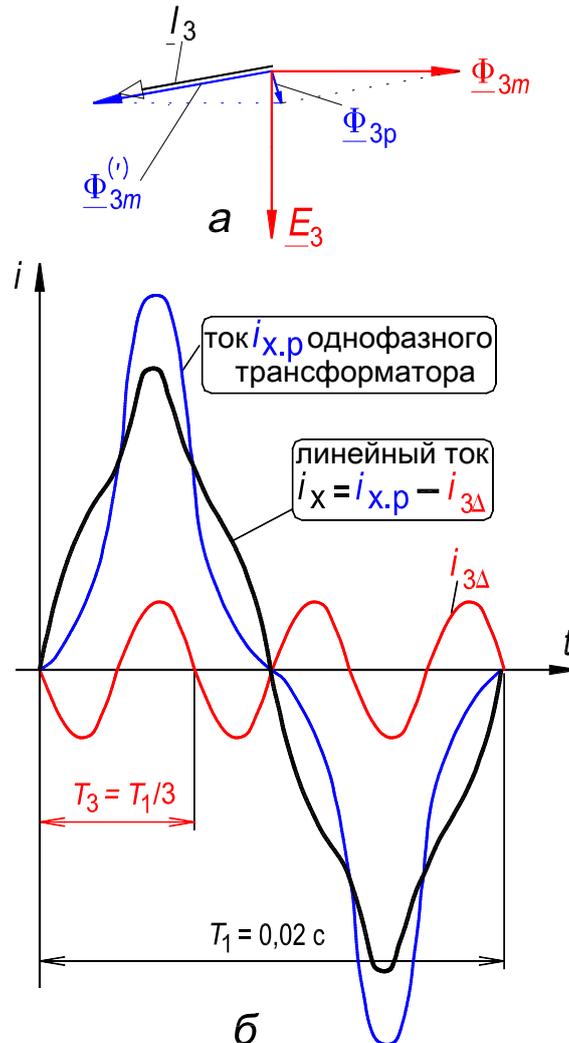


Рис. 23.10. Векторная диаграмма третьей гармоники – а; определение реактивной составляющей тока – б

3.3. Холостой ход трехфазного трёхстержневого трансформатора

3.3.1. Схема соединения обмоток Y/Y

Как было показано в разд. 3.2.1, в трансформаторе с соединением обмоток Y/Y третьей гармоники в намагничивающем токе первичной обмотки существовать не могут, и вследствие этого в магнитном потоке наряду с основной гармоникой Φ_1 будет и третья гармоника потока Φ_3 . Магнитопровод трехфаз-

ного трехстержневого трансформатора представляет собой магнитную систему, в которой стержни посредством ярм как бы соединены в звезду. Поэтому рассуждения, касающиеся прохождения третьих гармоник потоков, схожи с рассуждениями относительно прохождения третьих гармоник токов в обмотках, соединенных в звезду, а именно: третьи гармоники потока, будучи в любой момент времени одинаковыми и направленными одновременно вверх или вниз, пройдя вдоль стержней, вытесняются из магнитопровода и замыкаются от одного ярма к другому через трансформаторное масло (или воздух в сухом трансформаторе) и вдоль стенки бака (рис. 23.11).

Потоки третьих гармоник, проходя по пути относительно большого магнитного сопротивления, заметно ослабляются. Обычно амплитуда третьих гармоник ЭДС, вызванных этими полями, не превышает 5 – 7 %. Вместе с тем, замыкание потока, пульсирующего частотой 150 Гц, через стенки бака и другие металлические конструкции трансформатора, ведет к образованию вихревых токов в них, нагреву и увеличению добавочных потерь.

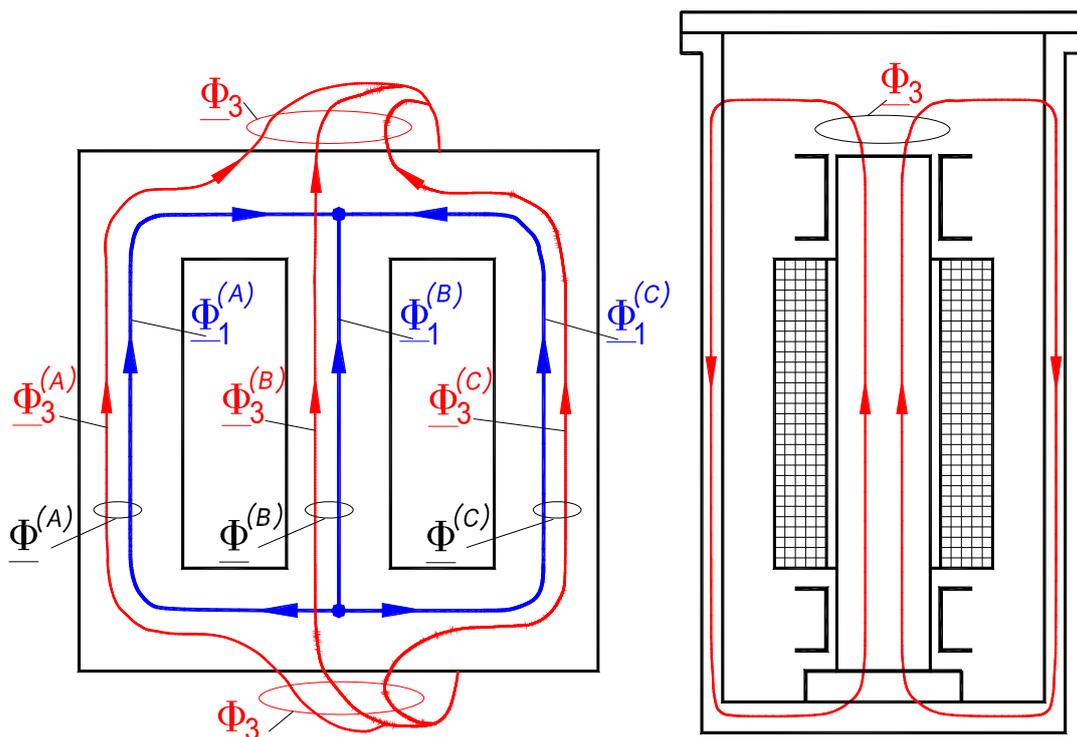


Рис. 23.11. Магнитное поле в трёхфазном трёхстержневом трансформаторе

Как видно из рис. 23.11, магнитное сопротивление путей, по которым замыкаются потоки крайних фаз $A-X$ и $C-Z$, больше магнитного сопротивления пути, по которому замыкается магнитный поток средней фазы $B-U$. Так как предполагается, что трансформатор питается от сети симметричным трехфазным

напряжением, то указанная несимметрия магнитной цепи приведет к несимметрии реактивной составляющей намагничивающего фазного тока, протекающего в фазах обмотки. Эти составляющие будут взаимно равны в фазах $A-X$ и $C-Z$, но больше реактивной составляющей намагничивающего фазного тока в фазе $B-Y$. На рис. 23.12 показано изменение во времени реактивной составляющей намагничивающего фазного (линейного) тока трехфазного трехстержневого трансформатора со схемой соединения обмоток U/Y .

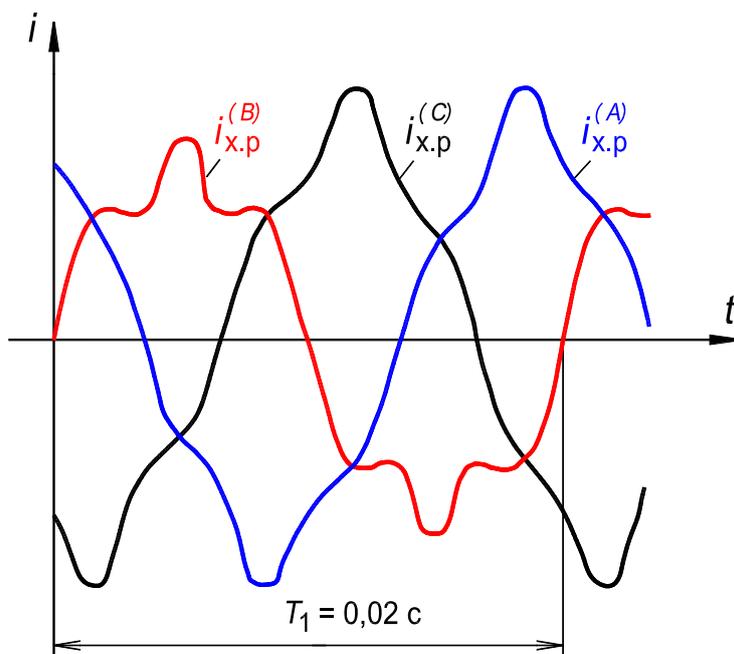


Рис. 23.12. Реактивные составляющие намагничивающего тока трёхстержневого трансформатора; схема соединения обмоток U/Y
(иллюстрация несимметрии токов, обусловленная несимметрией магнитопровода)

3.3.2. Схема соединения обмоток U/D

Схема отличается от предыдущей соединением вторичной обмотки. Первичная же обмотка по-прежнему соединена в звезду, и, следовательно, в намагничивающем токе первичной обмотки не может быть третьих гармоник, поэтому возникают третьи гармоники в магнитном потоке.

Процесс намагничивания трехфазного трехстержневого трансформатора происходит практически так же, как и трехфазного группового трансформатора (разд. 3.2.3 и рис. 23.9 на с. 430, сл.). Отличие определяется магнитной несимметрией трехстержневого магнитопровода. В результате в контуре треугольника будет протекать не только 3-я гармоника тока $i_{x,3}$, обусловленная насыщением магнитопровода, но и незначительная 1-я гармоника тока $i_{x,1}$, вызванная несимметрией магнитопровода (рис. 23.13).

На рис. 23.14 показано изменение во времени реактивной составляющей намагничивающего фазного (линейного) тока трехфазного трехстержневого трансформатора со схемой соединения обмоток U/Δ .

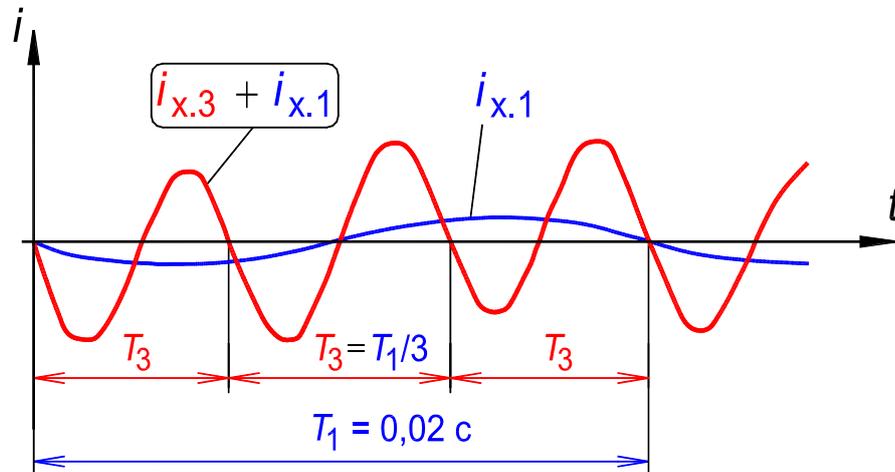


Рис. 23.13. Форма кривой намагничивающего тока, протекающего во вторичной обмотке, соединённой треугольником

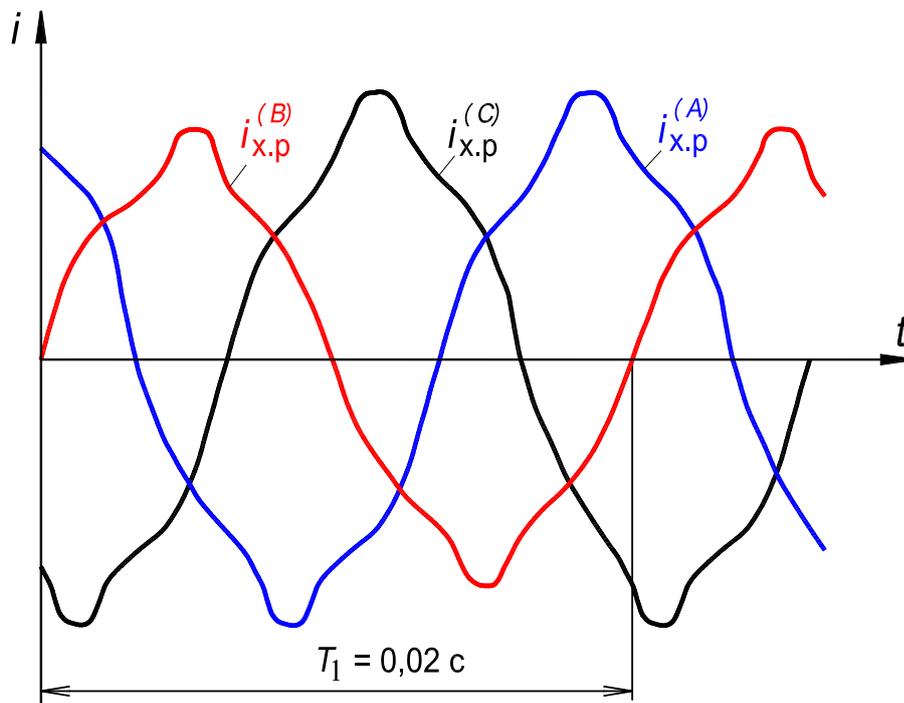


Рис. 23.14. Реактивные составляющие намагничивающего тока трёхстержневого трансформатора; схема соединения обмоток U/Δ

Третьи и кратные им гармоники в магнитном потоке будут практически скомпенсированы, и поэтому потоки в стержнях можно принять синусоидальными. Следовательно, неблагоприятные явления, которые имеют место при схеме соединения обмоток U/U (разд. 3.2.1 и 3.3.1), будут исключены.

3.3.3. Схема соединения обмоток Д/У

В этом случае каждая фаза первичной обмотки присоединена к синусоидальному напряжению сети. Потоки каждой фазы также синусоидальны, а намагничивающие токи фаз, как и в однофазном трансформаторе, содержат третьи гармоники, циркулирующие внутри замкнутого треугольника, причем, будучи в любой момент времени равными по величине и совпадая по направлению, они образуют общий ток тройной частоты. В линейных токах, которые представляют разность токов соответствующих фаз, третьи гармоники отсутствуют (рис. 23.15).

Сердечник трансформатора, обладающий нелинейными свойствами, является как бы *генератором высших гармоник*.

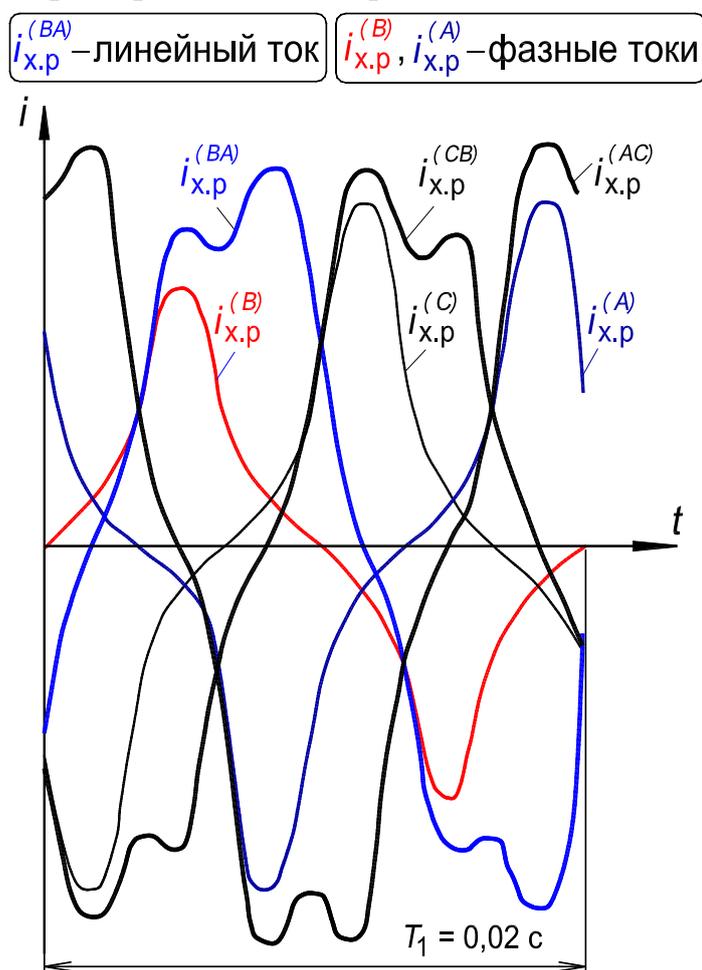


Рис. 23.15. Реактивные составляющие намагничивающего тока трёхстержневого трансформатора; схема соединения обмоток Д/У

Таким образом, при соединении одной из обмоток трехфазного трансформатора в треугольник благоприятнее протекают процессы, свя-

занные с намагничиванием трансформатора: магнитные потоки в стержнях и фазные ЭДС обмоток становятся практически синусоидальными и поэтому нежелательных явлений, свойственных трехфазным трансформаторам с соединением U/U , не возникает (искажение фазных напряжений, увеличение их максимальных значений, а при трехстержневом трансформаторе еще и вихревые токи в стенках бака). При наличии нейтрального провода образуется замкнутый контур для третьих гармоник тока, что в принципе способствует ослаблению неблагоприятных явлений. Однако, если этот контур создается через сопротивление нагрузки или другие сопротивления, то третьи гармоники тока уменьшаются и, следовательно, их влияние будет незначительным.

Внимание! Соединение одной из обмоток трансформатора по схеме *треугольник* положительно влияет также на работу трансформатора при несимметричной нагрузке (см. описание Работы № 3, с. 398, сл.).

4. Экспериментальное исследование

В работе исследуется трёхфазный групповой трансформатор (он содержит три однофазных трансформатора, их обмотки соединены между собой), а также трёхфазный трёхстержневой трансформатор с планарным магнитопроводом. В опытах используются амперметры (предел по току 1 А), настольный вольтметр PV со свободными концами (предел по напряжению 300 В) и электронный осциллограф.

Во избежание повреждения входного аттенюатора осциллографа перед подключением его входа к измеряемому напряжению необходимо установить переключатель чувствительности в положение, соответствующее 2 В/дел (не менее).

Фотографии стенда представлены на рис. П1, П2, П3, с. 25, 26.

Схемы включения трансформатора для проведения экспериментальных исследований приведены на рис. 23.16.

Описание устройства исследуемого трансформатора и значения номинальных данных – см. разд. 19, с. 351.

Записать номинальные данные исследуемого трансформатора (см. термины 60 – 63 на с. 147).

4.1. Трансформатор со схемой соединения обмоток U/Y (рис. 23.16,*a*)

Принципиальная схема опыта приведена на рис. 23.16,*a*. Для каждого из трансформаторов схема одна и та же.

Опыт проводить в следующей последовательности:

1. Собрать схему для испытания трансформатора.
2. С помощью автотрансформатора на фазе трансформатора установить номинальное напряжение U_{AX} ;
3. Измерить величины: тока холостого хода во всех фазах I_{xAx} , I_{xBx} , I_{xCz} ; линейных U_{AB} , U_{ab} и фазного U_{ax} напряжений. Напряжения измерить вольтметрами PV , PVI , а токи амперметрами – $PA1$, $PA2$, $PA3$;
4. Сфотографировать на экране осциллографа кривые напряжений U_{AX} , U_{AB} , U_{ab} , U_{ax} и тока холостого хода I_x во всех фазах; кривые токов рекомендуется фиксировать при подключении входа осциллографа на клеммы амперметров.

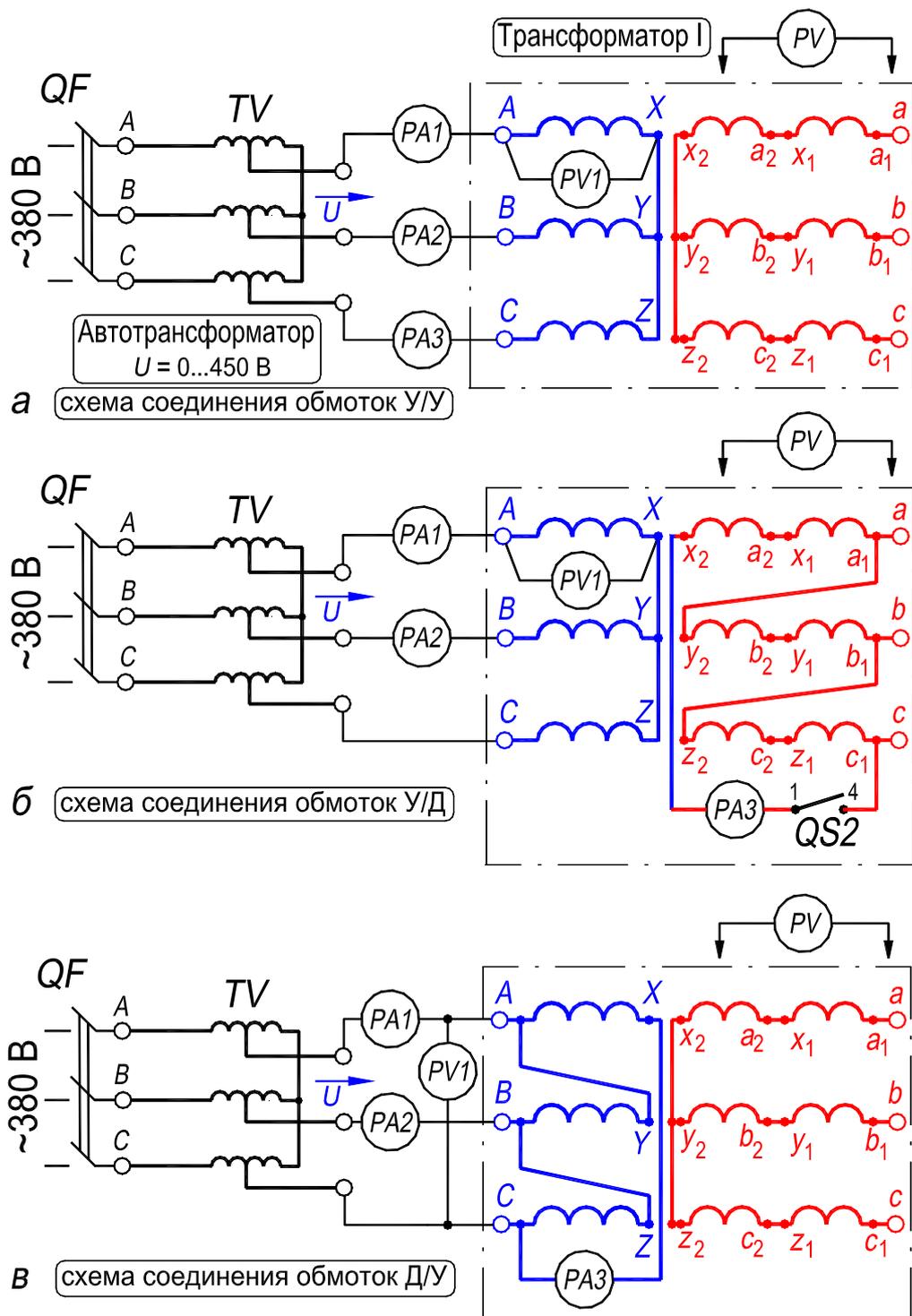


Рис. 23.16. Электрическая схема установки для исследования явлений, возникающих при намагничивании магнитопровода трансформатора

Опыт проводить дважды:

1. Для группового трехфазного трансформатора (разд. 3.1 и разд. 3.2.1, с. 426, сл.);
2. Для трехстержневого трехфазного трансформатора (разд. 3.1 и разд. 3.3.1, с. 432, сл.). Результаты записать в табл. 23.1.

Таблица 23.1. Данные исследования трансформатора со схемой соединения обмоток У/У

U_{AX}^{**}	U_{AB}	$\frac{U_{AB}^*}{U_{AX}}$	I_{xAX}^{**}	I_{xBX}	I_{xCZ}	U_{ax}^{**}	U_{ab}	$\frac{U_{ab}^*}{U_{ax}}$	$E_{3\phi}$	
В	В	—	А	А	А	В	В	—	В	%
<i>Групповой трехфазный трансформатор</i>										
Рис. 23.6 и 23.7	—	—	—			Рис. 23.6 и 23.7	—	—	—	—
120										
<i>Трехстержневой трехфазный трансформатор</i>										
Рис. 23.6 и 23.7	—	—	Рис. 23.12			Рис. 23.6 и 23.7	—	—	—	—
127										

П р и м е ч а н и я:

* Значения указанных отношений будут меньше, чем $\sqrt{3}$, так как третьи гармоники проявляются в фазных напряжениях U_{AX} , U_{ax} , но отсутствуют в линейных напряжениях U_{AB} , U_{ab} .

** Экспериментальные осциллограммы напряжений и токов необходимо сравнить с кривыми, представленными на соответствующих рисунках.

Действующее значение 3-й гармоники фазной ЭДС рассчитывается приближенно следующим образом:

$$E_{3\phi} \approx \sqrt{E_{\phi}^2 - E_{1\phi}^2}, \text{ В,}$$

где $E_{\phi} = U_{AX}$, $E_{1\phi} = U_{AB}/\sqrt{3}$, $E_{3\phi} = 100 \cdot E_{3\phi}/U_{AX}$, %.

4.2. Трансформатор со схемой соединения обмоток У/Д (рис. 23.16,б)

Принципиальная схема опыта приведена на рис. 23.16,б. Для каждого из трансформаторов схема одна и та же.

Опыт проводить в следующей последовательности.

1. Собрать схему для испытания трансформатора.
2. С помощью автотрансформатора на фазе трансформатора установить номинальное напряжение U_{AX} ;
3. Выключателем $QS2$ замкнуть контур треугольника;
4. Измерить величины: тока холостого хода во всех фазах I_{xAX} , I_{xBX} , I_{xCZ} ; линейного U_{AB} , и фазного U_{ax} напряжений; тока I_3 в контуре треугольника. Напряжения измерить вольтметрами PV , PVI , а токи амперметрами – $PA1$, $PA2$, $PA3$;

5. Сфотографировать на экране осциллографа кривые напряжений U_{AX} , U_{AB} , U_{ab} , U_{ax} и тока холостого хода I_x во всех фазах, а также тока I_3 ; кривые токов рекомендуется фиксировать при подключении входа осциллографа на клеммы соответствующих амперметров;

6. Выключателем $QS2$ разомкнуть контур треугольника и на зажимах выключателя 1 – 4 измерить напряжение, равное сумме ЭДС третьих гармоник, $E_3 = \sum E_{3\phi}$;

7. С помощью автотрансформатора установить на фазе трансформатора напряжение $U_{AX} = 60$ В и повторить пункты 2 – 6.

Опыт проводить дважды:

1. Для группового трехфазного трансформатора (разд. 3.1 и разд. 3.2.3, с. 430, сл.);

2. Для трехфазного трехстержневого трансформатора (разд. 3.1 и разд. 3.3.2, с. 434, сл.). Результаты записать в табл. 23.2.

Таблица 23.2. Данные исследования трансформатора со схемой соединения обмоток У/Д

U_{AX}^{**}	U_{AB}	$\frac{U_{AB}^*}{U_{AX}}$	I_{xAX}^{**}	I_{xBX}	I_{xCZ}	U_{ax}^{**}	I_3		E_3	
В	В	–	А	А	А	В	А	%	В	%
<i>Групповой</i> трехфазный трансформатор										
Рис. 23.6 и 23.7	–	–	Рис. 23.10			Рис. 23.6 и 23.7	–	–	–	–
120										
60										
<i>Трехстержневой</i> трехфазный трансформатор ***										
Рис. 23.6 и 23.7	–	–	Рис. 23.14			Рис. 23.6 и 23.7	Рис. 23.13		–	–
127										
60										

Примечания:

* Значение указанного отношения должно быть равно $\sqrt{3}$, так как третьи гармоники практически исключены из фазного напряжения U_{AX} и отсутствуют в линейном напряжении U_{AB} .

** Экспериментальные осциллограммы напряжений и токов необходимо сравнить с кривыми, представленными на соответствующих рисунках.

*** В связи с несимметрией магнитопровода в кривых ЭДС E_3 и тока I_3 содержатся составляющие, изменяющиеся с частотой 50 Гц.

Процентные значения ЭДС E_3 и тока I_3 рассчитываются по формулам:

$$E_3 = 100 \cdot E_3 / U_{ax}, \%$$

$$I_3 = 100 \cdot I_3 / I_{2ф.ном}, \%$$

где $I_{2ф.ном} = S_{ф.ном} / U_{2ф.ном}$, $S_{ф.ном}$ – номинальная фазная мощность трансформатора; $U_{2ф.ном}$ – номинальное вторичное фазное напряжение.

4.3. Трансформатор со схемой соединения обмоток Д/У (рис. 23.16,в)

Принципиальная схема опыта приведена на рис. 23.16,в. Для каждого из трансформаторов схема одна и та же.

Опыт проводить в следующей последовательности.

1. Собрать схему для испытания трансформатора.
2. С помощью автотрансформатора на фазе трансформатора установить номинальное напряжение U_{AX} ;

3. Измерить величины: линейного I_L и фазного I_ϕ первичного тока холостого хода, линейного U_{ab} и фазного U_{ax} вторичного напряжения. Напряжения измерить вольтметрами PV , PVI , а токи – амперметрами $PA1$, $PA2$, $PA3$;

4. Сфотографировать на экране осциллографа кривые напряжений U_{ab} , U_{ax} и токов I_L , I_ϕ ; кривые токов рекомендуется фиксировать при подключении входа осциллографа на клеммы соответствующих амперметров.

Измеренный в опыте фазный ток I_ϕ содержит весь спектр нечетных гармоник. Действующее значение определяется как корень квадратный из суммы квадратов действующих значений гармонических составляющих:

$$I_\phi \approx \sqrt{I_{1\phi}^2 + I_{3\phi}^2 + I_{5\phi}^2 \dots}$$

Опыт проводить дважды:

1. Для группового трехфазного трансформатора (разд. 3.1 и разд. 3.2.2, с. 430,сл.);

2. Для трехстержневого трехфазного трансформатора (разд. 3.1 и разд. 3.3.3, см. с. 436, сл.). Результаты записать в табл. 23.3

Таблица 23.3. Данные исследования трансформатора со схемой соединения обмоток Д/У

U_{AX}^{**}	Токи на первичной стороне					U_{ax}	U_{ab}
	$I_{л}$	$I_{ф}$	$I_{л}/I_{ф}^*$	I_3			
В	А	А	–	А	%	В	В
<i>Групповой</i> трехфазный трансформатор							
Рис. 23.6 и 23.7	Рис. 23.9,б		–	Рис. 23.9,а		Рис. 23.6 и 23.7	
120							
<i>Трехстержневой</i> трехфазный трансформатор							
Рис. 23.6 и 23.7	Рис. 23.15		–	–		Рис. 23.6 и 23.7	
127							

Примечания:

* Значения указанного отношения будет меньше, чем $\sqrt{3}$, так как 3-я гармоника проявляется в фазном токе, но отсутствует в линейном.

** Экспериментальные осциллограммы напряжений и токов необходимо сравнить с кривыми, представленными на соответствующих рисунках.

Действующее значение 3-й гармоники фазного тока рассчитывается приближенно следующим образом:

$$I_{3ф} \approx \sqrt{I_{ф}^2 - I_{1ф}^2}, \text{ А,}$$

где $I_{1ф} = I_{л}/\sqrt{3}$, $I_{3ф} = 100 \cdot I_{3ф}/I_{1ф}$, %.

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 420).
4. Номинальные данные исследованных трансформаторов (разд. 19, с. 351).
5. Схемы испытаний, рис. 23.16,а,б,в.
6. Результаты опытов, представленные в таблицах 23.1 – 23.3.
7. Фотографии экспериментальных осциллограмм токов и напряжений, сделанных при выполнении:
 - 7.1. Пункта 4 в разд. 4.1;
 - 7.2. Пункта 5 в разд. 4.2;
 - 7.3. Пункта 4 в разд. 4.3.

Блоки фотографий осциллограмм расположить ниже соответствующих таблиц. К каждой осциллограмме привести исчерпывающую подпись.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Трансформаторы подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

Образец оформления отчета по лабораторной работе приведён в прил. 2, с. 451,сл.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое явление насыщения стали?
2. Почему катушка со стальным сердечником в сети переменного тока является нелинейным сопротивлением?
3. Что такое магнитная характеристика трансформатора (привести графическую зависимость)?
4. Как по магнитной характеристике определить форму намагничивающего тока при синусоидальном магнитном потоке?
5. Какие высшие гармоники содержит намагничивающий ток однофазного трансформатора?
6. Почему третья и кратные ей гармоники отсутствуют в линейном намагничивающем токе трехфазного трансформатора при схемах соединения обмоток Y/Y , Y/Δ и Δ/Y ?
7. Как измерить 3-ю гармонику ЭДС в трансформаторе со схемой соединения обмоток Y/Δ ?

Литература

1. Забудский Е.И. Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4-х частях. Ч. 2. Асинхронные машины / Е.И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис». 2017. – 304 с. http://zabudsky.ru/AD_UP2/1-2_UP2-AD_T.pdf
Диплом I степени, VIII Всероссийский конкурс, 2019 г. – <http://zabudsky.ru/16.html>
2. Забудский Е.И. Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4-х частях Ч. 3. Синхронные машины / Е.И. Забудский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО «Мегаполис», 2019. – 295 с. <http://zabudsky.ru/SMedit2-10feb2019end-INT-T.pdf>
Диплом I степени, IX Всероссийский конкурс, 2020 г. – <http://zabudsky.ru/17.html>
3. Забудский Е.И. Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4-х частях. Ч. 4. Коллекторные машины постоянного и переменного тока / Е.И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис». 2020. – 294 с. http://zabudsky.ru/MPT_UP4_end_ZEI.pdf
4. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 120 с. <http://zabudsky.ru/UP1el-mag.pdf>
5. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ. 1999. – 141 с. <http://zabudsky.ru/UP2mke-v.pdf>
6. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат. 2003. – 436 с. http://zabudsky.ru/Evgeny_Zabudsky-C_M_R.pdf
7. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: Монография. – М.: ООО «Мегаполис», 2018. – 355 с. http://zabudsky.ru/Monograph_March2018site.pdf
8. Забудский Е.И. Учебно-методический комплекс по курсу «Электрические машины» (Интернет-реализация, <http://zabudsky.ru>)
9. Забудский Е.И. Конструкция и технология сборки электрических машин. В 5-ти частях. Ч. 1. Трансформаторы. Ч. 2. Асинхронные машины. Ч. 3. Синхронные машины. Ч. 4. Машины постоянного тока. Ч. 5. Электростанции: Видеофильм. – М.: МГАУ, 2004 (разработано в Power Point). <http://zabudsky.ru/index1.html>
10. Забудский Е.И. **Заключительная видео-лекция** – дайджест курса «Электрические машины» (среда zoom.us):
часть 1-я (30') – http://zabudsky.ru/Lecture19may2020END_1.mp4
часть 2-я (10') – http://zabudsky.ru/Lecture19may2020END_2.mp4
11. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: учебник для вузов в двух томах / А. В. Иванов-Смоленский. – 3-е изд., стер. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006 – (М.: Типография «Наука» РАН).

12. ГОСТ 16110–82. Трансформаторы силовые. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1986.
13. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1999.
14. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
15. ГОСТ 3484.1–88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1989.
16. ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения.
17. ГОСТ 32482-2013. Прокат тонколистовой холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали для трансформаторов. Технические условия.
18. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия.
19. ГОСТ 3836-83. Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты. Технические условия.
20. ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.
21. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 2014.

URL-адрес

<http://www.power-m.ru/>

<https://elektrozavod.inni.info>

<http://www.vemp.ru>

<http://www.eldin.ru>

Производители электрических машин и трансформаторов

Завод «Электросила», г. Санкт-Петербург

ОАО «Электрозавод», г. Москва

Владимирский электромоторный завод,
г. Владимир

Ярославский электромашиностроительный завод,
г. Ярославль

URL-адрес

<https://lipetsk.nlmk.com>

<https://www.severstal.com>

<https://viz-steel.nlmk.com>

Производители электротехнической стали

Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК),
г. Липецк

ПАО «Северсталь», г. Череповец

ООО «ВИЗ-Сталь», г. Екатеринбург

URL-адрес

<http://www2.viniti.ru/>

<http://nd.gostinfo.ru/>

<http://www.rsl.ru/>

Организации – источники информации

Всероссийский институт научной и технической информации РАН (ВИНИТИ РАН), г. Москва

Российский научно-технический центр по стандартизации (СТАНДАРТИНФОРМ), г. Москва

Российская государственная библиотека, г. Москва:
в окно поиска вставить текст –
[author:\(забудский евгений иванович\)](#)

П1. Паскаль-программа

«Расчет характеристик холостого хода трансформатора»

{Эта Паскаль-программа обеспечивает расчет характеристик холостого хода трансформатора

Исходные данные (см. табл. 20.1, графа «Измерение», с.359) считываются из файла **data.XX**.

Файл data.XX формируется (редактируется) пользователем.

Результаты расчета (табл. 20.1, графа «Расчет») помещаются в файл **result.XX**.

Файл result.XX создается турбосредой.

Обозначения физических величин (переменных), которые приняты в учебной литературе по дисциплине Электрические машины и в Паскаль-программе, совпадают}

```

uses crt;
var i, n      : integer;
    fi, fo    : text;
    U1x, U2x, IAx, IBx, ICx, PAx, PCx,
    Ix, Px, CosFix, K, Zm, Rm, Xm : array[1..30] of real;
begin
clrscr;
assign(fi,'d:\tp_7\pas\data.XX'); reset(fi);
assign(fo,'d:\tp_7\pas\result.XX'); rewrite(fo);
writeln(fo,' Паскаль-программа обеспечивает расчет');
writeln(fo,'характеристик холостого хода трансформатора');
writeln(fo,'=====');
write('1. ВВЕДИТЕ число точек на экспериментальной зависимости n
= ');
read (n);
{Считывание исходных данных из файла data.XX}
for i := 1 to n do
read(fi,U1x[i], U2x[i], IAx[i], IBx[i], ICx[i], PAx[i], PCx[i]);
{Расчет характеристик холостого хода
и сопротивлений намагничивающего контура}
for i := 1 to n do begin
Ix[i] := (IAx[i] + IBx[i] + ICx[i])/3;
Px[i] := PAx[i] + PCx[i];
CosFix[i] := Px[i]/(3.*U1x[i]*Ix[i]);
K[i] := U2x[i]/U1x[i];
Zm[i] := U1x[i]/Ix[i];

```

```

Rm[i] := Px[i]/(3.*sqrt(Ix[i]));
Xm[i] := sqrt(sqrt(Zm[i]) - sqrt(Rm[i]))
        end;
{Вывод результатов в файл result.XX}
writeln(fo,'    ФАЙЛ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА');
writeln(fo);
writeln(fo,'    Таблица 20.1, графа «ИЗМЕРЕНИЕ»');
writeln(fo,'    (исходные данные)');
writeln(fo,'-----');
writeln(fo,'U1x U2x IAx IBx ICx PAx PCx ');
writeln(fo,'-----');
writeln(fo,' В   В   А   А   А   Вт   Вт');
writeln(fo,'-----');
for i := 1 to n do
writeln(fo, U1x[i]:3:0,' ',U2x[i]:3:0,' ',IAx[i]:3:2,' ',
IBx[i]:3:2,' ',ICx[i]:3:2,' ',PAx[i]:4:1,' ',PCx[i]:5:1);
writeln(fo,'-----');
writeln(fo);
writeln(fo,' Продолжение табл. 20.1, графа «РАСЧЕТ»');
writeln(fo,'    (результаты расчета)');
writeln(fo,'-----');
writeln(fo,' Ix  Px  CosFix  K   Zm  Rm  Xm');
writeln(fo,'-----');
writeln(fo,' А   Вт   -     -   Ом  Ом  Ом');
writeln(fo,'-----');
for i := 1 to n do
writeln(fo,Ix[i]:3:2,' ',Px[i]:4:1,' ',CosFix[i]:4:3,' ',
K[i]:4:2,' ',Zm[i]:5:1,' ',Rm[i]:5:1,' ',Xm[i]:5:1);
writeln(fo,'-----');
writeln(fo);
writeln(fo,'Copyright, кафедра ЭЭМ МГАУ, Москва. ');
writeln(fo,'Паскаль-программу составил профессор Е.И.Забудский ');
writeln(fo,'10 сентября 2000 года. ');
close(fi); close(fo)
end.

```

Примечания:

1. Паскаль-программа расчета характеристик холостого хода трансформатора (файлы *XX.pas* и *XX.exe*) реализована на компьютерах вычислительной лаборатории кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени акад. И.Ф. Бородина».

2. Перед запуском программы на выполнение необходимо отредактировать текст файла *data.XX* в соответствии с выполненным экспериментом (таблица 20.1, графа «Измерение», с. 359).
3. Результаты расчета помещаются турбосредой в файл *result.XX* (см. далее).
4. Для расчета других характеристик студентам рекомендуется составить компьютерные программы (аналогично вышеприведенной) самостоятельно.

**ФАЙЛ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА
ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОСТОГО ХОДА
ТРАНСФОРМАТОРА**

Таблица 20.1, графа «ИЗМЕРЕНИЕ»
(исходные данные)

U_{1x}	U_{2x}	I_{Ax}	I_{Bx}	I_{Cx}	P_{Ax}	P_{Cx}
В	В	А	А	А	Вт	Вт
86	90	0.23	0.20	0.22	35.0	-10.0
104	108	0.39	0.28	0.38	60.0	-25.0
115	121	0.50	0.37	0.50	80.0	-52.5
127	133	0.68	0.50	0.68	115.0	-75.0
133	138	0.76	0.57	0.80	132.5	-85.0

Продолжение табл. 20.1, графа «РАСЧЕТ»
(результаты расчета)

I_x	P_x	$\cos\varphi_x$	k	Z_m	R_m	X_m
А	Вт	—	—	Ом	Ом	Ом
0.22	25.0	0.447	1.05	396.9	177.5	355.0
0.35	35.0	0.321	1.04	297.1	95.2	281.5
0.46	27.5	0.175	1.05	251.8	44.0	248.0
0.62	40.0	0.169	1.05	204.8	34.7	201.9
0.71	47.5	0.168	1.04	187.3	31.4	184.7

© Copyright, кафедра «Электроснабжение и электрические машины»,
МГАУ, Москва.

Паскаль-программу составил профессор Е.И. Забудский
10 сентября 2000 года.

П2. Форма отчета по лабораторной работе (образец оформления)



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ –**

МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина

Кафедра автоматизации и роботизации технологических процессов
имени академика И.Ф. Бородина

Учебная дисциплина **«Электрические машины»**

Раздел **«Трансформаторы»**

**Отчёт
по лабораторным работам**

Выполнил
студент курса ... группы

_____ ФИО

Принял:
Профессор Е.И. Забудский

Оценка _____

Дата защиты _____

Москва, 2021

Отчет по работе № 1.

ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Оглавление

1. Цель работы	453
2. Программа работы	453
3. Номинальные данные исследуемого трансформатора	454
4. Опыт холостого хода	456
5. Опыт короткого замыкания	458
6. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика трансформатора	458
7. Расчет и построение внешних характеристик	458
8. Расчет и построение зависимости КПД от коэффициента нагрузки	458
Выводы	458
Литература	458

1. Цель работы

Ознакомиться с устройством, принципом действия и назначением трансформатора; освоить практические методы проведения опытов холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой, а также использования опытных данных для получения параметров трансформатора и основных характеристик.

2. Программа работы *

2.1. Ознакомиться с устройством испытуемого трансформатора и записать его паспортные данные.

2.2. Определить коэффициент трансформации.

2.3. Провести опыт холостого хода ($I_2 = 0$) и построить зависимости $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$.

2.4. Провести опыт короткого замыкания ($U_2 = 0$) и построить зависимости $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$.

2.5. Провести опыт нагрузки трансформатора и построить внешнюю характеристику

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } \cos \varphi_2 = 1,0.$$

2.6. На основании данных опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры T-образной схемы замещения трансформатора.

2.7. Определить напряжение короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие.

2.8. Рассчитать и построить внешние характеристики трансформатора при активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1,0$), активно-индуктивной ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = +0,6$) и активно-емкостной ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = -0,6$). Сравнить расчетную характеристику при $\cos \varphi_2 = 1,0$ с опытной (см. п. 2.5).

2.9. Рассчитать и построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки $\eta = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 1,0$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$. Определить нагрузку, соответствующую максимальному значению КПД.

* Для защиты отчета необходимо знать:

- 1) назначение и содержание выполненных опытов,
- 2) физическую природу параметров T-образной схемы замещения трансформатора,
- 3) физическую природу экспериментальных и расчетных зависимостей.

3. Номинальные данные трехфазного трансформатора типа ТС-2,5/0,269

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$S_{ном}$		кВ·А
Первичное напряжение	$U_{1л}$		В
Вторичное напряжение	$U_{2л}$		В
Линейный ток первичной обмотки	$I_{1л}$		А
Линейный ток вторичной обмотки	$I_{2л}$		А
Частота	f		Гц
Число фаз	m		–
Схема соединения обмоток	$У/У$		–
Способ охлаждения			
Характер нагрузки			
Ток холостого хода	i_x		%
Потери холостого хода	P_x		Вт
Напряжение короткого замыкания	u_k		%
Потери короткого замыкания	P_k		Вт

Примечания:

1. Данные в графу «Численное значение» занести из табл. 19.1, с. 352.
2. Значения номинальных токов $I_{1л}$ и $I_{2л}$ рассчитать по формулам (термин 63, с. 147):

$$I_{1л} = \dots\dots, \quad I_{2л} = \dots\dots$$

3. Значения тока и потерь холостого хода определены по данным опыта х. х., которые соответствуют номинальному первичному напряжению $U_{1л} = \dots$ В (разд. 4, табл. 1).

4. Значения напряжения и потерь короткого замыкания определены по данным опыта к. з., которые соответствуют номинальному первичному току $I_{1л} = \dots\dots$ А (разд. 5, табл. 2).

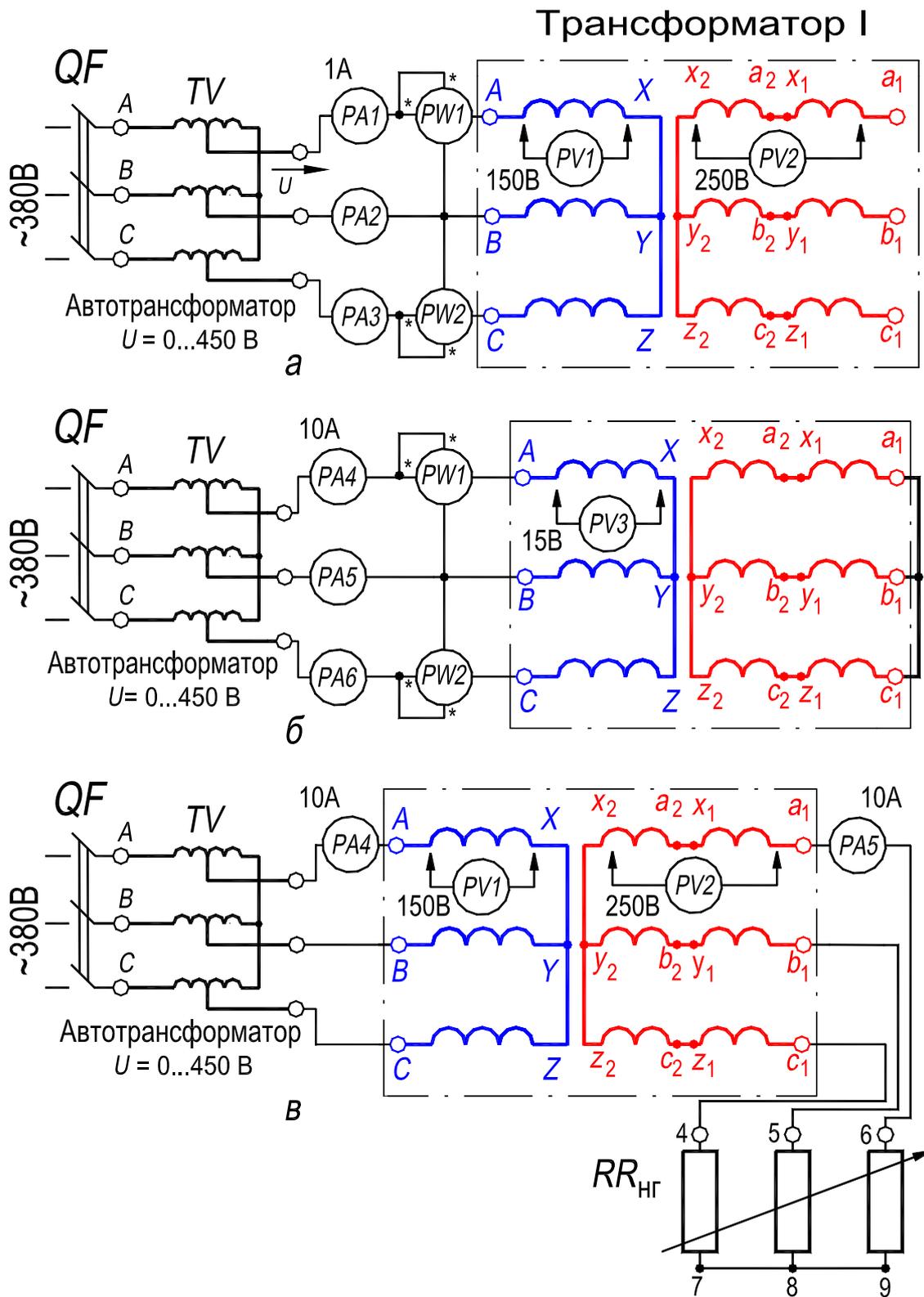


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора:

а – в режиме холостого хода; *б* – в режиме короткого замыкания;

в – в режиме нагрузки

4. Опыт холостого хода

Схема включения трансформатора приведена на рис. 1,а. Опытные и расчетные данные занесены в табл. 1 (см. описание Работы №1, разд. 4.1, табл. 20.1).

Определение. Опыт холостого хода (опыт х. х). Режим холостого хода трансформатора, осуществляемый при номинальной частоте и различных значениях синусоидального напряжения первичной обмотки с целью опытного определения потерь и тока холостого хода и других параметров и характеристик трансформатора.

Измеряемые величины в опыте холостого хода.

U_{1x}, U_{2x} – первичное и вторичное фазные напряжения;

I_{Ax}, I_{Bx}, I_{Cx} – линейные (фазные) первичные токи;

P_{Ax}, P_{Cx} – активные мощности, потребляемые фазами А-Х, С-Х.

Рассчитываемые величины по экспериментальным данным опыта холостого хода.

I_x – ток холостого хода в первичной обмотке;

P_x – мощность холостого хода, потребляемая трансформатором;

$\cos \varphi_x$ – коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе;

k – коэффициент трансформации трансформатора;

Z_m, R_m, X_m – полное, активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура Т-образной схемы замещения трансформатора (X_m – сопротивление взаимной индукции трансформатора; R_m – фиктивное сопротивление, расчётная величина).

Формулы для расчёта величин, заносимых в табл. 1.

$$I_x = (I_{Ax} + I_{Bx} + I_{Cx})/3;$$

$$P_x = C_w \cdot (P_{Ax} - P_{Cx}), C_w = \dots \text{Вт/дел} - \text{цена деления ваттметра};$$

$$\cos \varphi_x = P_x / 3 U_{1x} I_x;$$

$$k = U_{2x} / U_{1x};$$

$$Z_m \approx U_{1\text{ф.ном}} / I_x;$$

$$R_m \approx P_x / 3 I_x^2;$$

$$X_m = (Z_m^2 - R_m^2)^{1/2}.$$

Поданным опыта строятся характеристики холостого хода трансформатора $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_{1x})$, параметр – вторичный ток трансформатора $I_2 = 0$.

Характеристики представлены на рис. 2 (образец построения; таблицу и графики размещать на одной странице).

Таблица 1. Измерение и расчёт характеристик холостого хода трансформатора

Измеренные величины							Расчитанные величины				Расчет при $U_{1x} = U_{1ф.ном}$		
Фазные напряжения		Линейные (фазные) токи			Фазные мощности								
U_{1x}	U_{2x}	I_{Ax}	I_{Bx}	I_{Cx}	P_{Ax}	P_{Cx}	I_x	P_x	$\cos \varphi_x$	k	Z_m	R_m	X_m
В	В	А	А	А	дел Вт	дел Вт	А	Вт	–	–	Ом	Ом	Ом

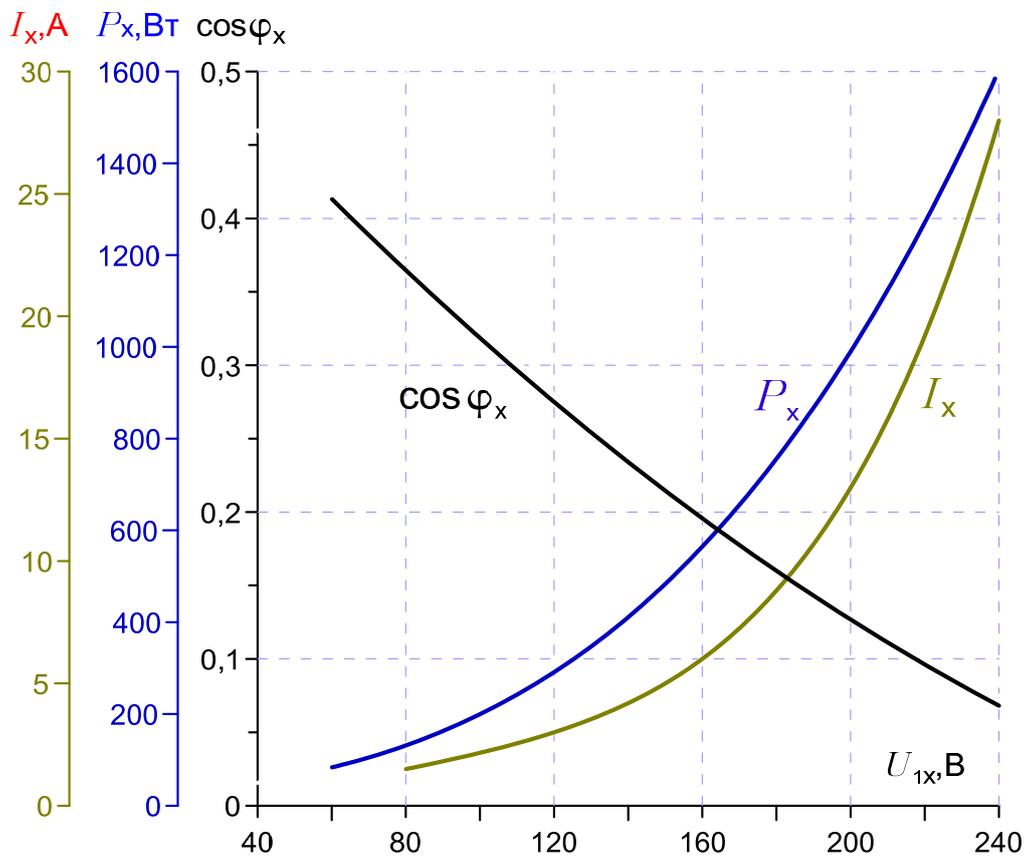


Рис. 2. Характеристики холостого хода трансформатора, мощность 250 кВ·А (образец построения)

5. Опыт короткого замыкания.

.....

6. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика трансформатора.

.....

7. Расчет и построение внешних характеристик.

.....

8. Расчет и построение зависимости КПД от коэффициента нагрузки.

.....

Инструкция по дальнейшему оформлению отчёта

Результаты опытов, перечисленных в п.п. 5 – 8, оформлять согласно образцу, представленному в п. 4. Оформление каждого опыта начинать с новой страницы.

В разделе Выводы (начинать с новой страницы) дать оценку значимости выполненных опытов, объяснить форму (ход) всех характеристик, представленных графически, и физический смысл параметров T-образной схемы замещения трансформатора (см. разд. 14.5), определённых в опытах холостого хода и короткого замыкания.

В список литературы (начинать с новой страницы) включить настоящее учебное пособие, учебно-методический комплекс по дисциплине «Электрические машины», стандарт, регламентирующий методы электромагнитных испытаний силовых трансформаторов и стандарт, определяющий общие технические условия, которым должны удовлетворять силовые трансформаторы.

Порядок оформления отчёта по каждой лабораторной работе:

- Работа №1 – с. 370;
- Работа №2 – с. 395;
- Работа №3 – с. 416;
- Работа №4 – с. 444.

ПЗ. Основы проектирования трансформаторов

Оглавление

Введение	460
ПЗ.1. Закон роста мощности и геометрических размеров трансформатора	462
ПЗ.2. Расчет основных размеров трансформатора на ПК	465
А. Задание на проект и схема расчета трансформатора	465
Б. Расчет основных электрических величин трансформатора ...	468
В. Основные размеры трансформатора	470
Г. Характеристика Pascal-программы «Расчёт основных размеров трансформатора»	474
Д. Пример расчёта основных размеров трансформатора на ПК .	475
Д.1. Исходные данные для расчёта трансформатора	475
Д.2. Формуляр выбора исходных данных	476
Д.3. Файл TransInp.txt с исходными данными для расчета основных размеров трансформатора	479
Д.4. Файл TransOut.txt с результатами расчета основных размеров трансформатора	479
Д.5. Анализ результатов расчёта	481
Д.6. Файл TransGr.dat с данными для графической интерпретации результатов расчета ...	483
Д.7. Файл TransPas.pas с программой «Расчёт основных размеров трансформатора»	484
Литература *	489

Перечень рисунков в приложении ПЗ

Рис. ПЗ.1. Основные размеры трансформатора	470
Рис. ПЗ.2. Соотношение размеров двух трансформаторов с разными значениями β ...	472
Рис. ПЗ.3. График зависимостей $C_{ак,ч}, P_x, i_x, J, \sigma_p = f(\beta)$	483

* В прил. 3 даны библиографические ссылки на издания, перечисленные в списке литературы на с. 489.

Введение

Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов каждой электрической сети. Передача электрической энергии на большие расстояния от места ее производства до места потребления требует в современных сетях не менее чем пяти-шестикратной трансформации в повышающих и понижающих трансформаторах. Так, при напряжении на шинах электростанции 15,75 кВ в современной сети при удалении потребителей от электростанции, питающей сеть, около 1000 км часто применяется такая последовательность шести трансформаций напряжения с учетом падения напряжения на линиях передачи: 15,75 на 525 кВ; 500 на 242 кВ; 230 на 121 кВ; 115 на 38,5 кВ; 35 на 11 кВ; 10 кВ на 0,4 или 0,69 кВ.

Необходимость распределения энергии по разным радиальным направлениям между многими мелкими потребителями приводит к значительному увеличению числа отдельных трансформаторов по сравнению с числом генераторов. При этом суммарная мощность трансформаторов в сети на каждой следующей ступени с более низким напряжением в целях более свободного маневрирования энергией выбирается обычно большей, чем мощность предыдущей ступени более высокого напряжения. Вследствие этих причин общая мощность всех трансформаторов, установленных в сети, превышает общую генераторную мощность примерно в 7 – 8 раз. В связи с увеличением удаления потребителей (распределительной сети) от крупных электростанций, размещаемых в районах сосредоточения энергетических ресурсов, и повышением напряжения линий электропередачи до 750, 1150 и далее до 1500 кВ указанное соотношение имеет тенденцию к увеличению.

Определяя место силового трансформатора в электрической сети, следует отметить, что по мере удаления от электростанции единичные мощности трансформаторов уменьшаются, а удельный расход материалов на изготовление трансформатора и потери, отнесенные к единице мощности, а также цена 1 кВт потерь возрастают. Поэтому значительная часть материалов, расходуемых на все силовые трансформаторы, вкладывается в наиболее отдаленные части сети, т. е. в трансформаторы с высшим напряжением 35 и 10 кВ. В этих же трансформаторах возникает основная масса потерь энергии, оплачиваемых по наиболее дорогой цене.

Потери холостого хода трансформатора являются постоянными, не зависят от тока нагрузки и возникают в его магнитной системе в течение всего времени, когда он включен в сеть. Потери короткого замыкания (нагрузочные) изменяются с изменением тока нагрузки и зависят от графика нагрузки трансформатора. Характер суточного или годового графика нагрузки трансформатора зависит от его места в сети и характера нагрузки – промышленная, бытовая, сельскохозяйственная и т. д. Для экономических расчетов трансформаторы сети принято разделять на трансформаторы электрических станций основной сети, при напряжениях 110 кВ и выше, и распределительной сети, непосредственно питающие потребителей при напряжениях 10 и 35 кВ.

В прил. 3 приведена Pascal-программа расчета основных размеров трехфазных трансформаторов при напряжениях до 35 кВ и освещена методика выбора и подготовки исходных данных, необходимых для проведения расчетов.

Реализация составленной программы на ПК позволяет осуществить рациональный выбор основных размеров трансформатора на основе вариантного расчета с оптимизацией по минимуму стоимости активной части трансформатора, с учетом ряда ограничений по нормированным параметрам.

Расчет основных размеров трансформатора является определяющей фазой всего процесса проектирования такого трансформатора, который будет иметь минимальную стоимость и соответствовать заданию, а также удовлетворять ряду граничных условий (нагревостойкость, механическая прочность и др.).

ПЗ.1. Закон роста мощности и геометрических размеров трансформатора

Основным законом, на котором базируется проектирование трансформаторов, является общеизвестный закон, связывающий мощность трансформатора с его линейными размерами. Рассмотрим ряд типов трансформаторов определенного назначения и конструкции, с одинаковыми числом фаз, частотой, числом обмоток, одного класса напряжения, с одним видом регулирования напряжения и одним видом охлаждения, различных мощностей, нарастающих по определенной шкале в ограниченном диапазоне. Сделаем два допущения. Предположим, что в пределах всего ряда соотношения между отдельными размерами трансформаторов сохраняются постоянными, т. е. что магнитные системы и обмотки всех трансформаторов данного ряда представляют собой геометрически подобные фигуры. Далее предположим, что электромагнитные нагрузки активных материалов – индукция в магнитной системе и плотность тока в обмотках трансформатора – в пределах всего ряда также остаются неизменными. Для ряда трансформаторов, целенаправленно спроектированных и отвечающих вышеупомянутым условиям, эти допущения являются вполне правомерными, хотя отдельные типы трансформаторов ряда могут несколько отклоняться от этих соотношений.

Обращаясь к общей теории трансформаторов, можно записать:
мощность обмоток одного стержня трансформатора

$$S' = U \cdot I,$$

где U – напряжение обмотки стержня; I – ток обмотки стержня.

Заменяя $U = u_B w$ и $I = J \cdot \Pi$, где u_B – напряжение одного витка; w – число витков обмотки стержня; J – плотность тока в обмотках и Π – сечение одного витка обмотки, получаем $S' = u_B \cdot w \cdot J \cdot \Pi$.

Далее, используя [2], формула (3.16) и выражение для активного сечения стержня $\Pi_c = \pi d^2 k_c / 4$, находим

$$S' = (1,11\pi \cdot f \cdot k_c) \cdot (B_c \cdot J) \cdot (d^2 \cdot w \cdot \Pi). \quad (\text{ПЗ.1})$$

Первая и вторая скобки правой части этого выражения для данной серии могут быть заменены постоянным коэффициентом k .

Тогда мощность трансформатора, имеющего s активных, т. е. несущих обмотки стержней,

$$S = cS' = k(d^2 \cdot w \cdot \Pi). \quad (\text{П3.2})$$

Произведение $w \cdot \Pi$ представляет собой площадь сечения витков обмотки, т. е. величину, пропорциональную квадрату линейного размера трансформатора. Таким образом, все выражение, стоящее в скобках, $d^2 \cdot w \cdot \Pi$, поскольку соотношение линейных размеров остается в пределах ряда неизменным, оказывается пропорциональным любому линейному размеру в четвертой степени, или

$$S \sim l^4, \quad (\text{П3.3})$$

откуда следует, что линейные размеры трансформатора возрастают пропорционально корню четвертой степени из мощности,

$$l \sim S^{1/4}, \quad (\text{П3.4})$$

Электродвижущая сила одного витка обмотки $u_{\text{в}}$ пропорциональна $d^2 \sim l^2$, или

$$u_{\text{в}} \sim S^{1/2}, \quad (\text{П3.5})$$

т. е. возрастает с ростом мощности трансформатора.

Масса активных материалов трансформатора (стали $G_{\text{ст}}$ и металла обмоток G_0) возрастает пропорционально кубу его линейных размеров, или

$$G \sim l^3 \sim S^{3/4}. \quad (\text{П3.6})$$

Расход активных материалов на единицу мощности трансформатора изменяется пропорционально

$$g = G/S \sim S^{3/4}/S \sim 1/S^{1/4}, \quad (\text{П3.7})$$

т. е. падает с ростом мощности. Потери в активных материалах стали магнитной системы и металле обмоток $\sum P$ при сохранении неизменных электромагнитных нагрузок пропорциональны их массам или объемам, и, следовательно, полные потери

$$\sum P \sim S^{3/4}, \quad (\text{П3.8})$$

потери на единицу мощности

$$p = \sum P / S \sim S^{3/4}/S \sim 1/S^{1/4}, \quad (\text{П3.9})$$

т. е. потери на единицу мощности (1 кВ·А) падают вместе с ростом мощности трансформатора, а КПД трансформатора соответственно возрастает.

Внешняя, охлаждаемая воздухом поверхность трансформатора естественно растет пропорционально квадрату линейных размеров $\Pi_0 \sim l^2 \sim S^{1/2}$, а потери q , отнесенные к единице поверхности, также возрастают

$$q = \sum P / \Pi_0 \sim S^{3/4} / S^{1/2} \sim S^{1/2}. \quad (\text{ПЗ.10})$$

Выведенные выше пропорциональные зависимости (ПЗ.7) и (ПЗ.9) показывают, что увеличение мощности трансформатора в одной единице является экономически выгодным потому, что приводит к уменьшению удельного расхода материала на 1 кВ·А мощности и повышению КПД. Одновременно из (ПЗ.10) следует, что естественный рост охлаждаемой поверхности трансформатора отстает от роста его потерь, и, следовательно, с ростом мощности трансформатора усложняется решение проблемы его охлаждения. При этом с ростом номинальной мощности трансформатора необходимо искусственно увеличивать охлаждаемую поверхность бака путем установки охлаждающих труб или подвески радиаторов, а затем усиливать циркуляцию охлаждающего воздуха при помощи вентиляторов и масла при помощи насосов (см. разд. 10, А, А1, с. 188, сл.).

Поверхность охлаждения обмоток с ростом мощности трансформатора, естественно, возрастает медленнее, чем их потери. Для обеспечения надлежащего охлаждения обмоток искусственно развивается их поверхность охлаждения введением осевых и радиальных масляных каналов и охлаждение форсируется путем принудительного движения масла в контуре обмотки – бак охладителя.

Выводы из закона роста мощности и размеров трансформатора

1. С увеличением мощности трансформатора снижаются относительные потери мощности и увеличивается КПД.
2. С увеличением мощности трансформатора уменьшается удельных расход материалов на единицу мощности (кг/кВ·А).
3. С увеличением мощности трансформатора поверхность охлаждения трансформатора растёт медленнее, чем абсолютные потери мощности. В связи с этим развивают и интенсифицируют систему охлаждения.

ПЗ.2. Расчет основных размеров трансформатора на ПК

(курсовое проектирование)

В книге приведена Pascal-программа расчета основных размеров трехфазных трансформаторов на ПК и освещена методика выбора и подготовки исходных данных, необходимых для проведения расчетов.

Использование ПК позволяет рассчитывать параметры трансформаторов с значительно большей точностью и скоростью, чем при ручном расчете.

Реализация разработанной автором программы позволяет осуществить рациональный выбор основных размеров трансформатора на основе вариантного расчета с оптимизацией по минимуму стоимости активной части трансформатора, с учетом ряда ограничений по нормированным параметрам.

А. Задание на проект и схема расчета трансформатора

В задании на проект двухобмоточного трансформатора должны быть указаны следующие данные:

- 1) полная мощность трансформатора S , кВ·А;
- 2) число фаз m ;
- 3) частота f , Гц;
- 4) номинальные линейные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений U_2 и U_1 , В; способ регулирования напряжения – переключение без возбуждения (ПБВ) или регулирование под нагрузкой (РПН), число ступеней, напряжение ступени и пределы регулирования напряжения;
- 5) схема и группа соединения обмоток;
- 6) способ охлаждения трансформатора;
- 7) режим нагрузки – продолжительный, кратковременный или другой. При кратковременном или другом режиме должны быть указаны его параметры – продолжительность работы и интервалов и отдаваемая трансформатором мощность (или ток);
- 8) характер установки – внутренняя или наружная, т. е. внутри помещения или на открытом пространстве.

Кроме этих данных в задании обычно указываются некоторые параметры трансформатора:

- 1) напряжение короткого замыкания u_k , %;
- 2) потери короткого замыкания P_k , Вт;

3) потери холостого хода P_x , Вт;

4) ток холостого хода i_x , %.

В задании, как правило, должно быть обусловлено соответствие трансформатора требованиям определенного ГОСТ. Могут быть поставлены также некоторые дополнительные условия, например определенная марка стали, выполнение обмоток из медного или алюминиевого провода и др.

В задании на расчет силового автотрансформатора обычно указывается его «проходная» мощность $S_{\text{прох}}$, равная произведению линейного напряжения U на линейный ток, $S_{\text{прох}} = U \cdot I \cdot 10^{-3}$ у однофазного и $S_{\text{прох}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot 10^{-3}$ у трехфазного автотрансформатора.

При проектировании трансформатора в соответствии с заданием должно быть также обеспечено его соответствие современным требованиям к электрической и механической прочности и нагревостойкости обмоток и других частей и к экономичности его работы в эксплуатации. Экономичность трансформатора в эксплуатации определяется путем сопоставления стоимости трансформатора, отнесенной к определенному промежутку времени, с эксплуатационными затратами за этот промежуток и зависит в значительной мере от правильного выбора таких его параметров, как потери холостого хода и короткого замыкания.

При индивидуальном проектировании силового трансформатора общего или специального назначения параметры холостого хода и короткого замыкания, как правило, определяются соответствующим ГОСТ. Получение заданных параметров достигается рациональным выбором основных размеров трансформатора, а также подбором соответствующих удельных нагрузок активных материалов – индукции в магнитной системе и плотности

Расчет трансформатора тесно связан со вторым этапом проектирования – конструированием. На самых первых стадиях расчета необходимо произвести выбор основной конструктивной схемы трансформатора, а также в ходе расчета выбирать конструкции его отдельных частей – магнитной системы, обмоток, изоляционных деталей, отводов и т. д. Поэтому, приступая к работе, расчетчик должен иметь ясное представление о современных конструкциях частей трансформатора, практически возможных пределах их применения, достоинствах и недостатках (разд. 9 и 10, с. 169, сл.).

Отдельные стадии расчета могут чередоваться в той или иной последовательности в зависимости от удобства выполнения этой работы, однако всегда желательно придерживаться такого порядка, который обеспечивает наименьшую затрату времени и требует наименьшего количества повторных пересчетов. Необходимость получения трансформатора с определенными параметрами заставляет производить некоторые исправления на проделанном этапе расчета, если заданные параметры не получаются сразу. Во избежание больших переделок выполненной части расчета рекомендуется всю схему расчета строить так, чтобы заданные параметры P_k , P_x и u_k учитывались уже при выборе исходных данных и определении основных размеров трансформатора и подгонялись к норме на возможно более ранних стадиях расчета. Этим условиям отвечает схема расчета трансформатора, приведенная ниже.

Схема расчета трансформатора

1. Определение основных электрических величин [1, гл. 3 и 4; 2]:

- а) линейных и фазных токов и напряжений обмоток ВН и НН;
- б) испытательных напряжений обмоток;
- в) активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания.

2. Расчет основных размеров трансформатора [1, гл. 2, 3 и 4; 2]:

Расчет основных размеров выполняется на ПК по Pascal-программе (с. 483, сл.).

- а) выбор схемы, конструкции и технологии изготовления магнитной системы;
- б) выбор марки и толщины листов стали и типа изоляции пластин, индукции в магнитной системе;
- в) выбор материала обмоток;
- г) предварительный выбор конструкции обмоток [1, гл. 5];
- д) выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток;
- е) предварительный расчет трансформатора и выбор соотношения основных размеров β с учетом заданных значений u_k , P_k и P_x по [1, разд. 3.4 – 3.7] или только по разд. 3.7;
- ж) определение диаметра стержня и высоты обмотки, предварительный расчет магнитной системы.

3. Расчет обмоток НН и ВН [1, гл. 5 и 6]:

- а) выбор типа обмоток НН и ВН;
- б) расчет обмотки НН;
- в) расчет обмотки ВН.

4. Определение параметров короткого замыкания [1, гл. 7]:

- а) потерь короткого замыкания – основных и добавочных в обмотках, добавочных в элементах конструкции;
- б) напряжения короткого замыкания;
- в) механических сил в обмотках.

5. Окончательный расчет магнитной системы.

Определение параметров холостого хода ([1, гл. 8]:

- а) размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма;
- б) массы стержней и ярм и массы стали;
- в) потерь холостого хода;
- г) тока холостого хода.

6. Тепловой расчет и расчет системы охлаждения [1, гл. 9]:

- а) поверочный тепловой расчет обмоток;
- б) расчет системы охлаждения (бака, радиаторов, охладителей).

Определение габаритных размеров трансформатора:

- в) превышений температуры обмоток и масла над воздухом;
- г) массы масла и основных размеров расширителя.

7. Экономический расчет [1, гл. 1 и 3]:

- а) расчет расхода активных и конструктивных материалов;
- б) ориентировочный расчет себестоимости и цены трансформатора;
- в) определение приведенных годовых затрат и оценка экономичности рассчитанного трансформатора.

Б. Расчет основных электрических величин трансформаторов

Расчет трансформатора начинается с определения основных электрических величин – мощности на одну фазу и стержень, номинальных токов на стороне ВН и НН, фазных токов и напряжений.

Мощность одной фазы трансформатора, $\text{kB}\cdot\text{A}$,

$$S_{\phi} = S/m. \quad (\text{П3.11})$$

Мощность на одном стержне

$$S' = S/c, \quad (\text{П3.12})$$

где c – число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора;
 S – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Номинальный (линейный) ток обмотки ВН, СН и НН трехфазного трансформатора, А,

$$I = S \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot U), \quad (\text{П3.13})$$

где S – мощность трансформатора, кВ·А; U – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки, В.

Номинальный ток однофазного трансформатора, А,

$$I = S \cdot 10^3 / U. \quad (\text{П3.14})$$

Фазный ток обмотки одного стержня трехфазного трансформатора, А:
при соединении обмоток в звезду или зигзаг

$$I_{\phi} = I, \quad (\text{П3.15})$$

при соединении обмоток в треугольник

$$I_{\phi} = I / \sqrt{3}, \quad (\text{П3.16})$$

где номинальный ток I определяется по (П3.13).

Фазное напряжение трехфазного трансформатора, В:

при соединении в звезду или зигзаг

$$U_{\phi} = U / \sqrt{3}, \quad (\text{П3.17})$$

при соединении в треугольник

$$U_{\phi} = U; \quad (\text{П3.18})$$

здесь U – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки, В.

Потери короткого замыкания, указанные в задании, дают возможность определить активную составляющую напряжения короткого замыкания, %:

$$u_a = P_k / 10 \cdot S, \text{ А}, \quad (\text{П3.19})$$

где P_k – в Вт; S – в кВ·А.

Реактивная составляющая при заданном u_k определяется по формуле

$$u_p = \sqrt{(u_k^2 - u_a^2)}. \quad (\text{П3.20})$$

В. Основные размеры трансформатора

Магнитная система трансформатора является основой его конструкции. Выбор основных размеров магнитной системы вместе с основными размерами обмоток определяет главные размеры активной части и всего трансформатора. Рассмотрим двухобмоточный трансформатор с плоской магнитной системой стержневого типа со стержнями, имеющими сечение в форме симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность, и с концентрическим расположением обмоток. Магнитная система такого трехфазного трансформатора с обмотками схематически изображена на рис. ПЗ.1.

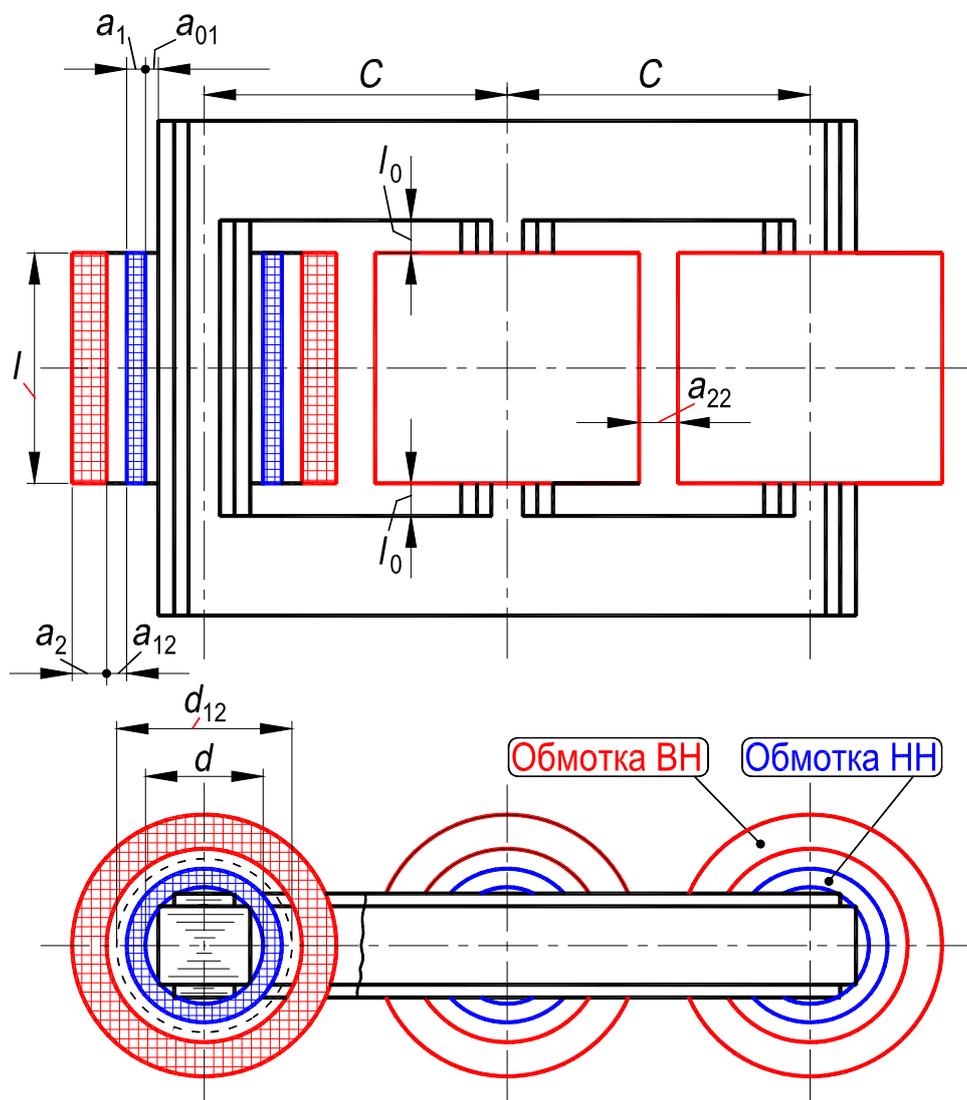


Рис. ПЗ.1. Основные размеры трансформатора

Диаметр d окружности, в которую вписано ступенчатое сечение стержня, является одним из его основных размеров. Вторым основным размером трансформатора является осевой размер l (высота) его обмоток. Обычно обе обмотки трансформатора имеют одинаковую высоту. Третьим основным

размером трансформатора является средний диаметр витка двух обмоток, или диаметр осевого канала между обмотками d_{12} , связывающий диаметр стержня с радиальными размерами обмоток a_1 и a_2 и осевого канала между ними a_{12} .

Если эти три размера выбраны или известны, то остальные размеры, определяющие форму и объем магнитной системы и обмоток, например высота стержня l_c , расстояние между осями соседних стержней S и т. д., могут быть найдены, если известны допустимые изоляционные расстояния от обмоток ВН до заземленных частей и до других обмоток (a_{12}, a_{22}, l_0).

Два основных размера, относящихся к обмоткам d_{12} и l_c , могут быть связаны отношением средней длины окружности канала между обмотками $\pi \cdot d_{12}$ к высоте обмотки l :

$$\beta = \pi \cdot d_{12} / l. \quad (\text{ПЗ.21})$$

Приблизительно произведение $\pi \cdot d_{12}$ можно приравнять к средней длине витка двух обмоток $\pi \cdot d_{12} \approx l_v$ или $l_v / l \approx \beta$.

Величина β определяет соотношение между диаметром и высотой обмотки. Значение β может варьироваться в широких пределах и практически изменяется в масляных и сухих трансформаторах существующих серий в пределах от 1 до 3,5. При этом меньшим значениям β соответствуют трансформаторы относительно узкие и высокие, большим – широкие и низкие. Это наглядно показано на рис. ПЗ.2, на котором представлены два трансформатора одинаковой мощности, одного класса напряжения, рассчитанных при одинаковых исходных данных (B_c, k_c), с одинаковыми параметрами короткого замыкания (P_k и u_k) для значений $\beta = 1,2$ и 3,5.

Различным значениям β соответствуют и разные соотношения между массами активных материалов – стали магнитной системы и металла обмоток. Меньшим значениям β соответствует меньшая масса стали и большая масса металла обмоток. С увеличением β масса стали увеличивается, масса металла обмоток уменьшается. Таким образом, выбор β существенно влияет не только на соотношение размеров трансформатора, но и на соотношение масс активных и других материалов, а следовательно, и на стоимость трансформатора.

Вместе с этим изменение β сказывается и на технических параметрах трансформатора: потерях и токе холостого хода, механической прочности и нагревостойкости обмоток, габаритных размерах.

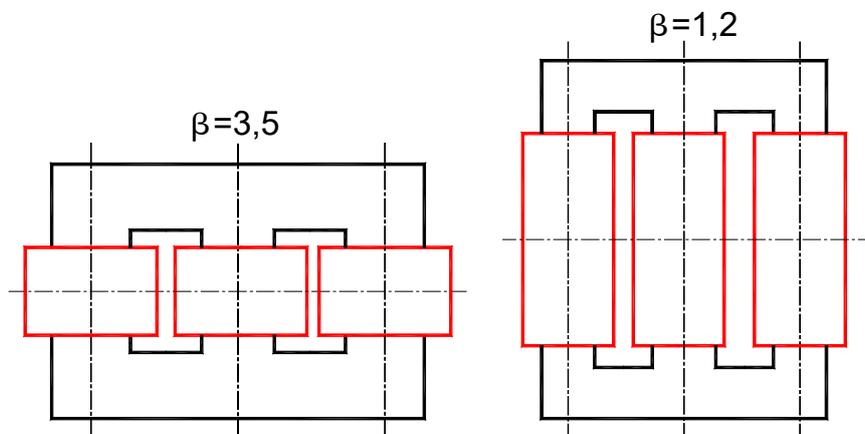


Рис. ПЗ.2. Соотношение размеров двух трансформаторов с разными значениями β

Для вывода формулы, связывающей диаметр стержня трансформатора с его мощностью, воспользуемся следующими соотношениями, известными из теории трансформаторов.

Мощность трансформатора на один стержень, кВ·А,

$$S' = U \cdot I \cdot 10^{-3}. \quad (\text{ПЗ.22})$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %,

$$u_p = (7,9f \cdot I \cdot w \cdot \pi \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot k_p \cdot 10^{-4}) / u_{вл},$$

или

$$u_p = (7,9f \cdot I \cdot w \cdot \beta \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot k_p \cdot 10^{-4}) / u_{вл}, \quad (\text{ПЗ.23})$$

где $\beta = \pi \cdot d_{12} / l$; $a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3$; k_p – коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского); линейные размеры выражены в метрах.

Одновременно заметим, что напряжение витка трансформатора, V , может быть записано в виде

$$u_{в} = 4,44f \cdot B_c \cdot \Pi_c, \quad (\text{ПЗ.24})$$

где B_c – максимальная индукция в стержне, Тл; $\Pi_c = k_c \pi d^2 / 4$ – активное сечение стержня, м²; k_c – коэффициент заполнения площади круга сталью согласно [1, разд. 2.3].

Заменив в (ПЗ.22) напряжение обмотки U произведением $u_B \cdot w$ и подставив значение тока обмотки I , определенное из (ПЗ.13), и значение u_B по (ПЗ.24), получим

$$S' = u_B \cdot w \cdot u_p \cdot u_B \cdot 10^4 \cdot 10^{-3} / 7,9f \cdot w \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p = (4,44f \cdot B_c \pi d^2 k_c)^2 u_p \cdot 10 / 7,9f \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p \cdot 4^2.$$

Проведя сокращения и решив это уравнение относительно d , имеем окончательно

$$d = 0,507(S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p / f \cdot u_p B_c^2 k_c^2)^{1/4}, \quad (\text{ПЗ.25})$$

где $0,507 = (7,9 / (\pi^2 \cdot 1,11^2 \cdot 10))^{1/4}$.

Формула (ПЗ.25) позволяет определить главный размер трансформатора – диаметр стержня его магнитной системы.

Величины, входящие в подкоренное выражение формулы (ПЗ.25), впервые предложенной Г.Н. Петровым, можно подразделить на три категории: 1) величины, заданные при расчете, – мощность обмоток на одном стержне трансформатора S' , кВ·А, частота сети f , Гц, и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания u_p , %; 2) величины, выбираемые при расчете, – отношение длины окружности канала между обмотками (средней длины витка двух обмоток) к высоте обмотки l , максимальная индукция в стержне B_c , Тл, и коэффициент заполнения активной сталью площади круга, описанного около сечения стержня k_c ; 3) величины, определяемые в ходе последующего расчета, – приведенная ширина канала рассеяния a_p , м, и коэффициент приведения идеализированного поля рассеяния к реальному k_p (коэффициент Роговского).

Таким образом, определение диаметра стержня по (ПЗ.25) связано с выбором некоторых исходных данных (β , B_c , k_c) и предварительным определением данных обмоток трансформатора, получаемых обычно после завершения расчета обмоток a_p и k_p . Выбор исходных данных (β , B_c , k_c) может быть сделан на основании исследования ряда вариантов [1, разд. 3.5 – 3.7] или путем использования заранее разработанных рекомендаций (разд. 3.7). Для определения a_p и k_p должны применяться приближенные методы.

Г. Характеристика Pascal-программы «Расчёт основных размеров трансформатора»

Pascal-программа реализует методику расчета основных размеров трансформатора, разработанную П. М. Тихомировым [1], и позволяет осуществить *расчет трехфазных трансформаторов со следующими признаками:*

- а) конструкция магнитопровода: плоский шихтованный, пространственный стыковой, пространственный витой (разд. 9, с. 169,сл.);
- б) материал магнитопровода: сталь холоднокатаная, сталь горячекатаная (разд. В.11, А, Б, с. 110,сл.);
- в) количество концентрических обмоток на фазу: две, три (разд. 9, Д);
- г) металл обмоточного провода: медный, алюминиевый (разд. В.11, В);
- д) охлаждение: масляное, естественное воздушное (разд. В.10, с. 188,сл.).

При небольшой коррекции программа может быть использована и для расчета однофазного трансформатора.

Для работы программы необходимо выбрать и осуществить ввод в память ПК значения 42 величин, в том числе: 6 заданных величин, 10 выбранных физических величин; 26 выбранных коэффициентов [2, табл. 1 на с. 13 и распечатка файла TransInp.txt на с. 39].

Кроме того в тексте программы представлены в виде констант значения еще 5 коэффициентов.

В Pascal-программе реализован ввод/вывод данных, посредством нестандартных файлов ввода/вывода.

По результатам выполненного расчета выводятся на печать и на экран дисплея значения: а) заданных величин; б) выбранных коэффициентов и физических величин; рассчитанных вспомогательных величин; в) рассчитанных величин, которые определяются последовательно для 9 значений коэффициента β {см. формулу (3.13), с. 104, [1]} и представляются в форме таблицы, принципиально не отличающейся от табл. 3.8 ([1], с. 144). (см. распечатку файла TransOut.txt в [2] на с. 40, 41).

Также выводятся на печать и на экран дисплея признаки рассчитываемого трансформатора и методические указания студенту-расчетчику по анализу результатов расчета (см. в [2] прил. 4 на с. 40, 41).

Для освоения методики расчета основных размеров трансформатора каждый

студент обязан выполнить этот расчет самостоятельно («вручную») для одного значения коэффициента β (оно задается преподавателем-руководителем проекта).

В [2] даны рекомендации по выбору значений коэффициентов и физических величин, необходимых для проведения расчета, и по анализу результатов расчета основных размеров трехфазного трансформатора, выполненного на ПК.

Д. Пример расчёта основных размеров трансформатора на ПК

Для иллюстрации работы программы принят пример расчета трансформатора, рассмотренный в книге проф. П. М. Тихомирова на с. 139, сл. [1].

Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Учебное пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 525 с.

URL-адрес <http://zabudsky.ru/TransKR/RaschTtrans.djvu>.

Д.1. Таблица ПЗ.1. Исходные данные для расчёта трансформатора

1. Полная номинальная мощность трансформатора	$S = 1600$ кВ·А.
2. Номинальное линейное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН)	$U_2 = 35000$ В.
3. Номинальное линейное напряжение обмотки низшего напряжения (НН)	$U_1 = 690$ В.
4. Число фаз	$m = 3$.
5. Частота	$f = 50$ Гц.
6. Схемы и группа соединения обмоток	Y/Y _н -0.
7. Охлаждение трансформатора	Масляное.
8. Режим нагрузки	Продолжительный.
9. Установка	Наружная.
10. Потери короткого замыкания	$P_K = 18000$ Вт.
11. Напряжение короткого замыкания	$u_K = 6,5$ %.
12. Потери холостого хода	$P_X = 3100$ Вт.
13. Ток холостого хода	$i_X = 1,3$ %.
14. Способ регулирования напряжения	ПБВ, $U_2 \pm (2 \times 2,5 \%)$ В.
15. Металл обмоток	Си.

Дополнительные условия:

конструкция магнитной системы – плоский шихтованный магнитопровод.

После определения основных электрических величин, в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 1 [2, с. 13, сл.] осуществляется выбор 42 значений исходных данных, которые заносятся в Формуляр выбора исходных данных [2, с. 37].

Выбранные значения исходных данных заносятся студентом-расчетчиком в нестандартный файл ввода TransInp.txt, который вместе с выполняемым файлом TransPas.exe [2, с. 2], должен быть размещен в папке C:\TR. После запуска программы TransPas.exe на выполнение формируется нестандартный файл вывода TransOut.txt, который также расположен в папке C:\TR. В этом файле находится таблица с результатами расчета основных размеров трансформатора [2, с. 40]. Также формируется файл TransGr.dat для построения графика зависимостей $C_{ак,ч}$, P_x , i_x , J , $\sigma_p = f(\beta)$ [2, с. 42].

Д.2. Формуляр выбора исходных данных (трансформатор ТМ–1600/35)

# пп	Обозначение величины		Численное значение величины	Ед. изм. величины [1]	# стр- цы [1]	Примечание (ссылка на [1])
	[1]	Pascal- программа				
1	2	3	4	5	6	7
1. Заданные величины						
1.1	S'	Ss	533,3	кВ·А	97	Рис. 2.5, д на с. 54
1.2	P_k	Pk	18000	Вт	-	
1.3	f	f	50	Гц	-	
1.4	U_k	Uk	6,5	%	-	
1.5	U_p	Ur	6,4	%	99	Формула (3.10) на с. 99
1.6	U_a	Ua	1,125	%	99	Формула (3.9) на с. 99
2. Выбираемые величины						
2.1	l_0	lo	7,5	см	184	с. 169: ОВН $\rightarrow U_{исп}=85$ кВ; ОНН $\rightarrow U_{исп}=5$ кВ
2.2	a_{12}	a12	2,7	см	184	Табл. 4.5 на с. 184
2.3	a_{22}	a22	3,0	см	184	-- « -- « --
2.4	B_c	Bs	1,62	Тл	78	Табл. 2.4 на с. 78
2.5	p_c	Pus	1,353	Вт/кг	376	Табл. 8.10 на с. 376
2.6	$p_я$	Puer	1,242	Вт/кг	376	$B_я = B_c/1,03 = 1,57$ Тл
2.7	q_c	Qus	1,956	В·А/кг	390	Табл. 8.17 на с. 390
2.8	$q_я$	Quer	1,66	В·А/кг	390	-- « -- « --
2.9	$q_{зп}$	Quzp	2,51	В·А/см ²	390	$B_c = 1,62$ Тл
2.10	$q_{зк}$	Quzk	0,32	В·А/см ²	390	$B_c/\sqrt{2} = 1,62/\sqrt{2} = 1,145$ Тл

# пп	Обозначение величины		Численное значение величины	Ед. изм. величины [1]	# стр- цы [1]	Примечание (ссылка на [1])
	[1]	Pascal- программа				
1	2	3	4	5	6	7
3. Выбираемые коэффициенты						
3.1	-	L1	2	-	-	Признак металла обмоток - Cu
3.2	k_c	Ks	0,9	-	118	$k_{кр}=0,928$, см. с. 82; $k_3=0,97$, см. с. 77
3.3	$k_я$	Ker	1,03	-	92	Табл. 2.8 на с. 92
3.4	$k_д$	Kdr	0,91	-	131	Табл. 3.6 на с. 131
3.5	-	Kds1	1,15	-	383	Табл. 8.14 на с. 383
3.6	-	Kds2	1,15	-	383	-- « -- « --
3.7	-	Kds3 *	6,62	-	383	Расчет Kds3 выполнен на след-й стр-це
3.8	-	Kdnm1	1,284	-	396	с. 75, 89, 90
3.9	-	Kdnm2	1,284	-	396	-- « -- « --
3.10	-	Kdnm3 **	110,4	-	395	Расчет Kdnm3 выполнен на след-й стр-це
3.11	-	Kdnm4	1,07	-	396	
3.12	k	Kmal	0,51	-	121	Табл. 3.3 на с. 121
3.13	e	E	0,41	-	126	с. 89 - 92
3.14	$k_{о,с}$	Kos	2,36	-	134	Табл. 3.7 на с. 134
3.15	-	Kug	0,492	-	128	Формула (3.45а) на с. 128
3.16	b	B	0,31	-	125	Табл. 3.5 на с. 125
3.17	a	Amal	1,4	-	123	Табл. 3.4 на с. 123
3.18	n	NN	1	-	373	
3.19	-	Kxg	1	-	124	
3.20	-	Kpzk	1,11	-	137	Формула (3. 59а) на с. 137
3.21	-	Kpzp	0,785	-	136	Формула (3.59) на с. 136
3.22	$n_{зп}$	Nzp	3	-	395	с. 79, 80; рис. 8.14 на с. 399; табл. 8.20
3.23	$n_{зк}$	Nzk	4	-	395	- « -; см. ф-лы для P_x и Q_x на с. 401 и 402
3.24	-	S	1	-	-	Признак охлаждения
3.25	-	Ber	2,4	-	127	Формула (3.43) на с. 127
3.26	-	Ob	2	-	-	Признак количества обмоток на фазу

* Расчет значения коэффициента K_{ds3}

(к п. 3.7 Формуляра, см. в [2] табл. 1 на с. 13 и разд. 6.1 на с. 23).

Коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_{ds3} = K_{ds1} \cdot [(k_{п,у}/2) \cdot (p_c + p_я) - 6 \cdot p_я],$$

где $K_{ds1} = 1,15$ (п. 3.5 в Формуляре выбора исходных данных),

$$p_c = 1,353 \text{ Вт/кг (п. 2.5 в Формуляре),}$$

$$p_я = 1,242 \text{ Вт/кг (п. 2.6 в Формуляре),}$$

$$k_{п,у} = 10,18 \text{ [1, табл. 8.13 на с. 382].}$$

$$K_{ds3} = 1,15 \cdot [(10,18/2) \cdot (1,353 + 1,242) - 6 \cdot 1,242] = 6,62.$$

** Расчет значения коэффициента K_{dnm3}

(к п. 3.10 Формуляра, см. в [2] табл. 1 на с. 13 и разд. 6.2 на с. 25)

Коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_{dnm3} = K_{dnm1} \cdot [(k_{т,у} \cdot k_{т,пл} / 2) \cdot (q_c + q_я) - 6 \cdot q_я],$$

где $K_{dnm1} = 1,20 - 1,07 = 1,284$ (п. 3.8 в Формуляре),

$$q_c = 1,956 \text{ В·А/кг (п. 2.7 в Формуляре),}$$

$$q_я = 1,66 \text{ В·А/кг (п. 2.8 в Формуляре),}$$

$$k_{т,у} = 42,45 \text{ [1, табл. 8.20 на с. 395],}$$

$$k_{т,пл} = 1,25 \text{ [1, табл. 8.21 на с. 396].}$$

$$K_{dnm3} = 1,284 \cdot [(42,45 \cdot 1,25/2) \cdot (1,956 + 1,66) - 6 \cdot 1,66] = 110,4.$$

Д.3. Файл TransInp.txt с исходными данными для расчета основных размеров трансформатора

(в файл заносятся данные из графы 4 формуляра)

533.3	18000.0	50.0	6.5	6.4	1.125	7.5
2.7	3.	1.62	1.38	1.29	3.12	2.69
3.51	0.158	2	0.86	1.02	0.91	1.08
1.08	4.502	1.21	1.21	92.952	1.08	0.52
0.411	2.21	0.493	0.28	1.4	1.0	1.0
1.11	0.785	3.0	4.0	1.0	2.4	2.0

Д.4. Файл TransOut.txt с результатами расчета основных размеров трансформатора

Исходные (заданные) величины:

Мощность на стержень	Ss=	533.3000	кВ.А
Потери короткого замыкания	Pk=	18000.0000	Вт
Частота напряжения	f =	50.0000	Гц
Напряжение короткого замыкания	Uk=	6.5000	%
Активная составл. напряжения КЗ	Ua=	1.1250	%
Реактив. составл. напряжения КЗ	Ur=	6.4000	%

Признаки рассчитываемого трансформатора:

Конструкция магнитопровода	- плоский шихтованный
Материал магнитопровода	- сталь холоднокатаная
Число обмоток на фазу	- двухобмоточный
Металл обмоток	- медь
Охлаждение	- масляное

Выбранные коэффициенты:

l1 = 2	Ks = 0.860	Ker = 1.020	Kdr = 0.910	Kds1 = 1.080
Kds2 = 1.080	Kds3= 4.502	Kdnm1= 1.210	Kdnm2= 1.210	Kdnm3= 92.952
Kdmn4= 1.080	Kmal= 0.520	E = 0.411	Kos = 2.210	Kug = 0.493
B = 0.280	Amal= 1.400	NN = 1.000	Kxg = 1.000	Kpzk = 1.110
Kpzp = 0.785	Nzp = 3.000	Nzk = 4.000	s = 1.000	Ber = 2.400
Ob = 2.000				

Выбранные физические величины:

l _o = 7.500 см	a ₁₂ = 2.700 см	a ₂₂ = 3.000 см
B _s = 1.620 Тл	P _{us} = 1.380 Вт/кг	P _{uer} = 1.290 Вт/кг
	Q _{us} = 3.120 В.А/кг	Q _{uer} = 2.690 В.А/кг
	Q _{uzp} = 3.510 В.А/см ²	Q _{uzk} = 0.158 В.А/см ²

Рассчитанные вспомогательные величины:

a _r = 5.199 см	
A = 22.960 см	
A ₁ = 824.849 кг	A ₂ = 122.410 кг
B ₁ = 532.838 кг	B ₂ = 63.261 кг
C ₁ = 737.589 кг	
K _{kz} = 34.183 д.е.	M = 13.876 МПа

		2.1. Коэффициент Beta[I]						
0.850	1.200	1.550	1.804	2.250	2.600	2.950	3.300	3.650
		2.2. Значения x[I]						
0.960	1.047	1.116	1.159	1.225	1.270	1.311	1.348	1.382
		2.3. Значения x2[I]						
0.922	1.095	1.245	1.343	1.500	1.612	1.718	1.817	1.910
		2.4. Значения x3[I]						
0.885	1.147	1.389	1.557	1.837	2.048	2.251	2.448	2.641
		2.5. Масса стали стержней, Gs[I], кг						
971.908	922.189	891.649	876.142	857.101	846.957	839.634	834.361	830.626
		2.6. Масса стали ярм, Ger[I], кг						
530.02	680.21	818.95	914.38	1073.78	1193.01	1308.05	1419.53	1527.93
		2.7. Масса стали магнитопровода, Gst[I], кг						
1501.93	1602.40	1710.60	1790.53	1930.88	2039.96	2147.68	2253.89	2358.55
		2.8. Масса стали угла магнитопровода, Gug[I], кг						
46.338	60.015	72.715	81.481	96.164	107.178	117.827	128.163	138.228
		2.9. Потери в стали стержней, Ps[I], Вт						
1448.53	1374.43	1328.91	1305.80	1277.42	1262.31	1251.39	1243.53	1237.96
		2.10. Потери в стали ярм, Per[I], Вт						
738.42	947.68	1140.96	1273.92	1495.99	1662.10	1822.37	1977.69	2128.71
		2.11. Потери в стали углов магнитопровода, Pug[I], Вт						
208.62	270.19	327.36	366.83	432.93	482.52	530.46	576.99	622.30
		2.12. Потери холостого хода, Pst[I], Вт						
2395.57	2592.30	2797.24	2946.55	3206.34	3406.92	3604.22	3798.21	3988.98
		2.13. Площадь зазора для прямого стыка, Plzp[I], см²						
328.119	389.864	443.086	478.014	533.843	573.864	611.270	646.516	679.937
		2.14. Площадь зазора для косоугольного стыка, Plzk[I], см²						
463.965	551.272	626.529	675.918	754.861	811.451	864.344	914.182	961.440
		2.15. Намагничив. мощность для стержней, Qs[I], В.А						
3669.15	3481.45	3366.15	3307.61	3235.73	3197.43	3169.79	3149.88	3135.78
		2.16. Намагничив. мощность для ярм, Qer[I], В.А						
1725.15	2214.03	2665.60	2976.23	3495.04	3883.12	4257.57	4620.43	4973.25
		2.17. Намагничив. мощность для углов, Qug[I], В.А						
4307.2	5578.6	6759.0	7573.8	8938.7	9962.4	10952.2	11913.0	12848.6
		2.18. Намагничив. мощность для зазоров, Qz[I], В.А						
4048.19	4809.96	5466.60	5897.52	6586.31	7080.08	7541.58	7976.42	8388.76
		2.19. Намагничивающая мощность холостого хода, Qx[I], В.А						
13750	16084	18257	19755	22256	24123	25921	27660	29346
		2.20. Ток холостого хода, Ix[I], %						
0.8594	1.0053	1.1412	1.2348	1.3911	1.5078	1.6202	1.7288	1.8343
		2.21. Масса металла обмоток, Go[I], кг						
800.0	673.3	592.4	549.2	491.7	457.4	429.4	406.0	386.1
		2.22. Масса изолиров. провода обмоток, Gip[I], кг						
848.030	713.723	627.993	582.106	521.230	484.879	455.208	430.391	409.236
		2.23. Стоимость обмоточного провода, Co[I], усл.ед.						
1874.15	1577.33	1387.86	1286.45	1151.92	1071.58	1006.01	951.16	904.41
		2.24. Стоимость активной части, Sakt[I], усл.ед.						
3376.07	3179.73	3098.46	3076.98	3082.80	3111.55	3153.69	3205.06	3262.97
		2.25. Плотность тока в обмотках, J[I], А/мм²						
2.921	3.184	3.394	3.525	3.726	3.863	3.987	4.100	4.205
		2.26. Механ. растяг. напряжение в проводе, Sigma[I], МПа						
12.283	15.909	19.275	21.599	25.491	28.411	31.234	33.974	36.642
		2.27. Диаметр стержня магнитопровода, d[I], см						
22.046	24.031	25.619	26.609	28.120	29.155	30.091	30.946	31.736
		2.28. Диаметр осевого канала между обмотками, d12[I], см						
30.865	33.643	35.866	37.253	39.369	40.818	42.127	43.325	44.430
		2.29. Высота обмоток, l[I], см						
114.017	88.034	72.658	64.842	54.941	49.295	44.840	41.224	38.222
		2.30. Расстоян. между осями соседн. стержней, C[I], см						
42.737	46.072	48.740	50.404	52.942	54.681	56.252	57.689	59.016

Методические указания студенту-расчетчику

/Даны ссылки на книгу проф. Тихомирова П.М. [1]/

На основе анализа данной таблицы результатов расчета основных размеров трансформатора необходимо:

1. Выбрать значение коэффициента Beta (строка 2.1), соответствующее минимуму стоимости активной части $C_{ак,ч}$ (строка 2.24) трансформатора;
2. Проверить соответствуют ли выбранному значению коэффициента Beta:
 - 2.1. Заданное значение потерь холостого хода (см. с. 384 [1] и строку 2.12),
 - 2.2. Заданное значение тока холостого хода (см. с. 398 [1] и строку 2.20),
 - 2.3. Рекомендованное значение плотности тока в обмотках (см. табл. 5.7 на с. 257 [1] и строку 2.25),
 - 2.4. Допустимое механическое растягивающее напряжение в проводе (см. с. 340 [1] и строку 2.26);
3. При соблюдении условий, указанных в пунктах 1 и 2, следует продолжить расчет трансформаторов далее согласно методике проф. П.М.Тихомирова;
4. При несоблюдении условий, указанных в пунктах 1 и 2, следует:
 - 4.1. Ввести соответствующие коррективы [1, гл. 11) в выполненный расчет основных размеров трансформатора,
 - 4.2. В соответствии с введенными коррективатами произвести изменения в исходных данных,
 - 4.3. Запустить программу на счет с измененными исходными данными для выполнения еще раз расчета основных размеров трансформатора на ПК.

Д.5. Анализ результатов расчёта

На основе анализа результатов расчета основных размеров трансформатора, приведенных в прилагаемой распечатке [2, с. 40, сл.], устанавливается целесообразное значение коэффициента $\beta = \pi \cdot d_{12}/l = \pi \cdot 36,4/63,4 \approx 1,8$ /см. строку 2.1 на с. 40 [2] в файле TransOut.txt/.

По данным таблицы строятся графики зависимостей $C_{ак,ч}, P_x, i_x, J, \sigma_p = f(\beta)$ [2, см. рис. ПЗ.3 на с. 42].

Указанное значение коэффициента β принято, так как ему соответствуют:

- минимум стоимости активной части трансформатора, составляющий 3088 усл. ед. /строка 2.24/;
- значение потерь холостого хода ~ 3176 Вт /строка 2.12/ (отклонение от заданной величины в пределах нормы – ([1], с. 384);
- значение тока холостого хода $\sim 1,11$ % /строка 2.20/ (отклонение от заданной величины в пределах нормы – ([1], с. 398);

- приемлемое значение плотности тока в обмотках $\sim 3,60 \text{ А/мм}^2$ /строка **2.25/** ([1], см. табл. 5.7 и примечания к ней на с. 257);
- допустимое механическое растягивающее напряжение в проводе 21,98 МПа /строка **2.26/** ([1], с. 340, 341).

Выбранному значению коэффициента $\beta = 1,8$ соответствуют три основных размера трансформатора (см. рис. ПЗ.1):

- диаметр окружности, в которую вписано ступенчатое сечение стержня $d = 26 \text{ см}$ /строка **2.27/** ;
- средний диаметр осевого канала между обмотками $d_{12} = 36,4 \text{ см}$ /строка **2.28/**;
- осевой размер (высота) обмоток $l = 63,4 \text{ см}$ /строка **2.29/**.

Расстояние между осями соседних стержней магнитопровода составляет согласно расчету $C = 50,2 \text{ см}$ /строка **2.30/**.

Расчитанное значение d округляется в соответствии с нормализованной шкалой до 26 см ([1], с. 87).

Необходимо указать, что расчет основных размеров трансформатора, выполняемый на ПК, является определяющей фазой всего процесса проектирования такого трансформатора, который будет иметь минимальную стоимость и соответствовать заданию, а также удовлетворять ряду граничных условий (нагревостойкость, механическая прочность и др.).

Разделы 1, 3 – 7 (см. выше Схему расчёта трансформатора) студенты реализуют посредством ручного счёта. Студент должен на собственном опыте, на основе ручного расчета, понять взаимосвязи размеров трансформатора, свойств активных материалов и его технических и экономических параметров с учетом места трансформатора в сети и технологии его производства.

Д.6. Файл TransGr.dat с данными для графической интерпретация результатов расчета

$$/C_{ак,ч}, P_x, i_x, J, \sigma_p = f(\beta)/$$

β	$C_{ак,ч}, \text{ у.е}$	$P_x, \text{ Вт}$	$i_x, \%$	$J, \text{ А/мм}^2$	$\sigma_p, \text{ МПа}$
0.850	3376.071	2395.568	0.859	2.921	12.283
1.200	3179.732	2592.295	1.005	3.184	15.909
1.550	3098.464	2797.241	1.141	3.394	19.275
1.804	3076.981	2946.549	1.235	3.525	21.599
2.250	3082.797	3206.342	1.391	3.726	25.491
2.600	3111.548	3406.919	1.508	3.863	28.411
2.950	3153.691	3604.220	1.620	3.987	31.234
3.300	3205.055	3798.209	1.729	4.100	33.974
3.650	3262.965	3988.977	1.834	4.205	36.642

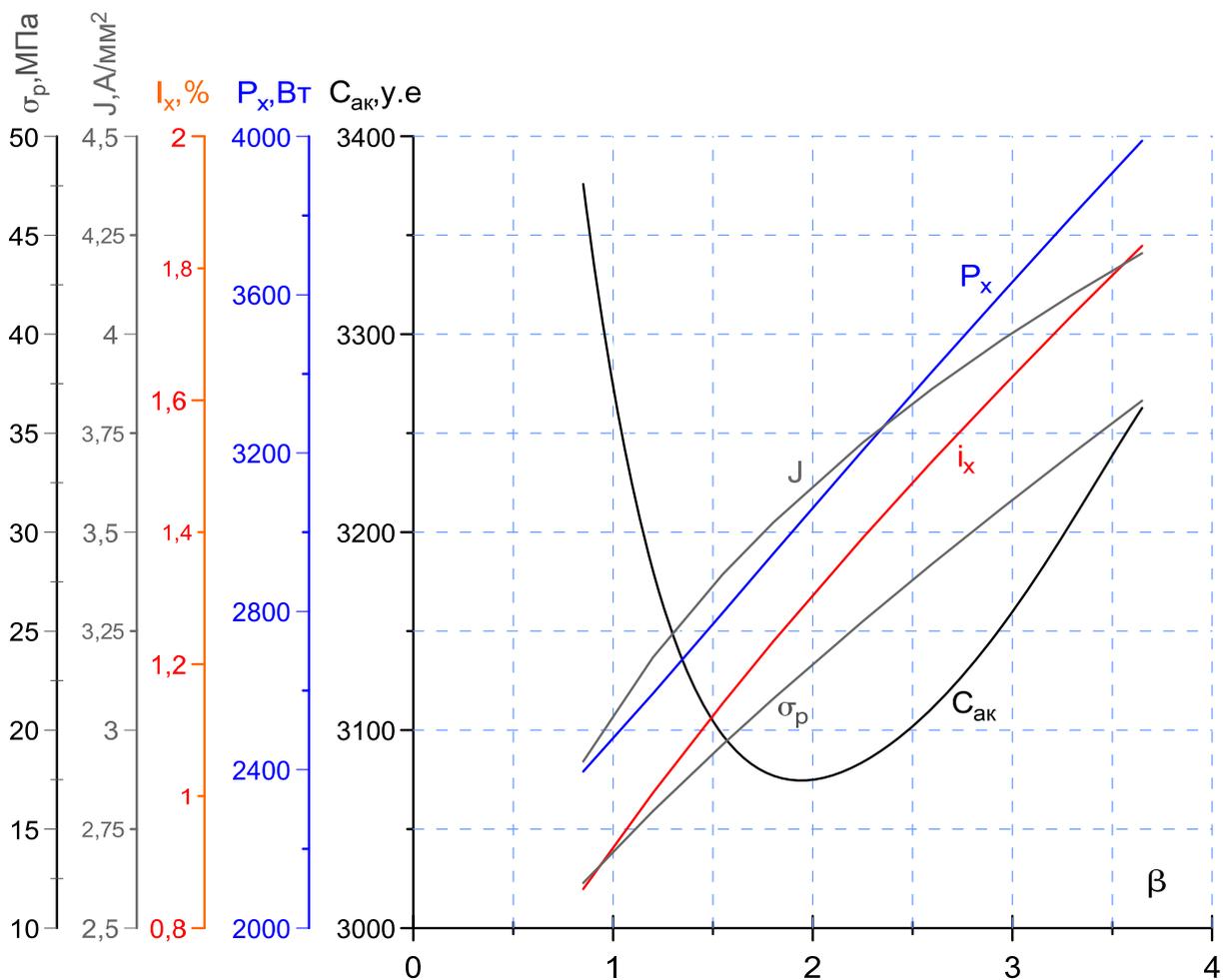


Рис. ПЗ.3. График зависимостей $C_{ак,ч}, P_x, i_x, J, \sigma_p = f(\beta)$

Д.7. Файл TransPas.pas с программой «Расчёт основных размеров трансформатора»

```

{*****}
*ПРОГРАММА «РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»*
*                               (ИСХОДНЫЙ ФАЙЛ TransPas.pas)                               *
* Программа реализует методику расчета основных размеров трехфазного *
* трансформатора, изложенную в книге П.М.Тихомирова -Расчет трансформаторов- *
* торов- , 1986 г. *
* *
* Программа позволяет осуществить расчет основных размеров трансформаторов *
* со следующими признаками: *
* 1) конструкция магнитопровода - плоский шихтованный, *
*                               - пространственный витой, *
*                               - пространственный стыковой; *
* 2) материал магнитопровода - сталь горячекатаная, *
*                               - сталь холоднокатаная; *
* 3) количество обмоток на фазу - двухобмоточный, *
*                               - трехобмоточный; *
* 4) металл обмоток - медь, *
*                               - алюминий; *
* 5) охлаждение - масляное, *
*                               - естественное воздушное. *
* *
* Исходные данные, размещаемые в файле ввода TransInp.txt(см. с. 39): *
*   - 6 заданных величин, *
*   - 10 выбранных физических величин, *
*   - 26 выбранных коэффициентов. *
* Кроме того в программе представлены в виде констант значения еще 5 *
* коэффициентов. *
* Результаты расчета помещаются в файл вывода TransOut.txt (см. с. 40)*
* Программу составил проф. Забудский Е.И., 1982 г.; 2002 г. *
*****}
type vector10 = array[1..10] of real;
type vector2 = array[1..2] of real;

var Ks,Kr,Ker,Kdr,Kds1,Kds2,Kds3,Kmal,
    Kdnm1,Kdnm2,Kdnm3,Kdnm4,Kos,Kug,Lo,NN,Kkz,M,KpzK,Kpzp,
    Kxg,Nzp,Nzk, Ss, Pk, F, Uk, Ua, Ur, a12, a22, Bs, Pus,Puer,
    Qus,Quer,Quzp,Quzk, E, B, Amal, S, Ber,Ob,
    Ar, A, A1, A2, B1, B2, C1: real;
    Kmn,K,Kir,Ko: vector2;
    x,x2,x3,Gs,Ger,Gst,Ps,
    Per,Pst,Gug,Plzk,Plzp,Q,Go,Co,
    Cakt,PLtok,Sigma,d,d12,l,Beta,Gip,
    C,Pug,Qs,Qer,Qug,Qz,Io: vector10;
    I,L1 : integer;
    fi,fo1,fo2 : text;

begin
    assign(fi,'c:\TR\TransInp.txt'); reset(fi);

    assign(fo1,'c:\TR\TransOut.txt'); rewrite(fo1);

    assign(fo2,'c:\TR\TransGr.dat'); rewrite(fo2);

    БЕТА[1]:= 0.85; БЕТА[2]:= 1.2; БЕТА[3]:= 1.55; БЕТА[4]:= 1.804;
    БЕТА[5]:= 2.25; БЕТА[6]:= 2.6; БЕТА[7]:= 2.95; БЕТА[8]:= 3.3;
    БЕТА[9]:= 3.65; БЕТА[10]:= 4.;

    KMN[1]:= 0.00001519; KMN[2]:= 0.00002453;

```

```

        K[1]:= 12.75;          K[2]:= 2.4;
        KIR[1]:= 1.13;        KIR[2]:= 1.06;
        KO[1]:= 301000.;      KO[2]:= 616000.;
        KR:= 0.95;

{      Ввод исходных данных }
  READ (fi, SS, PK, F, UK, UR, UA, LO,    A12, A22, BS, PUS, PUER, QUS, QUER,
        QUZP, QUZK, L1, KS, KER, KDR, KDS1,
KDS2, KDS3, KDNM1, KDNM2, KDNM3, KDNM4, KMAL,
        E, KOS, KUG, B, AMAL, NN, KXG,          KPZK, KPZP, NZP, NZK, S, BER, OB);

{*      Расчет вспомогательных величин }
  AR:=A12+KMAL*(SQRT(SQRT(SS)));
  A:=16*(SQRT(SQRT((SS*AR*KR)/(F*UR*(BS*BS)*(KS*KS)))));
  A1:=KXG*0.0566*(A*A*A)*AMAL*KS;
  A2:=KXG*0.036*(A*A)*LO*KS;
  B1:=KXG*BER*KS*KER*(A*A*A)*(AMAL+B+E)*0.01;
  B2:=KXG*BER*KS*KER*(A*A)*(A12+A22)*0.01;
  C1:=KO[L1]*3*(SS*(AMAL*AMAL))/(KDR*(KS*KS)*(BS*BS)*(F*F)*(A*A)*UA);
  KKZ:=(141/UK)*(1+(EXP(-3.14*(UA/UR))));
  M:=(KMN[L1]*(KKZ*KKZ)*KDR*KR*PK)/(AMAL*A);

{*      Расчет данных для выбора коэффициента Beta }
  for I:=1 to 10 do begin
    X[I]:=SQRT(SQRT(BETA[I]));
    X2[I]:=X[I]*X[I];
    X3[I]:=X[I]*X[I]*X[I];
    GS[I]:=A1/X[I]+A2*X2[I];
    GER[I]:=B1*X3[I]+B2*X2[I];
    GUG[I]:=KUG*KS*KER*(A*A*A)*(X3[I])*0.01;
    GST[I]:=GS[I]+GER[I];
    PS[I]:=exp(NN*Ln(F/50))*(KDS1*PUS*GS[I]);
    PER[I]:=exp(NN*Ln(F/50))*(KDS2*PUER*GER[I]);
    PUG[I]:=exp(NN*Ln(F/50))*(KDS3*GUG[I]);
    PST[I]:=PS[I]+PER[I]+PUG[I];
    PLZP[I]:=KPZP*KS*(A*A)*X2[I];
    PLZK[I]:=KPZK*KS*(A*A)*X2[I];
    QS[I]:=(F/50)*KDNM1*QUS*GS[I];
    QER[I]:=(F/50)*KDNM2*QUER*GER[I];
    QUG[I]:=(F/50)*KDNM3*GUG[I];
    QZ[I]:=(F/50)*KDNM4*(QUZP*NZP*PLZP[I]+QUZK*NZK*PLZK[I]);
    Q[I]:=QS[I]+QER[I]+QUG[I]+QZ[I];
    IO[I]:=Q[I]/(30*SS);
    GO[I]:=C1/X2[I];
    GIP[I]:=KIR[L1]*GO[I];
    CO[I]:=KOS*GIP[I];
    САКТ[I]:=GST[I]+CO[I];
    PLТОК[I]:=SQRT((KDR*PK)/(K[L1]*GO[I]));
    SIGMA[I]:=M*X3[I];
    D[I]:=A*X[I];
    D12[I]:=AMAL*D[I];
    L[I]:=3.14*D12[I]/BETA[I];
    C[I]:=D12[I]+B*D[I]+A12+A22
  end;

{*      Печать исходных величин и признаков трансформатора } {WRITEln(fo1);}
  WRITEln(fo1, ' Расчет основных размеров трехфазного трансформатора');
{* WRITEln(fo1);}
  WRITEln(fo1, ' Исходные (заданные) величины'); {WRITEln(fo1);}
  WRITEln(fo1, ' Мощность на стержень          Ss= ', SS:10:4, ' кВ.А');
  WRITEln(fo1, ' Потери короткого замыкания      Pk= ', PK:10:4, ' Вт');
  WRITEln(fo1, ' Частота напряжения              f = ', F:10:4, ' Гц');

```

```

WRITEln(fo1,' Напряжение короткого замыкания      Uk= ',UK:10:4,' %');
WRITEln(fo1,' Активная составл. напряжения КЗ      Ua= ',UA:10:4,' %');
WRITEln(fo1,' Реактив. составл. напряжения КЗ      Ur= ',UR:10:4,' %');
WRITEln(fo1);

WRITEln(fo1,' Признаки рассчитываемого трансформатора'); { *WRITEln(fo1); }
IF BER < 2.55 then WRITEln(fo1,' Конструкция магнитопровода - плоский
шихтованный')
      else if BER > 2.55 then WRITEln(fo1,' Конструкция
магнитопровода - пространственный стыковой')
      else WRITEln(fo1,' Конструкция
магнитопровода - пространственный ВИТОЙ');
IF KXG = 1 then WRITEln(fo1,' Материал магнитопровода      - сталь хо-
лоднокатаная')
      else WRITEln(fo1,' Материал магнитопровода      - сталь
горячекатаная');
IF OB = 2.0 then WRITEln(fo1,' Число обмоток на фазу      - двухобмоточ-
ный')
      else WRITEln(fo1,' Число обмоток на фазу      - трехобмоточ-
ный');
IF L1 = 1 then WRITEln(fo1,' Металл обмоток              - алюминий')
      else WRITEln(fo1,' Металл обмоток              - медь');
IF S = 1 then WRITEln(fo1,' Охлаждение                  - масляное')
      else WRITEln(fo1,' Охлаждение                  - естественное
воздушное');

{ * Печать выбранных коэффициентов } WRITEln(fo1);
WRITEln(fo1,' Выбранные коэффициенты'); { WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1,' l1 = ',L1:2,' Ks = ',KS:6:3,' Ker = ',KER:6:3,'
Kdr = ',KDR:6:3,' Kds1 = ',KDS1:6:3);
WRITEln(fo1,' Kds2 = ',KDS2:6:3,' Kds3= ',KDS3:6:3,'
Kdnm1= ',KDNM1:6:3,' Kdnm2= ',KDNM2:6:3,' Kdnm3= ',KDNM3:6:3);
WRITEln(fo1,' Kdmn4= ',KDNM4:6:3,' Kmal= ',KMAL:6:3,' E = ',E:6:3,'
Kos = ',KOS:6:3,' Kug = ',KUG:6:3);
WRITEln(fo1,' b = ',B:6:3,' Amal= ',AMAL:6:3,' NN = ',NN:6:3,'
Kxg = ',KXG:6:3,' Kpzk = ',KPZK:6:3);
WRITEln(fo1,' Kpzp = ',KPZP:6:3,' Nzp = ',NZP:6:3,' NzK = ',NZK:6:3,'
s = ',S:6:3,' Ber = ',BER:6:3);
WRITEln(fo1,' ob = ',OB:6:3);
WRITEln(fo1);

{ * Печать выбранных физических величин }
WRITEln(fo1,' Выбранные физические величины'); { * WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1,' l0 = ',Lo:6:3,' см ', ' a12 = ',A12:6:3,' см ', ' a22
= ',A22:6:3,' см ');
WRITEln(fo1,' Bs = ',BS:6:3,' Тл ', ' Pus = ',PUS:6:3,' Вт/кг', '
Puer= ',PUER:6:3,' Вт/кг ');
WRITEln(fo1,' Qus = ',QUS:6:3,' В.А/кг ', ' Quer=
',QUER:6:3,' В.А/кг ');
WRITEln(fo1,' Quzpz= ',QUZP:6:3,' В.А/см2 ', ' Quzk=
',QUZK:6:3,' В.А/см2 ');

{ * Печать рассчитанных вспомогат. величин } WRITEln(fo1);
WRITEln(fo1,' Рассчитанные вспомогат. величины'); { *WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1,' ar= ',AR:6:3,' см');
WRITEln(fo1,' A = ',A:6:3,' см');
WRITEln(fo1,' A1= ',A1:6:3,' кг ', ' A2= ',A2:6:3,' кг ');
WRITEln(fo1,' B1= ',B1:6:3,' кг ', ' B2= ',B2:6:3,' кг ');
WRITEln(fo1,' C1= ',C1:6:3,' кг ');
WRITEln(fo1,' Kkz= ',KKZ:6:3,' д./е.', ' M = ',M:6:3,' МПа');

```

```

{*      Печать таблицы результатов предварительного расчета трансформатора}
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,' Результаты расчета основных размеров трехфазного транс-
форматора '); {* WRITEln(fo1);}
{*      Печать строки результатов расчета }
      WRITEln(fo1,'      2.1. Коэффициент Beta[I]');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',beta[I]:7:3,' '); WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.2. Значения x[I]');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',X[I]:7:3,' '); WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.3. Значения x2[I]');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',X2[I]:7:3,' '); WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.4. Значения x3[I]');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',X3[I]:7:3,' '); WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.5. Масса стали стержней, Gs[I], кг ');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',GS[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.6. Масса стали ярм, Ger[I], кг ');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',GER[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.7. Масса стали магнитопровода, Gst[I],
кг ');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Gst[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.8. Масса стали угла магнитопровода,
Gug[I], кг ');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Gug[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.9. Потери в стали стержней, Ps[I],
Вт');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Ps[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.10. Потери в стали ярм, Per[I], Вт ');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Per[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.11. Потери в стали углов магнитопро-
вода, Pug[I], Вт ');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Pug[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.12. Потери холостого хода, Pst[I], Вт
');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Pst[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.13. Площадь зазора для прямого стыка,
Plzp[I], см2');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Plzp[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.14. Площадь зазора для косоого стыка,
Plzk[I], см2');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',PLZK[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.15. Намагничив. мощность для стержней,
Qs[I], В.А');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',QS[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.16. Намагничив. мощность для ярм,
Qer[I], В.А');
      for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',QER[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
      WRITEln(fo1,'      2.17. Намагничив. мощность для углов,
Qug[I], В.А');

```

```

    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',QUG[I]:7:1,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.18. Намагничив. мощность для зазоров,
Qz[I], B.A');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',QZ[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.19. Намагничивающая мощность холостого
хода, Qx[I], B.A');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Q[I]:7:0,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.20. Ток холостого хода , Ix[I], %');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',IO[I]:7:4,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.21. Масса металла обмоток, Go[I],
кг');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',GO[I]:7:1,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.22. Масса изолиров. провода обмоток,
Gip[I], кг');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',GIP[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.23. Стоимость обмоточного провода,
Co[I], усл.ед. ');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',CO[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.24. Стоимость активной части, Сакт[I],
усл.ед. ');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',САКТ[I]:7:2,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.25. Плотность тока в обмотках, J[I],
А/мм2');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',PLТОК[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.26. Механ. растяг. напряжение в
проводе, Sigma[I], МПа');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',Sigma[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.27. Диаметр стержня магнитопровода,
d[I], см');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',D[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.28. Диаметр осевого канала между
обмотками, d12[I], см');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',D12[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.29. Высота обмоток, l[I], см');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',L[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,'          2.30. Расстоян. между осями соседн.
стержней, C[I], см');
    for I:=1 to 9 do WRITE(fo1,' ',C[I]:7:3,' ');
WRITEln(fo1);

{Формирование файла TransGr.dat для построения графика}
for I:=1 to 9 do begin WRITEln(fo2); WRITE(fo2,' ',beta[I]:7:3,'
',Сакт[i]:7:3,' ',Pst[i]:7:3,
          ' ',Io[i]:7:3,' ', PLtok[i]:7:3,'
',Sigma[i]:7:3) end;

{*    Методические указания студенту-расчетчику} WRITEln(fo1);
WRITEln(fo1,' Методические указания студенту-расчетчику ');

```

```

WRITEln(fo1, ' /Даны ссылки на книгу П.М.Тихомирова -Расчет трансформаторов-
,1986 г./'); { *WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1, ' На основе анализа данной таблицы результатов расчета основных
размеров');
WRITEln(fo1, ' трансформатора необходимо:'); { *WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1, ' 1. Выбрать значение коэффициента Beta, соответствующее мини-
муму');
WRITEln(fo1, ' стоимости активной части Sакт трансформатора;');
{WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1, ' 2. Проверить соответствуют ли выбранному значению коэффи-
циента Beta:'); { *WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1, ' 2.1. Заданное значение потерь холостого хода (см. с. 384),');
WRITEln(fo1, ' 2.2. Заданное значение тока холостого хода (см. с. 398),');
WRITEln(fo1, ' 2.3. Рекомендованное значение плотности тока В обмотках (см.
табл.5.7 на с.257),');
WRITEln(fo1, ' 2.4. Допустимое механическое растягивающее напряжение в
проводе (см. с. 340);'); { * WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1, ' 3. При соблюдении условий, указанных в пунктах 1 и 2, следует
продолжить');
WRITEln(fo1, ' расчет трансформаторов далее согласно методике профессора
П.М.Тихомирова;'); { * WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1, ' 4. При несоблюдении условий, указанных в пунктах 1 и 2,
следует:'); { WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1, ' 4.1. Ввести соответствующие коррективы (см. главу 11) в
выполненный расчет ');
WRITEln(fo1, ' основных размеров трансформатора,');
WRITEln(fo1, ' 4.2 В соответствии с введенными коррективами произвести
изменения');
WRITEln(fo1, ' в исходных данных,');
WRITEln(fo1, ' 4.3. Запустить программу на счет с измененными исходными дан-
ными');
WRITEln(fo1, ' для выполнения еще раз расчета основных размеров транс-
форматора на ПК. ');
close(fi); close(fo1); close(fo2)
END.

```

Литература*

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 525 с.

URL-адрес <http://zabudsky.ru/TransKR/RaschTtrans.djvu>

2. Забудский Е.И. Расчёт основных размеров трёхфазных трансформаторов: учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2014. – 56 с.

URL-адрес http://zabudsky.ru/TransKR/Trans_K_R.pdf

* Данный список литературы относится к Приложению 3, с. 459,сл.

П4. Трансформаторы специального назначения

Оглавление

Введение	492
П4.1. Умножители частоты	495
А. Применение ферромагнитных умножителей частоты и их достоинства. Краткое сопоставление с умножителями других типов	495
Б. Принцип действия и устройство ферромагнитных умножителей частоты	498
В. Утроитель частоты с трехфазным входом и с однофазным выходом	500
Г. Утроитель частоты с трехфазным входом и с трехфазным выходом	502
П4.2. Насыщающиеся и управляемые реакторы	505
А. Классификация реакторов, основные определения	505
Б. Области применения	508
Б.1. Воздушные линии электропередачи высокого напряжения	508
Б.2. Распределительные электросети	517
Б.3. Системы электроснабжения промышленных предприятий	520
В. Основы теории и устройства реакторов трансформаторного типа	522
В.1. Явление генерации гармоник насыщения	522
В.2. Насыщающийся реактор	525
В.3. Управляемый реактор	531
Литература	536
Перечень рисунков в приложении П4	491
Перечень таблиц в приложении П4	491

Перечень рисунков в приложении П4

Рис. П4.1. Типичные внешние характеристики ферромагнитных умножителей частоты .	500
Рис. П4.2. Электромагнитная схема утроителя частоты с однофазным выходом	501
Рис. П4.3. Электромагнитная схема трёхфазного утроителя частоты	503
Рис. П4.4. Звезда векторов МДС утроителя частоты	504
Рис. П4.5, лист 1. Зависимость реактивной мощности Q линии, отнесённой к произведению $P_{\text{ном}} \cdot \lambda$, от отношения $P/P_{\text{ном}}$	510
Рис. П4.5, лист 2. Схема электропередачи с промежуточными УР – a ; распределение напряжения вдоль длинной линии с одинаковыми реактированными участками длиной 600 км – b	511
Рис. П4.6. Условные графические обозначения и вольт-амперные характеристики: a – насыщающегося реактора (НР); b – управляемого реактора	514
Рис. П4.7. Принципиальные схемы СКРМ: a – СКРМ на базе УР; b – СКРМ на базе НР .	515
Рис. П4.8. Электромагнитная схема трёхфазного НР с четырьмя катушками в фазе	526
Рис. П4.9. Векторы МДС катушек фаз: $A-X$ (a), $B-Y$ (b), $C-Z$ (c); звезда векторов МДС стержней магнитопровода НР (e)	527
Рис. П4.10. Векторные диаграммы ЭДС, индуцируемых 1, 3, 5, ..., 15-й гармониками магнитного потока	530
Рис. П4.11. Электромагнитная схема трёхфазного НР с пятью катушками в фазе: a – последовательное соединение катушек в фазе; b – три параллельных ветви в фазе	532
Рис. П4.12. Электромагнитная схема совмещённого УР – a ; структурная схема обмотки управления ОУ – b	533
Рис. П4.13. Вольт-амперные характеристики реактора для режимов: a – ВН (сплошные линии, СН4_8 (пунктирные), СН2_4_8_10 (штрих-пунктирные); b – зависимость тока удвоенной частоты	534

Перечень таблиц в приложении П4

Табл. П4.1. Обозначения векторов МДС катушек и МДС стержней магнитопровода НР с четырьмя катушками в фазе	528
Табл. П4.2. Выражения для мгновенных значений гармоник МДС и магнитной индукции в стержнях магнитопровода НР с четырьмя катушками в фазе	529

Введение

Наряду с силовыми трансформаторами электроэнергетического назначения используются трансформаторы для особых условий работы, которые называются трансформаторами специального назначения. К ним относятся: трансформаторы для преобразования числа фаз переменного тока; трансформаторы для преобразования частоты; трансформаторы для питания дуговых электропечей; трансформаторы с плавным регулированием напряжения; трансформаторы для дуговой электросварки; трансформаторы высокого напряжения для лабораторных установок; насыщающиеся и управляемые реакторы и др. Трансформаторы специального назначения обладают рядом особенностей по сравнению с трансформаторами общепромышленного применения (разд. 18, с. 320, сл.).

Далее будут рассмотрены *трансформаторы для преобразования частоты* (умножители частоты), а также *насыщающиеся и управляемые реакторы*. Функциональное назначение этих устройств различно. Умножители частоты преобразуют частоту, например 50 Гц, в повышенную частоту (100, 150, 200, 250, 300, ... Гц) и предназначены для питания различных электропотребителей напряжением повышенной частоты. Реакторы представляют собой силовые регулируемые индуктивные сопротивления, которые предназначены для использования в ЛЭП, в распределительных электросетях и в системах электроснабжения промышленных предприятий с целью улучшения режимов их работы [1, 2, 3]*. Общим для умножителей частоты [7, 8, 12] и реакторов [9, 10, 11, 13] является глубокое насыщение магнитной системы. В частности, в утроителях частоты и насыщающихся реакторах амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе составляет 2 – 2,2 Тл. Схемотехнические решения этих устройств также имеют много общего. Например, утроитель частоты и насыщающийся реактор могут отличаться соответственно лишь наличием и отсутствием вторичной обмотки повышенной частоты.

Исследованию режимов, характеристик и процессов как умножителей частоты и реакторов, так и других электромагнитных и электромеханических устройств должна предшествовать реализация триады «модель – алго-

* В прил. 4 даны библиографические ссылки на издания, перечисленные в списке литературы на с. 536, 537.

ритм – программа». В результате осуществляется замена исходного устройства его моделью, которая затем анализируется на ПК при помощи вычислительно-логических алгоритмов.

Математическая модель глубже вскрывает внутренние связи устройства, дает его точные количественные характеристики. Вычислительный эксперимент частично или полностью заменяет натурное экспериментирование, позволяя уменьшить сроки и стоимость разработок. Универсальность математических моделей, алгоритмов и программ дает возможность оперативно и без дополнительных затрат переходить от решения одной проблемы к другой.

Триада «модель – алгоритм – программа» предполагает три этапа: постановка задачи, разработка математической модели, составление программы решения задачи на ПК.

Постановка задачи включает конкретизацию схмотехнических и конструктивных особенностей устройства, исходные допущения, формулирование конечной цели и др.

В понятие математической модели входит формирование на основе законов электротехники в соответствии с принятыми допущениями системы уравнений, необходимой и достаточной для достижения поставленной цели, а также аналитическое преобразование этой системы, обеспечивающее оптимальность решения задачи на ПК.

На третьем этапе осуществляется программная реализация математической модели.

Наиболее эффективно решается задача, когда все три этапа осуществляет специалист в данной предметной области, владеющий также математическим аппаратом численных методов анализа и компьютерными технологиями.

Разработаны: обобщенная математическая модель электромагнитных режимов электроэнергетических устройств с произвольной конструкцией магнитопровода и наложенными на нем обмотками, алгоритм программной реализации модели и соответствующие компьютерные программы. Математическая модель – это система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений электрического равновесия и магнитного состояния

устройств, которые записаны на основе теории цепей с нелинейными сосредоточенными параметрами.

На основе анализа математической модели исследовано поведение («физиология») реакторов в электроэнергетических системах в нормальных установившихся режимах работы, в переходных, несимметричных и др. [4, 20].

В связи с бурным развитием средств вычислительной техники и созданием систем автоматизированного проектирования (САПР) для инженеров актуально владение современными численными методами решения краевых задач математической физики. Поэтому электротехникам необходимо своевременное ознакомление с теорией и практикой решения таких задач [23].

Введение САПР в электротехнике сопровождается краткосрочным и долгосрочным эффектами: первый – это рост производительности труда при выполнении научно-исследовательских работ благодаря сокращению сроков разработки новой продукции; второй – отказ от традиционных методов расчета, замена дорогостоящих натуральных испытаний вычислительным экспериментом, получение изделий более высокого качества. *Перечисленные цели в большинстве случаев достигаются применением метода конечных элементов – эффективного средства решения краевых задач математической физики* [5, 25].

Начиная с 1970 года этот метод становится все более популярным среди инженеров различных специальностей. Достоинство метода конечных элементов – это универсальные формы описания различных полевых задач, что помогает взаимопониманию между специалистами, работающими в различных предметных областях. Электромагнетизм, термодинамика и механика – три обширные теоретические дисциплины, на базе которых с помощью САПР моделируются электротехнические устройства.

В настоящее время *работа инженеров изменилась благодаря развитию информатики и численных методов анализа*. Численные методы сделали возможным решение самых сложных задач для самых сложных физических моделей. Широкое распространение получили интерактивные программы графического представления информации, позволяющие более ком-

пактно описывать геометрические и физические свойства объектов по сравнению с классическими методами. Численные методы и интерактивная графическая техника составляют единое целое в компьютерных программах систем автоматизированного проектирования [21, 23, 25].

Внимание! Программы САПР ни в коей мере не могут заменить интуицию и умение обобщать накопленный опыт, которые присущи опытным проектировщикам. Программы САПР лишь материализуют детерминированный алгоритм, которому нужно следовать, чтобы получить решение. Он воспроизводит принятое проектировщиком приемлемое решение.

Разработанные на основе макроскопической теории электромагнитного поля и метода конечных элементов математические модели умножителей частоты и реакторов учитывают совокупность физических явлений, определяющих их функционирование. По результатам расчета поля выполнен анализ и проведена оптимизация «анатомии» (внутреннего строения) устройств [5, 16, 18, 19, 21].

П4.1. Умножители частоты

Электромагнитные, точнее ферромагнитные умножители, представляющие собой своеобразные *трансформаторные устройства с конденсаторами*, находят все более широкое и разнообразное применение. Мощность отдельных умножителей частоты, питаемых от промышленных сетей, достигает до 3000 кВ·А. Лучшие технико-экономические показатели имеют умножители с кратностью умножения от 2 до 9. Такие умножители наиболее распространены. Они надежны, удельный расход активных материалов всего в 1,5 – 5 раз больше, чем для обычных трансформаторов той же мощности и входной частоты, они имеют высокий КПД, достигающий для некоторых умножителей до 95 %, хорошую форму кривой выходного напряжения, жесткую внешнюю характеристику.

А. Применение ферромагнитных умножителей частоты и их достоинства. Краткое сопоставление с умножителями других типов

Ферромагнитные умножители частоты широко применяют в самых различных областях техники. *Не имея подвижных частей, они очень надежны в эксплуатации. Стоимость их не высока, КПД довольно велик.* Важными областями применения ферромагнитных умножителей является

металлургия и электротехнология металлов. Умножители используют для питания разнообразных плавильных индукционных печей, питания устройств, предназначенных для нагрева заготовок из черных и цветных металлов, а также для предварительного нагрева металла перед сваркой или под закалку. Умножители применяют и для питания аппаратов электроэрозионной обработки, для нагрева графита и обработки карбида.

В мощных установках для индукционного нагрева обычно используют утроители и упятерители частоты. Сварочные аппараты питают от удвоителей, утроителей или ушестерителей частоты. Для питания электроэрозионных станков пользуются удвоителями частоты, преобразующими частоту 3 или 10 кГц в частоту 6 или 20 кГц.

Ферромагнитные умножители применяют для питания быстроходных двигателей, в частности двигателей различных электроинструментов. Двигатели чаще всего питают от ферромагнитных удвоителей, утроителей и учетверителей частоты. Трехфазный утроитель частоты (50/150 Гц), разработанный в Институте сильноточной техники (Германия) на выходную мощность 25 кВ·А и предназначенный для питания асинхронных электродвигателей, имеет КПД 86 %. Утроитель частоты, разработанный в этом же Институте на мощность 150 – 400 кВ·А и предназначенный для индукционного нагрева и плавки металлов, имеет КПД 85 – 90 %. Известны и другие применения ферромагнитных умножителей частоты.

Достоинством большинства типов ферромагнитных умножителей частоты является то, что одновременно с увеличением частоты питающей сети в них легко осуществляется и трансформация ее напряжения. Их можно рассчитывать практически на любые значения входного и выходного напряжений, что исключает потребность в согласующих трансформаторах, необходимых при полупроводниковых умножителях, и других их видах. Ценным является и то, что ферромагнитные умножители, предназначенные для питания однофазной нагрузки, например мощной электрической печи, могут равномерно нагрузить первичную трехфазную сеть, так как почти всегда они имеют трехфазный вход.

В ферромагнитных умножителях легко осуществить плавное или ступенчатое регулирование выходного напряжения, что достигается путем из-

менения величины подмагничивания или чисел витков обмоток. Возможность плавного бесконтактного регулирования напряжения облегчает автоматизацию процессов в устройствах, питаемых умножителями частоты.

Ферромагнитные умножители обладают достаточным быстродействием. Продолжительность переходного процесса при внезапных изменениях напряжения питающей сети или сопротивления нагрузки составляет всего лишь один-два периода входного напряжения. Умножители довольно устойчиво работают при обычных колебаниях напряжения питающей сети по амплитуде и частоте.

Достоинством ферромагнитных умножителей частоты является и то, что их изготовление при использовании обычной технологии простое и доступное.

Ниже дано краткое сравнение ферромагнитных умножителей частоты с другими типами умножителей, а именно: электромашинными и полупроводниковыми преобразователями.

Ферромагнитные умножители частоты значительно надежнее, чем электромашинные или все другие умножители. Утроители 50/150 Гц мощностью в 15 – 20 кВ·А на 10 – 20 % дешевле, чем электромашинные. Удельная стоимость ферромагнитного утроителя для индукционного нагрева (2000/6000 Гц) приблизительно в 3 раза меньше, чем электромашинных. Вес активных материалов современных ферромагнитных удвоителей, утроителей и учетверителей частоты обычно меньше, чем электромашинных умножителей частоты. Итак, можно заключить, что ферромагнитные умножители частоты превосходят электромашинные не только потому, что они гораздо надежнее и не требуют специального обслуживания, но также и по той причине, что в ряде случаев они легче и дешевле.

Недостатком ферромагнитных умножителей частоты по сравнению с полупроводниковыми является то, что в них невозможно плавно изменять выходную частоту. Они неприменимы, следовательно, для плавного регулирования скорости электродвигателей.

Но в тех случаях, когда требуется неизменная выходная частота, ферромагнитные умножители обычно превосходят современные полупроводниковые умножители, будучи проще, надежнее и дешевле. Как источник пи-

тания мощных нагрузок, в частности индукционных печей, ферромагнитные умножители превосходят все другие типы умножителей, и в этой области их будут применять еще долгие годы.

Б. Принцип действия и устройство ферромагнитных умножителей частоты

Преобразование частоты в рассматриваемых умножителях происходит благодаря явлениям, возникающим при насыщении их ферромагнитных сердечников. Кривая намагничивания сердечников – зависимость величины магнитной индукции в них от напряженности поля, $B = f(H)$, как известно, нелинейна. Умножение частоты возможно, если величина магнитной индукции достигает значений, лежащих на нелинейном участке кривой намагничивания, который соответствует области насыщения. Практически в номинальном режиме сердечники умножителей всегда сильно насыщены: при электротехнической стали марки 3413 амплитуда индукции достигает значений 2,0 – 2,2 Тл.

На рис. 23.6 (с. 427) приведено построение, показывающее, какую форму имеет кривая магнитного потока в насыщенном сердечнике при синусоидальном изменении реактивной составляющей тока холостого хода (допущение – эффект гистерезиса не учтен – не приводит при трансформаторной стали к существенным погрешностям). Как видно, кривая магнитного потока имеет характерную трапецеидальную форму и ее можно разложить в ряд с нечетными гармониками /формула (23.8) на с. 428/.

На рис. 23.3,а (с. 425) приведено аналогичное построение, но выполненное для того случая, когда магнитный поток изменяется по синусоидальному закону. Кривая реактивной составляющей тока холостого хода имеет при этом характерный пикообразный вид и может быть также разложена в ряд с нечетными гармониками /формула (23.7) на с. 424 и рис. 23.4/.

Умножители частоты в четное число раз нуждаются в поляризации их сердечников постоянным магнитным полем. Эта поляризация осуществляется специальными обмотками подмагничивания постоянным током. Необходимость поляризации сердечников умножителей в четное число раз объясняется тем, что искажение синусоидального входного колебания в двух следующих друг за другом полупериодах должно быть неодинаковым. В противном случае четные гармонические составляющие не появляются.

Умножители частоты в нечетное число раз в специальной поляризации сердечников постоянным магнитным полем не нуждаются.

Вывод! Ферромагнитные насыщенные элементы умножителей частоты служат для возбуждения колебаний повышенной частоты.

Внутреннее индуктивное сопротивление умножителя оказывает отрицательное влияние на его работу, делая внешнюю характеристику умножителя мягкой и ограничивая его предельную выходную мощность. Для уменьшения вредного влияния внутреннего сопротивления умножителя на его выходе устанавливают конденсаторы продольной или поперечной емкостной компенсации. Конденсаторы продольной компенсации включаются последовательно с нагрузкой умножителя, а конденсаторы поперечной компенсации – параллельно нагрузке и выходным зажимам умножителя.

На рис. П4.1 показаны типичные внешние характеристики умножителя при активно-индуктивной нагрузке без емкостной компенсации (кривая 1), с продольной (кривая 2) и с поперечной (кривая 3) емкостной компенсацией. При отсутствии конденсаторов во вторичной цепи выходное напряжение быстро уменьшается с ростом тока нагрузки ввиду падения напряжения на внутреннем индуктивном сопротивлении. В случае продольной компенсации падение напряжения на внутреннем индуктивном сопротивлении в значительной мере компенсируется падением напряжения на конденсаторе, и внешняя характеристика становится жесткой. При включении конденсатора параллельно нагрузке выходное напряжение холостого хода умножителя при неизменных числах витков выходной обмотки значительно возрастает, а ток короткого замыкания не изменяется. *Поперечная компенсация особенно целесообразна в умножителях с выходом низкого напряжения.*

Максимальная выходная мощность, которую может иметь умножитель без учета нагрева, значительно больше при наличии продольной или поперечной компенсации. Ферромагнитные элементы умножителей с емкостной компенсацией получаются значительно легче и компактнее, чем при отсутствии ее.

В некоторых умножителях применяют продольно-поперечную компенсацию, одновременно включая конденсаторы параллельно выходу умножителя и последовательно с его нагрузкой.

Внимание! Конденсаторы для емкостной компенсации – неременная составная часть умножителей.

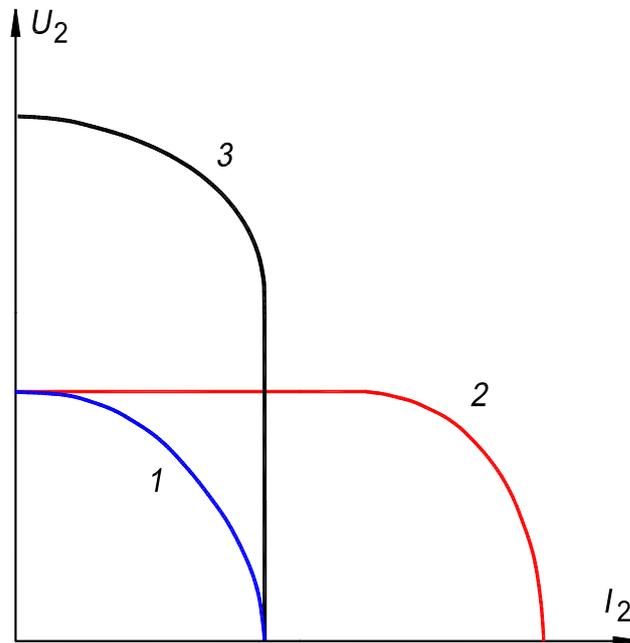


Рис. П4.1. Типичные внешние характеристики ферромагнитных умножителей частоты: 1 – без ёмкостной компенсации на выходе; 2 – при продольной компенсации; 3 – при поперечной компенсации

В большинстве умножителей выделение колебания умноженной частоты основано на том, что в m -фазной системе несинусоидальных напряжений или токов колебания с частотами, кратными m , образуют нулевую последовательность, совпадая по фазе (рис. 23.5, с. 426). При суммировании всех несинусоидальных напряжений или токов m -фазной системы их гармонические составляющие, не кратные m , взаимно уничтожаются, а кратные m арифметически складываются. Суммирование напряжений в ферромагнитных умножителях осуществляется путем последовательного соединения их вторичных обмоток – соединением в открытый многоугольник. Нагрузка присоединяется к свободным зажимам многоугольника.

В. Утроитель частоты с трехфазным входом и с однофазным выходом

Утроение частоты при помощи трансформаторов можно осуществить по схеме, представленной на рис. П4.2. Утроитель состоит из трех насыщенных двухобмоточных однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены звездой, а вторичные – открытым треугольником.

При соединении в звезду первичных обмоток трех однофазных трансформаторов в магнитном потоке каждой фазы (помимо основной гармонической) возникает значительная третья гармоническая $\Phi_3^{(A)}$, $\Phi_3^{(B)}$, $\Phi_3^{(C)}$ (с. 426 – 430). Эта составляющая магнитного потока наводит в обмотках каждой фазы ЭДС тройной частоты. Если поэтому обмотки всех трансформаторов соединить последовательно по схеме открытого треугольника, то на зажимах $a - x$ будет действовать напряжение в основном только частоты $f_2 = 3 \cdot f_1$; первая гармоническая в напряжении u_2 будет отсутствовать, так как в трех катушках вторичной обмотки (в сумме) первая гармоническая равна нулю.

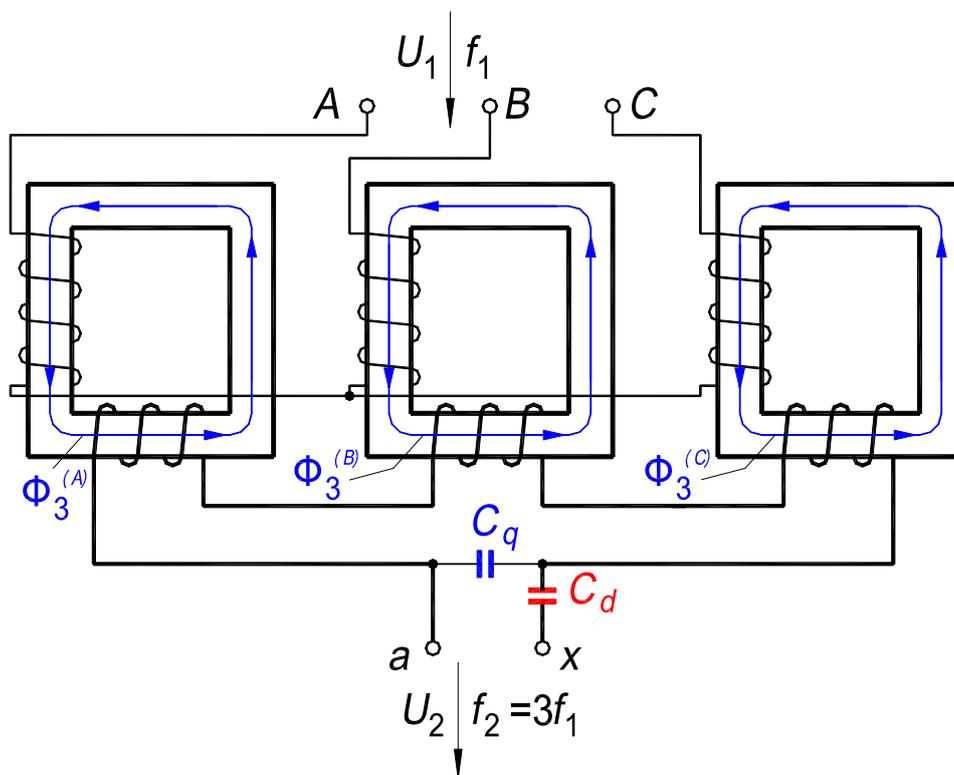


Рис. П4.2. Электромагнитная схема утроителя частоты с однофазным выходом

На выходе утроителя включены конденсаторы продольной и поперечной емкостной компенсации C_d и C_q . На входе утроителей иногда включают косинусные конденсаторы.

Конденсаторы служат одновременно и для компенсации реактивных токов на входе утроителя и для поперечной компенсации на его выходе. Их применение позволяет уменьшить отрицательное влияние индуктивности рассеяния первичных обмоток. Они служат также и для улучшения входного $\cos \varphi_1$.

При переходе утроителя от режима холостого хода к режиму нагрузки в его сердечниках благодаря продольной емкостной компенсации появляется дополнительный магнитный поток утроенной частоты. Результирующий поток утроенной частоты, образованный основным и дополнительным потоком, возрастает по амплитуде.

При наличии продольной емкостной компенсации возрастание амплитуды третьей гармоники потока с включением нагрузки приводит к увеличению напряжения на зажимах вторичных обмоток U_2 . Это добавление компенсирует падение напряжения на конденсаторе C_d , вследствие чего выходное напряжение U_2 утроителя с включением нагрузки изменяется незначительно: его внешняя характеристика делается жесткой. При поперечной компенсации выходное напряжение утроителя существенно зависит от нагрузки (рис. П4.1).

Г. Утроитель частоты с трехфазным входом и с трехфазным выходом

Утроитель частоты можно использовать в качестве источника питания напряжением утроенной частоты нерегулируемых асинхронных электроприводов сельскохозяйственных механизмов.

Разработан трехфазный утроитель частоты, активная часть которого состоит из магнитопровода, трехфазной первичной обмотки основной частоты и трёхфазной вторичной обмотки утроенной частоты (рис. П4.3). Активная часть выполнена в виде трех одинаковых модулей, соединенных между собой. Модуль содержит трехстержневой, бронестержневой сердечник и восемь катушек разных фаз и обмоток. Каждая фаза обмотки основной частоты состоит из пяти последовательно-встречно соединенных катушек, соотношение чисел витков которых $W_M : W_C : W_6 : W_C : W_M = 0,395 : 0,743 : 1 : 743 : 0,395$. Катушки с числами витков W_6 и W_M являются основными, а две катушки с числом витков W_C – фазосдвигающими. Таким образом, совмещенная первичная рабочая обмотка выполняет функции двух обмоток: основной и фазосдвигающей. Принятые соотношение чисел витков катушек фаз, схема соединения катушек и расположение их на стержнях обеспечивают исключение из тока обмотки гармоник с номерами 3, 5, 7, 9, 11, ...

На рис. П4.4*а,б,в* показаны векторы первой гармоники МДС катушек соответственно фаз A , B , и C обмотки в предположении, что ток протекает

только по одной из фаз, а по двум другим не протекает. На рис. П4.4,2 показана трехфазно-расщепленная звезда векторов первой гармоники МДС стержней магнитопровода, созданных первичной обмоткой.

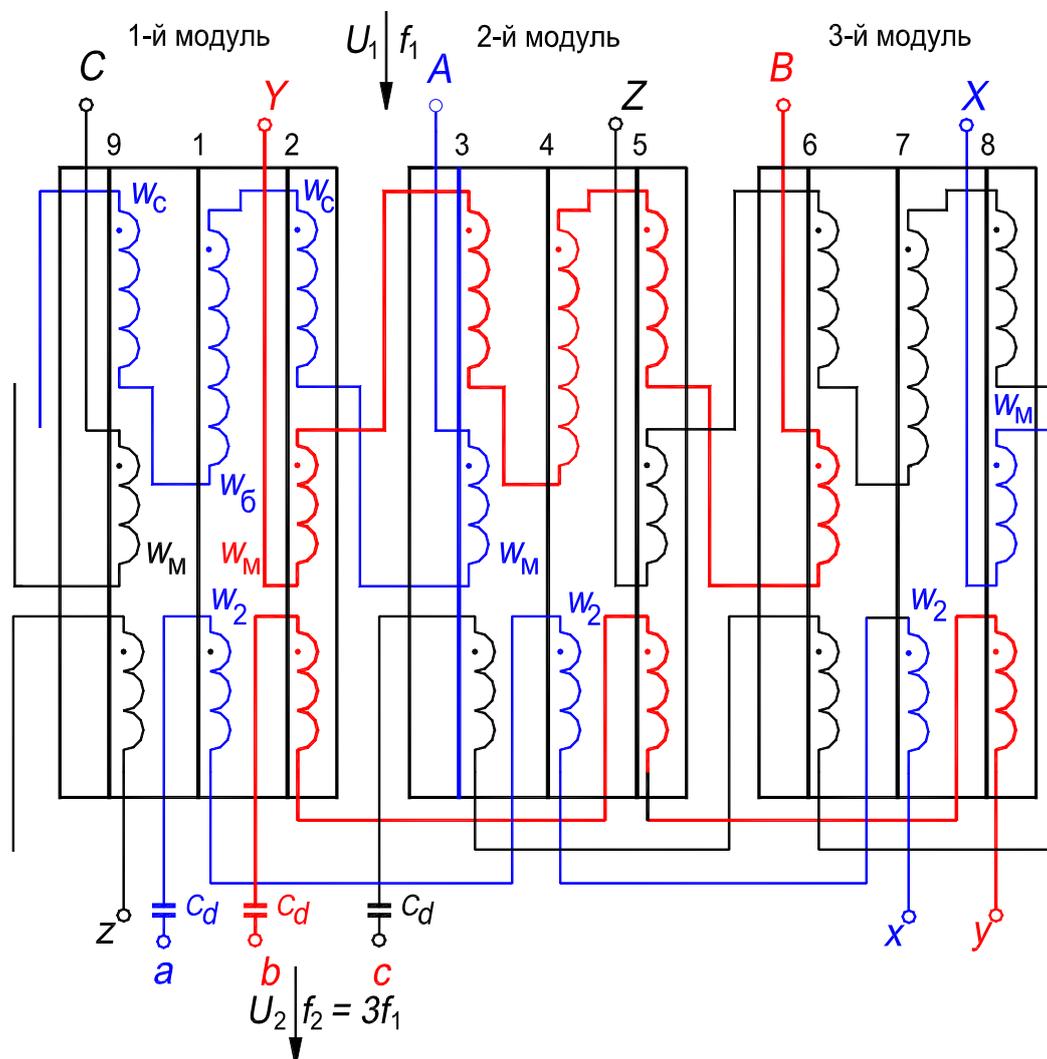


Рис. П4.3. Электромагнитная схема трёхфазного утроителя частоты

Каждая фаза вторичной обмотки утроенной частоты состоит из трёх последовательно-согласно соединенных катушек с одинаковым числом витков W_2 . В фазах вторичной обмотки 1, 5, 7, 11, 13-я гармоники магнитного потока не индуцируют результирующей ЭДС. Третья гармоника потока индуцирует в катушках каждой фазы вторичной обмотки ЭДС утроенной частоты, которые арифметически складываются. На выходе утроителя включаются конденсаторы продольной и поперечной емкостной компенсации. На входе утроителя могут быть включены косинусные конденсаторы [7, 12].

Результаты экспериментальных исследований подтверждают приемлемые технико-экономические показатели разработанного утроителя частоты.

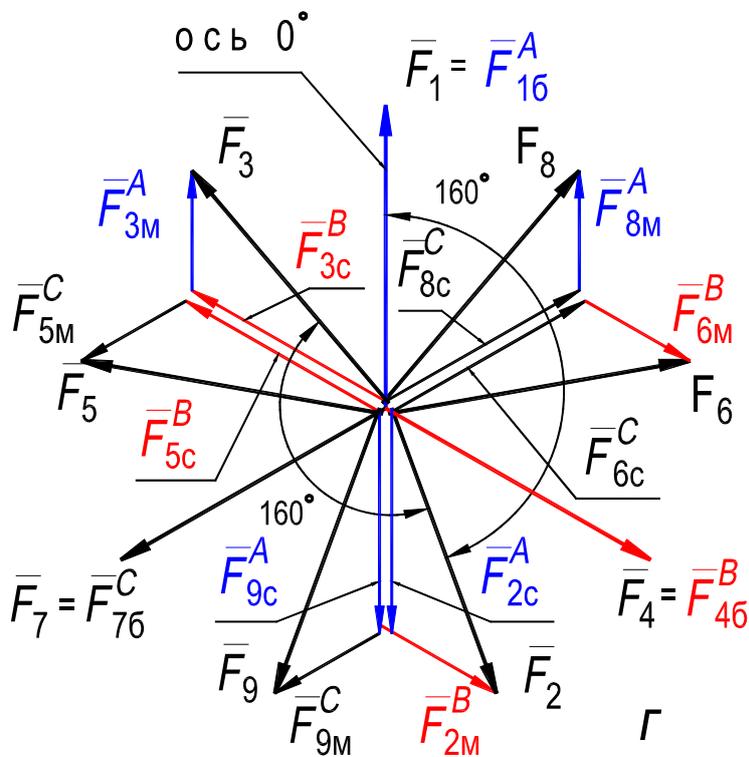
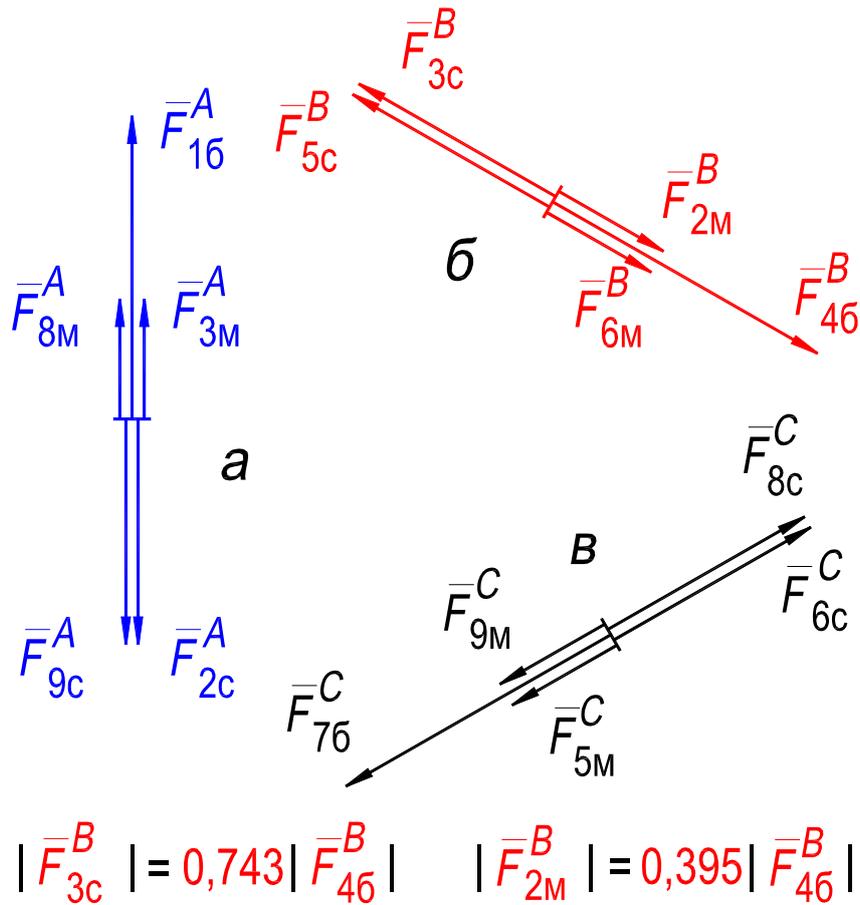


Рис. П4.4. Звезда векторов МДС утроителя частоты:

a – векторы МДС катушек фазы *A-X*; *б* – векторы МДС катушек фазы *B-Y*;
в – векторы МДС катушек фазы *C-Z*; векторы МДС стержней магнитопровода

П4.2. Насыщающиеся и управляемые реакторы

А. Классификация реакторов, основные определения

Насыщающиеся и управляемые реакторы по конструктивным и схемотехническим решениям подобны силовым трансформаторам или неявно-полюсным электрическим машинам переменного тока, но с неподвижным ротором.

Реактор – это статическое силовое нелинейное устройство, работа которого основана на явлении электромагнитной индукции. Являясь средством автоматического регулирования реактивной мощности, реакторы управляют режимами электроэнергетических систем: компенсируют избыточную зарядную мощность ЛЭП и повышают их пропускную способность, ограничивают коммутационные перенапряжения и токи короткого замыкания, уменьшают колебания напряжения, рационально распределяют напряжение и ток и др. Реактивная мощность, потребляемая реактором, плавно регулируется за счет изменения насыщения (магнитного сопротивления) его магнитопровода.

Активная часть реактора содержит одну или несколько обмоток и магнитопровод, выполненный из электротехнической стали. В реакторе могут быть следующие обмотки: 1) *рабочая (сетевая) обмотка* для включения реактора в электрическую цепь, в которой используется индуктивность реактора; 2) *обмотка управления*, предназначенная для создания управляющего магнитного поля. В большинстве случаев это постоянное магнитное поле или поле, имеющее значительную постоянную составляющую; 3) *компенсационная (вспомогательная) обмотка*, необходимая для компенсации части магнитного потока устройства, например для компенсации высшей гармоники в индукции магнитного поля; 4) *фазосдвигающая (вспомогательная) обмотка*, обеспечивающая сдвиг по фазе векторов МДС стержней магнитопровода.

Технико-экономические показатели реакторов должны удовлетворять следующим требованиям: практическая синусоидальность регулируемого тока, отсутствие индуктивных связей между обмотками и достаточное быстрое действие, пониженная материалоемкость, технологичность и др.

Реакторы классифицируются по различным признакам.

1. Классификация по способу регулирования индуктивного сопротивления рабочей обмотки реактора, т. е. по способу регулирования его реактивной мощности:

а) управляемый реактор (УР). Это устройство, у которого индуктивное сопротивление рабочей обмотки регулируется за счет изменения насыщения сердечника посредством изменения постоянной составляющей магнитного потока. Реактор содержит обмотку управления;

б) насыщающийся реактор (НР). Это устройство, магнитопровод которого самонасыщается переменным магнитным полем при номинальном напряжении рабочей обмотки, и предназначено для работы в этом режиме. В реакторе отсутствуют обмотка управления и постоянное магнитное поле подмагничивания;

в) магнитно-вентильный реактор. Это устройство, у которого индуктивное сопротивление рабочей обмотки меняется за счет выпрямления с помощью тиристорov тока, протекающего по части ее витков.

2. Классификация по типу конструкции магнитопровода:

а) реактор трансформаторного типа. Его магнитная система является стержневой и подобна магнитопроводу силового трансформатора. Переменное магнитное поле реактора – пульсирующее, т. е. изменяется по периодическому закону только по временной координате;

б) реактор электромашинного типа. Его магнитная система – кольцевая, т. е. выполняется по типу магнитопровода неявнополюсной электрической машины переменного тока. Разница состоит в том, что внутренний сердечник, называемый по аналогии ротором, неподвижен и вставляется в расточку статора с минимальным технологическим зазором. Переменное магнитное поле реактора – вращающееся, т. е. изменяется по периодическому закону не только по временной координате, но и вдоль пространственной координаты.

3. Классификация по режимам намагничивания, характеризующимся различным проявлением гармоник насыщения переменного магнитного поля [4].

Гармоники насыщения обусловлены нелинейностью кривой намагничивания материала магнитопровода, их амплитуды зависят от степени насыщения электротехнической стали. При отсутствии подмагничивания магнитопровода постоянным полем в переменном магнитном поле проявляются только высшие гармоники насыщения нечетного спектра, а при подмагничивании магнитопровода в магнитном поле возникают еще и высшие гармоники насыщения четного спектра (с. 421 – 425). При соблюдении определенных условий четные гармоники могут отсутствовать и при подмагничивании магнитопровода постоянным полем.

Реакторы работают в следующих режимах намагничивания:

а) режим вынужденного намагничивания (ВН). В этом режиме высшие гармоники насыщения проявляются в индукции переменного магнитного поля, а в напряженности – практически отсутствуют;

б) режим свободного намагничивания по той или иной n -й гармонике насыщения ($СНn$), например по 2-й гармонике ($СН2$). В этом режиме эта гармоника проявляется в напряженности переменного магнитного поля, а в индукции – практически отсутствует;

в) режим симметричного намагничивания по четным гармоникам насыщения магнитного поля. В этом режиме при подмагничивании магнитопровода постоянным полем все четные гармоники насыщения исключены как из индукции, так и из напряженности переменного магнитного поля;

г) режим самоподмагничивания по 2-й гармонике насыщения магнитного поля. В этом режиме мощность 2-й гармоники преобразуется посредством выпрямителя в мощность, используемую для питания одной из обмоток управления.

4. Классификация по виду совмещаемых функций:

а) совмещенный реактор. Это устройство с совмещением функций двух или нескольких отдельных обмоток в одной совмещенной обмотке;

б) совмещенный управляемый реактор-трансформатор (трансреактор). Он выполняет функции отдельных управляемого реактора и силового трансформатора. Это устройство имеет общую магнитную систему и может иметь две совмещенные обмотки;

в) совмещенный реактор-конденсатор (реаконд). Он выполняет функции отдельных реактора и батареи конденсаторов параллельного или последовательного включения;

г) магнитно-вентильный реактор. Совмещенное устройство выполняет функции отдельного управляемого реактора и источника постоянного тока (за счет включения тиристоров в одну из обмоток реактора).

В одном устройстве может быть совмещено большинство из перечисленных функций или часть их.

Возможны и другие классификации реакторов, в частности классификация по взаимной ориентации переменного магнитного поля и постоянного магнитного поля подмагничивания (этот признак положен в основу классификации, принятой в ГОСТ 18624–73. Реакторы электрические. Термины и определения).

Б. Области применения

Насыщающиеся и управляемые реакторы предназначены для использования в воздушных линиях электропередачи традиционного конструктивного исполнения и повышенной натуральной мощности, в распределительных электросетях и в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Б.1. Воздушные линии электропередачи высокого напряжения

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи являются протяженным токопроводом, создающим электрическое и магнитное поля. Условия работы линий с точки зрения физических процессов в их электромагнитном поле, рассмотрены в [1]. Эти процессы определяют требования к устройствам компенсации избыточной реактивной мощности линий.

Мощность электрического поля трехфазной линии длиной l

$$Q_{\text{эл}} = 3 \omega C U_{\text{ф}}^2 l, \quad (\text{П4.1})$$

где $U_{\text{ф}}$ – напряжение фазы линии относительно земли; C – погонная емкость линии, $\omega = 2\pi f$.

Мощность магнитного поля трехфазной линии длиной l

$$Q_{\text{мг}} = 3 \omega L I^2 l, \quad (\text{П4.2})$$

где I – ток, протекающий по фазе линии; L – погонная индуктивность линии.

Мощность электрического поля линии изменяется незначительно из-за ограниченных пределов изменения напряжения. Мощность магнитного поля изменяется в широких пределах в соответствии с изменением тока. Это обстоятельство определяет режимные особенности работы электропередач переменного тока и связанные с ними мероприятия по управлению работой электропередач.

Разность мощностей электрического и магнитного полей определяет реактивную мощность линии

$$Q = Q_{эл} - Q_{мг} = 3\omega l C U_{\phi}^2 \left(1 - LI^2 / CU_{\phi}^2\right), \quad (\text{П4.3})$$

которая равна нулю в частном случае соблюдения равенства $Q_{эл} = Q_{мг}$, что имеет место при

$$1 - LI^2 / CU_{\phi}^2 = 0 \quad \text{или} \\ I = U_{\phi} \sqrt{C/L} = U_{\phi} / Z_{в} = I_{н}, \quad (\text{П4.4})$$

где $Z_{в} = \sqrt{C/L}$ – волновое сопротивление линии; $I_{н}$ – ток, протекающий по линии, называемый при $Q_{эл} = Q_{мг}$ натуральным (естественным) током линии.

Соответствующий режим работы линии называется натуральным, он является сбалансированным по реактивной мощности: линия не генерирует и не потребляет реактивную мощность.

Если ток в линии не совпадает с натуральным, т. е. $I = kI_{н}$, (k – произвольное число), то формула (П4.3) для реактивной мощности линии записывается в виде

$$Q = \left(3\omega l U_{\phi}^2 / v_{в} Z_{в}\right) \cdot \left(1 - Z_{в}^2 k^2 I_{н}^2 / U_{\phi}^2\right) = P_{н} \lambda \left(1 - k^2\right) = P_{н} \lambda \left[1 - (P/P_{н})^2\right], \quad (\text{П4.5})$$

где $v_{в} = 1/\sqrt{L \cdot C}$ – скорость распространения электромагнитной волны, $\lambda = \omega l / v_{в}$ – волновая длина линии; $P_{н} = 3U_{\phi}^2 / Z_{в}$ – натуральная мощность линии; $k = I/I_{н} = P/P_{н}$ – отношение передаваемой по линии мощности P к натуральной мощности линии $P_{н}$.

Если передаваемая по линии мощность P меньше натуральной ($P < P_n$), то, исходя из физических условий работы линии, такой режим ее работы считается естественным. Если же передаваемая по линии мощность P больше натуральной ($P > P_n$), то режим ее работы считается искусственным.

На рис. П4.5, лист 1 представлена зависимость реактивной мощности Q линии, отнесенной к произведению $P_n \lambda$, от отношения P/P_n . Она рассчитана по формуле (П4.5), но с обратным знаком. Из графика следует:

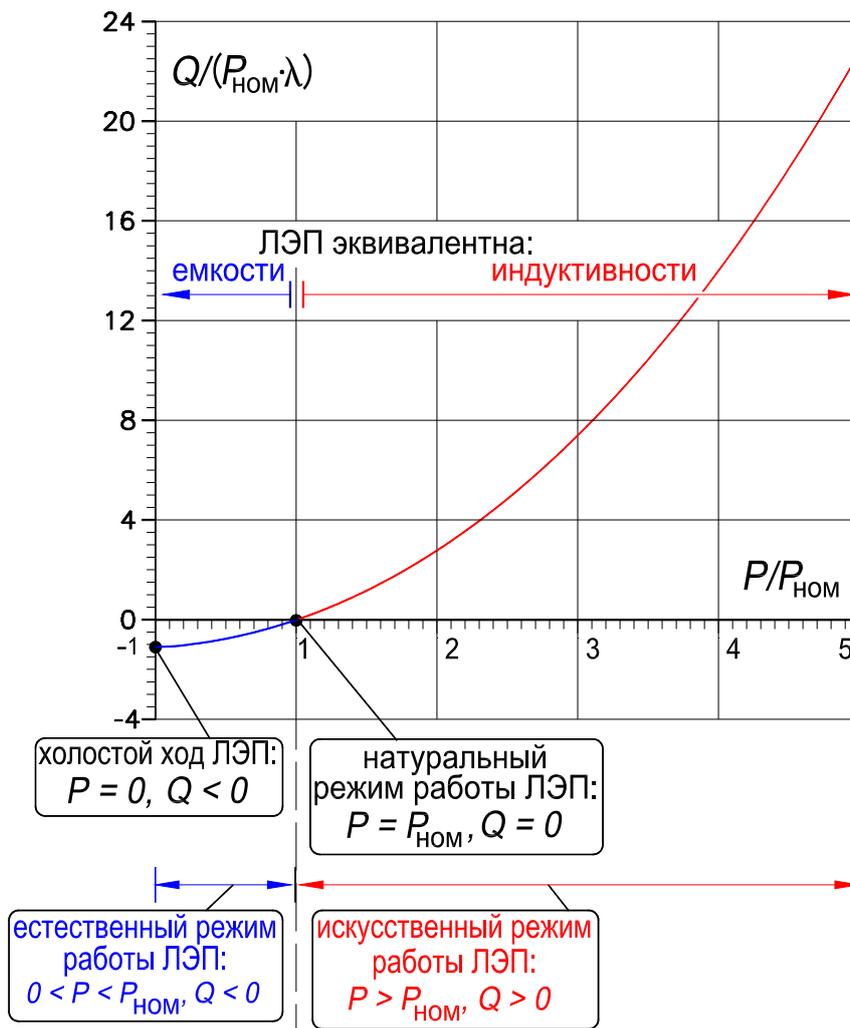


Рис. П4.5, лист 1. Зависимость реактивной мощности Q линии, отнесённой к произведению $P_{ном} \cdot \lambda$, от отношения $P/P_{ном}$

- 1) при $P = 0$ (режим холостого хода) ВЛ электропередачи генерирует реактивную мощность;
- 2) при $0 < P < P_n$ (естественный режим) ВЛ электропередачи также генерирует реактивную мощность, т. е. преобладающей является мощность

электрического поля линии. В этом смысле линия эквивалентна батарее конденсаторов;

3) при $P = P_n$ (натуральный режим) ВЛ не генерирует и не потребляет реактивную мощность, так как мощности ее электрического и магнитного полей равны;

4) при $P > P_n$ (искусственный режим) ВЛ электропередачи потребляет реактивную мощность, т. е. преобладающей является мощность магнитного поля линии. В этом смысле линия эквивалентна индуктивности.

Таким образом, как следует из рис. П4.5, лист 1 и формулы (П4.5) при $0 \leq k < 1$ ($0 \leq P < P_n$) на линии есть избыток реактивной мощности, максимальное значение которой имеет место при холостом ходе линии ($k = 0$, $P = 0$).

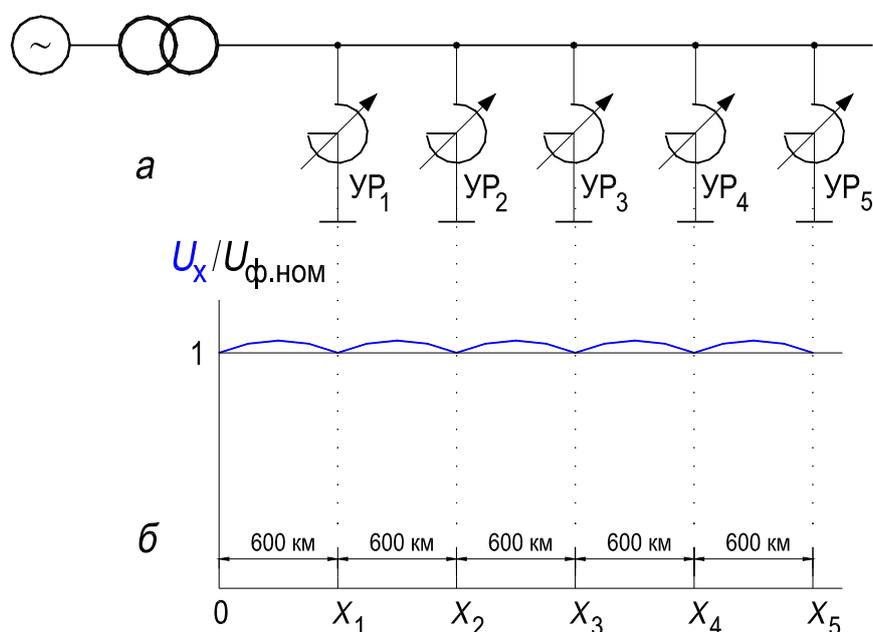


Рис. П4.5, лист 2. Схема электропередачи с промежуточными УР – а; распределение напряжения вдоль длинной линии с одинаковыми реактированными участками длиной 600 км – б

Так как в любой энергосистеме должна быть обеспечена возможность работы линии при загрузке от максимальной расчетной до нулевой (режим холостого хода), то в линии должны быть установлены потребители ее избыточной реактивной мощности при малых нагрузках, в качестве которых используют шунтирующие реакторы. Некоторая часть избыточной реактивной мощности может быть потреблена примыкающими энергосистемами, поскольку, как правило, они дефицитны по реактивной мощности из-за преобладания индуктивного характера нагрузки.

Физические условия работы ВЛ переменного тока определяют необходимость учета двух важных обстоятельств: 1) во всех режимах работы линии необходимо обеспечить баланс реактивной мощности на электропередаче в целом; 2) размещение вдоль линии устройств, компенсирующих ее реактивную мощность, должно обеспечить выполнение нормативных документов на допустимые пределы изменения параметров режима передачи [3, 24].

Очевидно, что целесообразно повышать пропускную способность линии электропередачи, т. е. повышать максимальную мощность, которая может быть передана без ограничения длительности режима передачи. Повышение пропускной способности в линиях традиционного конструктивного исполнения и в линиях повышенной натуральной мощности обеспечивается по-разному.

В существующих воздушных линиях (ВЛ) традиционного конструктивного исполнения повышение пропускной способности линий достигается за счет увеличения передаваемой мощности P сверх натуральной ($P > P_n$). Таким образом, режим работы этих ВЛ соответствует искусственному (рис. П4.5, лист 1). Традиционное конструктивное исполнение существующих высоковольтных ВЛ характеризуется, во-первых, фиксированным расстоянием (30 – 40 см) между расщепленными, по условиям ограничения коронного разряда, проводами фаз и, во-вторых, увеличенными междуфазными расстояниями по сравнению с минимально необходимыми по условию обеспечения надежной работы линий.

Работы, выполненные в Санкт-Петербургском гостехуниверситете и СЗО института «Энергосетьпроект» [1], доказали, что *при отказе от ограничений расстояний между проводами технически возможно и экономически целесообразно создание электропередач произвольно увеличенной натуральной мощности, индуктивное (и волновое) сопротивление которых обратно пропорционально числу проводов в фазе*. Соответственно натуральная мощность таких линий пропорциональна числу составляющих в фазе. При таком изменении принципов конструирования необходимо увеличить число составляющих в фазе сверх минимального (обусловленного ограничением коронного разряда) на линиях с расщепленными проводами, а также необходимо осуществить расщепление проводов на линиях напряжением

35 – 220 кВ, благодаря чему многократно уменьшается их индуктивное сопротивление. Связанное с этим многократное повышение натуральной мощности воздушных линий позволяет существенно расширить области применения электропередач каждого из освоенных классов напряжения по передаваемой мощности, по-новому решить проблему обеспечения баланса реактивной мощности в электроэнергетической системе. На ВЛ повышенной натуральной мощности, в отличие от линий традиционного конструктивного исполнения, увеличение пропускной способности соответственно росту их натуральной мощности P_n осуществляется при $P < P_n$. Таким образом, *режим работы ВЛ повышенной натуральной мощности соответствует естественному* (рис. П4.5, лист 1).

Если происходит отклонение режима работы линии от натурального ($k = I/I_n = P/P_n \neq 1$), баланс реактивной мощности в электроэнергетической системе, т. е. баланс электромагнитного поля линии нарушается. При этом линия не может передавать электроэнергию без дополнительных управляемых источников реактивной мощности (синхронные компенсаторы, статические компенсаторы реактивной мощности), если $k > 1$, либо без управляемых потребителей избыточной реактивной мощности, если $k < 1$. Причем, если устройства, компенсирующие реактивную мощность, располагать по концам линии, то необходимо обеспечить протекание по всей линии потоков реактивной мощности, соизмеримых с передаваемой мощностью и даже превышающей ее. Более целесообразно располагать устройства для поглощения избыточной реактивной мощности непосредственно на линии с расстоянием между местами их установки не более 300...600 км (рис. П4.5, лист 2) [1]. В этом случае *напряжение вдоль линии не будет превышать нормируемого предела*. Поскольку передаваемая по линии мощность может изменяться в широких пределах в соответствии с графиком нагрузки ($0 < P < P_n$), необходимо обеспечить плавное и быстрое регулирование мощности таких устройств. В их качестве используются управляемые и насыщающиеся реакторы. При наличии реакторов на линии отсутствуют ограничения дальности электропередачи переменного тока и пропускной способности, связанные в основном с протеканием огромных потоков реактивной мощности по ВЛ повышенной натуральной мощности при отсутствии реакторов.

На рис. П4.6 показано условное графическое обозначение и ВАХ насыщающегося реактора (а) и управляемого реактора (б).

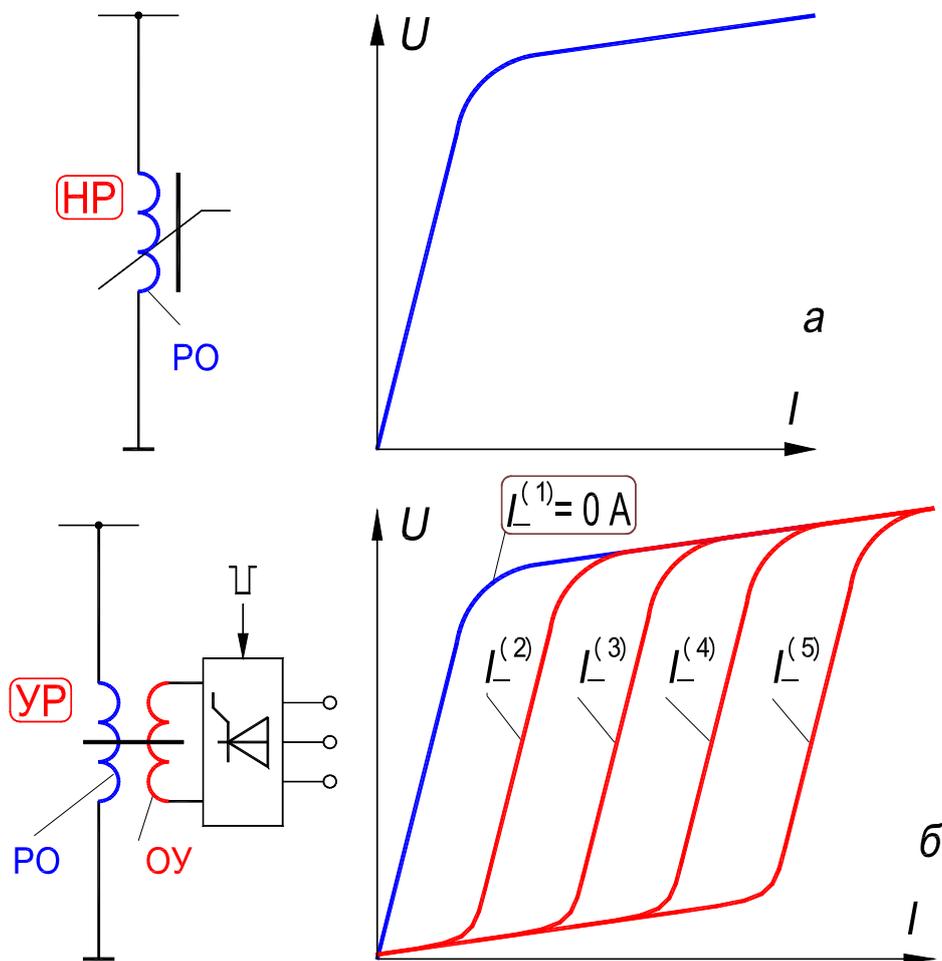


Рис. П4.6. Условные графические обозначения и вольт-амперные характеристики:
 а – насыщающегося реактора (НР); б – управляемого реактора;
 РО – рабочая обмотка, ОУ – обмотка управления

Управляемые и насыщающиеся реакторы – важнейшие устройства высокого напряжения, без которых невозможно обеспечить передачу больших мощностей на далекие расстояния по линиям переменного тока. К тому же они являются самыми экономичными устройствами потребления избыточной реактивной мощности.

Плавное изменение мощности управляемых и насыщающихся реакторов придает электропередаче повышенной натуральной мощности следующие положительные свойства: возможность рационального распределения напряжения и тока в линии, повышение пропускной способности ЛЭП по статической устойчивости, ограничение коммутационных перенапряжений, снижение потерь энергии в линии.

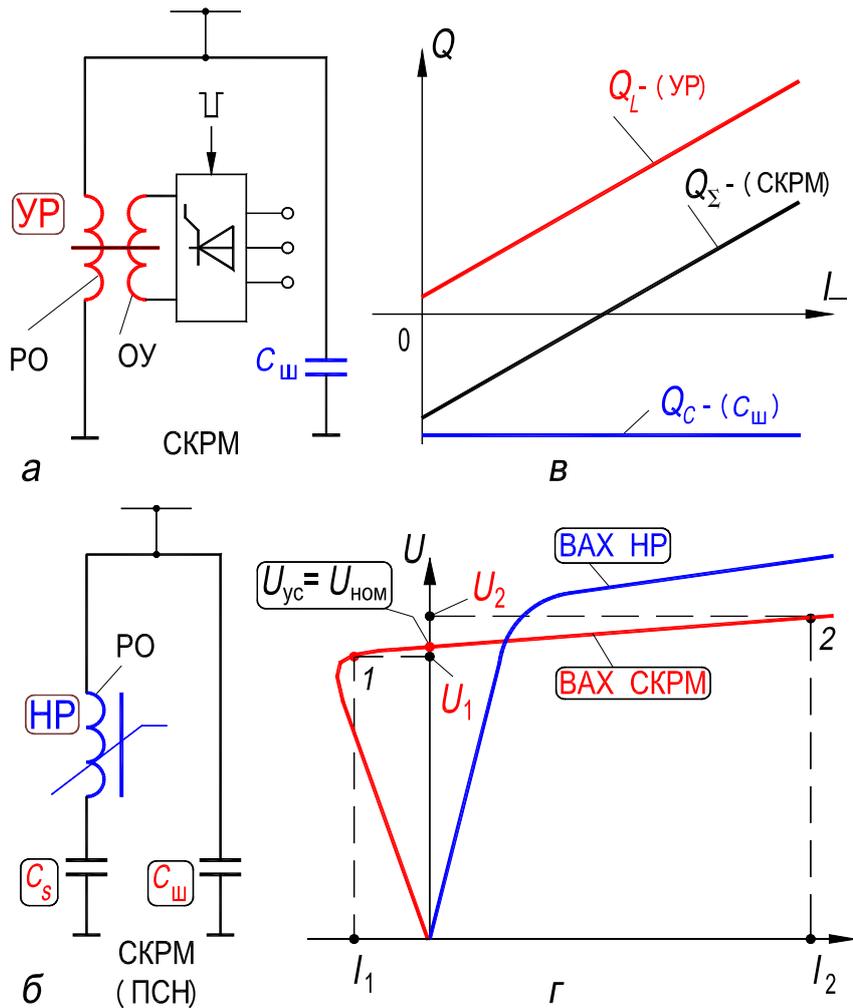


Рис. П4.7. Принципиальные схемы СКРМ: *а* – СКРМ на базе УР; *б* – СКРМ на базе НР; *в* – характеристика $Q = f(I)$ СКРМ на базе УР; *г* – ВАХ СКРМ на базе НР

Важным применением УР и НР является их использование в схеме статического компенсатора реактивной мощности (СКРМ). Он состоит из параллельно включаемых конденсаторной батареи и управляемого (рис. П4.7,*а*) или насыщающегося реактора (рис. П4.7,*б*) в качестве регулирующего элемента. Такие СКРМ используются в линиях традиционного конструктивного исполнения. Компенсатор способен потреблять или генерировать реактивную мощность в зависимости от режима энергосистемы. Мощность потребляется реактором, а генерируется батареей конденсаторов. Если СКРМ реализован на основе УР, то необходимо обеспечить автоматическое управление током подмагничивания [22]. Вольт-амперные характеристики УР и НР показаны на рис. П4.6,*а,б*. Типичная вольт-амперная характеристика самого СКРМ, реализованного на основе НР, показана на рис. П4.7,*г*. В пределах своей рабочей характеристики СКРМ способен регулировать напряжение в точке подключения, он близок по действию

к синхронному компенсатору, но у него нет вращающихся частей и ему не свойственна механическая инерция, а быстродействие значительно выше.

Статические компенсаторы реактивной мощности, выполненные на основе НР, применяются для управления режимами энергосистем с целью решения таких задач, как регулирование напряжения, повышение пропускной способности действующих и вновь построенных электропередач, ограничение перенапряжений и колебаний напряжения и др.

Вольт-амперная характеристика СКРМ, приведенная на рис. П4.7,2, имеет некоторый статизм. Под ним понимается отношение изменения напряжения к изменению тока в регулировочном диапазоне компенсатора (участок ВАХ между точками 1 и 2). Обычно статизм выражается в процентах по отношению к номинальному напряжению:

$$\text{статизм} = 100 \cdot (U_2 - U_1) / U_{\text{ном}} \cdot (I_2 - I_1) = 100 \cdot \Delta U_{1-2} / \Delta I_{1-2}, \%. \quad (\text{П4.6})$$

Значение статизма определяется условиями точности поддержания напряжения и располагаемой мощностью СКРМ. Введение статизма в ВАХ позволяет осуществлять распределение нагрузок между параллельно работающими компенсаторами. Как правило, настроечный диапазон статизма составляет от 0 до 10 % в регулировочном диапазоне СКРМ. Значение статизма компенсатора обычно устанавливается равным 2 – 5 %. Величина статизма регулируется посредством конденсатора C_s (рис. П4.7,б).

Напряжение, при котором СКРМ не потребляет и не выдает реактивную мощность, соответствует напряжению уставки $U_{\text{ус}} = U_{\text{ном}}$ (рис. П4.7,2). Обычно напряжение уставки может регулироваться в диапазоне $\pm 10\%$. Режим работы СКРМ зависит от значения напряжения энергосистемы в точке его подключения, по сравнению с напряжением уставки. Если напряжение системы меньше или равно нижнему пределу U_1 регулировочного диапазона компенсатора, то вся реактивная мощность, генерируемая шунтовыми конденсаторами $C_{\text{ш}}$, поступает в сеть. При этом мощность, потребляемая реакторами, равна нулю. С увеличением напряжения часть мощности, генерируемой конденсаторами, потребляется реактором. Когда напряжение сети равно напряжению уставки $U_{\text{ус}}$ компенсатора, то мощность, генерируемая конденсаторами, равна мощности, потребляемой реактором. При увеличе-

нии напряжения выше номинального реактор продолжает поглощать реактивную мощность, пока не будет достигнута номинальная его нагрузка, которая определяет верхний предел мощности компенсатора. Потребление реактивной мощности за верхним пределом зависит от перегрузочной способности компенсатора. Насыщающийся реактор обладает перегрузочной способностью до 3 – 4 о. е. и более, что позволяет использовать его для ограничения коммутационных перенапряжений.

Для реализации описанных выше функций в воздушных линиях электропередачи высокого напряжения используются реакторы трансформаторного типа со стержневым магнитопроводом.

Б.2. Распределительные электросети

Под распределительной электрической сетью понимается сеть, к которой непосредственно присоединяются электроприемники. Как правило, распределительная сеть имеет две ступени напряжения в диапазоне номинальных напряжений 6 – 10 кВ и выше для высокой и 220 – 660 В для низкой стороны.

Режим работы электроприемников сопровождается потреблением активной и реактивной мощности. Активная мощность передается к электроприемникам от синхронных генераторов электростанций, являющихся единственными ее источниками. В качестве источников реактивной мощности, кроме синхронных генераторов, используются синхронные компенсаторы и двигатели, батареи конденсаторов поперечного включения и тиристорные устройства. Источником реактивной мощности является также емкость воздушных и кабельных линий.

Для любого режима работы электрической системы всегда имеет место баланс реактивной мощности, т. е. суммарная генерируемая реактивная мощность всегда равна суммарной потребляемой мощности. Условие баланса соблюдается для каждого узла электрической сети и для всей электрической системы.

Генерируемая синхронными генераторами и компенсаторами реактивная мощность передается в промышленные, городские и сельские распределительные сети. По техническим и экономическим причинам такая передача реактивной мощности в распределительные сети нецелесообразна.

Хотя потери электроэнергии в крупных синхронных генераторах и компенсаторах на генерацию реактивной мощности невелики, потери на передачу мощности по сети могут быть значительны. Поэтому более экономичным оказывается компенсация реактивной мощности на месте ее потребления. Для этих целей используются синхронные двигатели, батареи конденсаторов и тиристорные устройства.

Синхронные двигатели выпускают отечественные заводы с номинальным *опережающим* коэффициентом мощности, равным 0,9. Техническая возможность использования двигателя в качестве источника реактивной мощности ограничивается наибольшей величиной реактивной мощности, которую он может генерировать без нарушения условий допустимого нагрева обмоток и магнитопровода. Для эффективного выполнения указанной функции двигатель должен быть снабжен системой автоматического регулирования возбуждения.

В качестве нерегулируемых источников реактивной мощности используются батареи конденсаторов. Относительно небольшие эксплуатационные расходы, простая технология производства привели к увеличению их количества в электрических сетях, что при неполной нагрузке вызывает необходимость компенсации избыточной реактивной мощности, генерируемой батареями конденсаторов. Наиболее просто и экономично эта проблема может быть решена с помощью управляемых реакторов.

Суммарная мощность установки, состоящей из параллельно включенной емкости и регулируемого индуктивного сопротивления (рис. П4.7,а,в), при пренебрежении активными потерями, определяется разностью мощностей отдельных составляющих:

$$Q_{\Sigma} = \pm(Q_L - Q_C). \quad (\text{П4.7})$$

Учитывая, что в электрических системах напряжение сети изменяется на относительно небольшую величину 10 – 15 %, можно считать мощность батареи конденсаторов Q_C приблизительно неизменной. Мощность Q_L , потребляемая УР, будет меняться в зависимости от величины его индуктивности, т. е.

$$Q_C = U^2/X_C \approx \text{const}; \quad Q_L = U^2/X_L = \text{var}. \quad (\text{П4.8})$$

Диапазон изменения мощности устройства, содержащего параллельно включенные индуктивность и емкость, определяется соотношением мощностей батареи конденсаторов и УР. Если предположить, что мощность, потребляемая реактором, может изменяться от нуля до номинальной, то при равенстве установленных мощностей батареи конденсаторов и УР, суммарная мощность СКРМ будет изменяться так:

$$0 \leq Q_{\Sigma} \leq Q_L. \quad (\text{П4.9})$$

При этом СКРМ генерирует реактивную мощность в сеть. В случае, если номинальная мощность УР будет больше мощности батареи конденсаторов, СКРМ может работать как в режиме генерации, так и в режиме потребления реактивной мощности. При этом переход из одного режима в другой осуществляется плавно (рис. П4.7,в).

Другая положительная особенность СКРМ (рис. П4.7,а): напряжение на реакторе и на батарее конденсаторов равно напряжению сети и не зависит от режима работы СКРМ и от способа регулирования мощности УР. Благодаря этому оказывается возможным включать реактор и батарею конденсаторов непосредственно в сеть без промежуточного трансформатора.

Если передача реактивной мощности осуществляется от электростанции к месту ее потребления, то в сети появляются дополнительные потери напряжения и электроэнергии. Эти потери уменьшаются, если СКРМ располагать в электрической близости от места потребления реактивной мощности. Так как при компенсации реактивной мощности потери напряжения в сети уменьшаются, то при определенных условиях СКРМ используется не только для обеспечения баланса реактивной мощности, но и в качестве средства регулирования напряжения в сети в месте его установки [22]. Экономический эффект компенсации реактивной мощности заключается в снижении потерь электроэнергии в сети и уменьшении стоимости ее сооружения за счет повышения пропускной способности.

Большая часть электрических сетей напряжением 6 – 10 кВ и выше эксплуатируется с компенсацией емкостных токов, возникающих при однофазном замыкании на землю. Компенсация осуществляется с помощью *дугогасящего* (управляемого) реактора, включаемого между нейтралью транс-

форматора и земель. Дугогасящий реактор предотвращает развитие электрической дуги в месте однофазного замыкания, если его индуктивное сопротивление равно емкостному сопротивлению сети на землю.

В качестве дугогасящего реактора может быть использован *магнитно-вентильный УР*. Этот реактор имеет практически линейную вольт-амперную характеристику в заданном ограниченном диапазоне изменений тока. Требование практической линейности диктуется необходимостью устранить высшие гармоники в токе реактора, поскольку компенсация имеет место только для основной частоты, а токи иных частот протекают через дугу в месте замыкания.

При соединении фазы с землей возникает переходный процесс, сопровождающийся насыщением магнитопровода реактора вследствие появления однонаправленной медленно затухающей составляющей магнитного потока. Индуктивное сопротивление реактора при этом уменьшается и приближается к требуемому значению емкостного сопротивления сети на землю. Дугогасящие управляемые реакторы снабжаются автоматическими регуляторами тока подмагничивания, которые обеспечивают и поддерживают равенство индуктивного сопротивления реактора и емкостного сопротивления сети на землю.

В распределительных электросетях возможно использование и реакторов электромашинного типа, и реакторов трансформаторного типа, так как и те и другие могут быть выполнены на номинальное напряжение этих электросетей и включены без промежуточного трансформатора.

Б.3. Системы электроснабжения промышленных предприятий

Особенностью металлургических и многих машиностроительных предприятий является резкопеременная нагрузка, которая обуславливает колебания напряжения, уровень которых превышает ограничения ГОСТ 32144-2013 [3]. На металлургических предприятиях такой нагрузкой являются прокатные станы с вентильными электроприводами, электродуговые сталеплавильные печи, на машиностроительных – мощные сварочные агрегаты. Государственный стандарт ограничивает допустимые пределы колебания напряжения 1,5 % от номинального напряжения, однако на указанных предприятиях эти колебания могут достичь 4 – 12 % и более. При этом другие показатели качества

электроэнергии – отклонение напряжения, несинусоидальность тока и несимметрия напряжения также не соответствуют требованиям стандарта [3].

Колебания напряжения отрицательно воздействуют на работу многих потребителей электроэнергии, а именно: ПК, систем автоматики и телемеханики, автоматизированных систем управления, логической аппаратуры и др. Они также влияют отрицательно на производительность труда и зрение работников.

Колебания напряжения уменьшаются в 8 – 10 раз с помощью *статических компенсаторов реактивной мощности*, состоящих из *насыщающегося реактора (НР)* и *батареи конденсаторов*, включенной параллельно. Статический компенсатор реактивной мощности с насыщающимся реактором (рис. П4.7,б) называется параметрическим компенсатором, так как потребляемая или генерируемая им реактивная мощность является функцией приложенного к СКРМ напряжения сети. В СКРМ с НР отсутствует какая-либо внешняя система управления, являющаяся существенно инерционным звеном при решении задачи уменьшения колебания напряжения. Параметрический СКРМ имеет рабочую область на результирующей вольт-амперной характеристике за «коленом» кривой, где зависимость реактивного тока от напряжения сети в первом приближении может быть принята линейной (рис. П4.7,2, участок на ВАХ СКРМ, заключенный между точками 1 и 2). При снижении напряжения сети почти пропорционально снижаются ток и реактивная мощность, потребляемая НР; поскольку реактивная мощность батареи конденсаторов изменяется относительно незначительно, то резко увеличивается генерация в сеть реактивной мощности шунтовой батареей конденсаторов. В случае повышения напряжения аналогичным образом увеличивается потребляемая реактором реактивная мощность. *За счет указанного быстрого параметрического изменения реактивной мощности СКРМ по величине и по знаку и осуществляется уменьшение колебаний напряжения.*

Для ограничения колебаний напряжения используются НР как трансформаторного типа, со стержневым магнитопроводом, так и электромашинного типа, с кольцевым магнитопроводом. Параметрические СКРМ, используемые для уменьшения колебаний напряжения, имеют ряд преимуществ

перед синхронными компенсаторами, а именно: более высокое быстродействие, меньшие удельные активные потери, простота обслуживания и др.

В. Основы теории и устройства реакторов трансформаторного типа

В [4] по результатам программной реализации математической модели, разработанной на основе теории электрических и магнитных нелинейных цепей, анализируются электромагнитные режимы работы («физиология») реакторов. В [5] по результатам программной реализации математической модели, разработанной на основе теории поля Дж. К. Максвелла и метода конечных элементов, исследуется и оптимизируется устройство («анатомия») реакторов.

В.1. Явление генерации гармоник насыщения

Магнитопровод реакторов является генератором высших гармоник насыщения. Одно из условий использования реакторов в энергосистеме – практическое устранение высших гармоник из переменного тока, протекающего в трехфазной рабочей обмотке. Природа этих гармоник такая же, как и нечетных гармоник в силовых трехфазных трансформаторах, выпускаемых серийно (см. описание Работы № 4, с. 421 – 437). В рассмотренных ферромагнитных умножителях частоты гармоники насыщения являются полезными (с. 495 – 504).

Высшие гармоники неблагоприятно влияют на процессы генерации, передачи и использования электроэнергии, на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи; появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; возрастает аварийность в кабельных сетях; ухудшается качество работы систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

В силовом трансформаторостроении принимаются меры для подавления гармонических составляющих кратных трем. Они сводятся, главным образом, к соединению фаз одной из обмоток в треугольник и к изготовлению магнитопровода трехстержневым, магнитосвязанным. Остальные высшие нечетные гармоники практически не устраняются. Применительно к серий-

ным трансформаторам это в какой-то степени оправдано, так как они работают на «колене» кривой намагничивания, т. е. не в зоне глубокого насыщения, как реакторы.

Повышение удельных электромагнитных нагрузок в силовых трансформаторах обуславливает увеличение насыщения их магнитопроводов и, следовательно, рост процентного содержания гармоник в токе холостого хода. Мероприятия, реализуемые для уменьшения содержания высших гармоник в токе реакторов трансформаторного типа, могут использоваться и для улучшения формы кривой тока в силовых серийных трансформаторах.

В реакторах трансформаторного типа основной магнитный поток замыкается по магнитопроводу и не встречает на своем пути явно выраженных немагнитных зазоров. Последнее обуславливает существенную нелинейность характеристик управляемого реактора с пульсирующим магнитным полем. Гармонический состав пульсирующего поля определяется следующим образом: если напряжение, приложенное к рабочей обмотке, синусоидально, а сопротивлением ее можно пренебречь, то магнитная индукция в сердечнике также будет изменяться во времени синусоидально:

$$b_1 = B_{1m} \sin \omega_1 t,$$

где ω_1 – угловая частота напряжения, питающего рабочую обмотку.

При подмагничивании магнитопровода постоянным полем с индукцией B_0 результирующая индукция определяется так:

$$b = B_0 + B_{1m} \sin \omega_1 t.$$

В силу существенной нелинейности кривой намагничивания напряженность магнитного поля будет содержать бесконечный спектр гармоник, который можно выразить аналитически, если аппроксимировать кривую намагничивания в виде гиперболического синуса (формула Оллендорфа):

$$h = \alpha \cdot \text{Sh } \beta \cdot b,$$

где h и b – напряженность и индукция магнитного поля; α , А/м и β , 1/Тл – коэффициенты аппроксимации, зависящие от сорта стали и других факторов.

В качестве расчетной далее принята средняя кривая намагничивания предельного гистерезисного цикла. При пренебрежении потерями в стали

аппроксимация кривой гиперболическим синусом дает возможность получить простые выражения, удобные для качественного анализа магнитного поля.

Результирующая напряженность h , при подстановке в формулу Оллендорфа выражения для b , записанного с учетом подмагничивания, после некоторых преобразований, представляется в виде

$$\begin{aligned} h &= \alpha \cdot \text{Sh}\beta(B_0 + b_1) = \alpha \cdot \text{Sh}\beta(B_0 + B_{1m} \sin\omega_1 t) = \\ &= \alpha \cdot \text{Sh}\beta B_0 \left[J_0(j\beta B_{1m}) + 2 \sum_{k=1}^{k=\infty} J_{2k}(j\beta B_{1m}) \cos 2k \omega_1 t \right] + \\ &+ \alpha \cdot \text{Ch}\beta B_0 \left[-2j \sum_{k=0}^{k=\infty} J_{2k+1}(j\beta B_{1m}) \sin(2k+1)\omega_1 t \right], \end{aligned} \quad (\text{П4.10})$$

где $J_0(j\beta B_{1m})$, $J_{2k}(j\beta B_{1m})$, $J_{2k+1}(j\beta B_{1m})$ – функции Бесселя соответственно нулевого, $2k$ и $(2k+1)$ -го порядков от чисто мнимого аргумента.

Как следует из (П4.10), напряженность магнитного поля содержит постоянную составляющую, спектр высших нечетных гармоник и спектр четных гармоник насыщения. Их амплитуды обусловлены взаимным действием постоянного и пульсирующего магнитных полей. Если $B_0 = 0$, то напряженность магнитного поля содержит только спектр нечетных гармоник насыщения.

Таким образом, в подмагниченном реакторе с пульсирующим полем, магнитная напряженность содержит спектр высших четных и нечетных временных n -х гармоник, изменяющихся с угловыми частотами:

$$\omega_n = (2k + 1)\omega_1; \quad (\text{П4.11})$$

$$\omega'_n = 2k\omega_1. \quad (\text{П4.12})$$

Периодическое изменение магнитного поля *только по временной координате* t – характерная особенность реактора трансформаторного типа, существенно влияющая на его свойства. Необходимым условием появления высших гармоник напряженности, определяемых рядами (П4.11) и (П4.12), является нелинейность кривой намагничивания, а процентное содержание гармоник зависит от вида кривой намагничивания и степени насыщения магнитопровода.

В реакторах трансформаторного типа электроэнергетического назначения практическая синусоидальность рабочего тока достигается следующими мерами: применение специальных схем обмоток, расщепление стержней магнитопровода, использование компенсационных и фазосдвигающих вспомогательных обмоток и др.

Достоинство реакторов этого типа состоит в том, что они могут быть изготовлены на стандартные трансформаторные напряжения и подключены к ЛЭП без промежуточного трансформатора, а технология изготовления их, при реализации модульного принципа, подобна таковой у серийных силовых трансформаторов и, следовательно, производство таких реакторов осуществимо на трансформаторных заводах без больших дополнительных затрат.

В.2. Насыщающийся реактор

Реактор предназначен для работы в схеме параметрического стабилизатора напряжения (ПСН) с целью ограничения колебаний напряжения, которые обусловлены нагрузкой (разд. П.4.2, Б3, с. 520, сл.). Он также может быть использован для компенсации избыточной реактивной мощности энергосистемы в схеме статического компенсатора реактивной мощности (СКРМ) (разд. П.4.2, Б1, с. 508, сл.). Схемы ПСН и СКРМ практически одинаковы, разные названия их отражают различные целевые функции использования устройства.

Параметрический стабилизатор напряжения состоит из трех основных элементов: регулирующее устройство – его функции выполняет трехфазный насыщающийся реактор (НР); две нерегулируемые батареи конденсаторов – шунтовая $C_{ш}$ и серийная C_s . На рис. П4.7, б, г показаны, соответственно, принципиальная схема параметрического стабилизатора напряжения и его вольт-амперная характеристика. Устройство должно выдавать или поглощать реактивную мощность в точке его подключения так, чтобы обеспечить практическое постоянство напряжения. Эта мощность является функцией напряжения, приложенного к зажимам НР, и зависит от наклона /статизма, формула (П4.6), с. 516/ к оси абсцисс рабочего участка 1–2 вольт-амперной характеристики ПСН. Статизм характеристики является отношением изменения напряжения к изменению тока в регулировочном диапазоне ПСН (участок 1–2 ВАХ) и поэтому может рассматриваться как динамическое ре-

активное сопротивление X_d . Для уменьшения значения динамического индуктивного сопротивления в области насыщения последовательно с НР включается серийная батарея конденсаторов C_s , в связи с чем и обеспечивается требуемый статизм, который влияет на функции регулирования.

Параметрическая зависимость $\Delta I_{1-2} = f(\Delta U_{1-2})$, отсутствие параллельных ветвей в обмотке обуславливают практически безынерционный принцип действия реактора, что и делает особенно эффективным его использование для стабилизации напряжения в сети с резкопеременной нагрузкой.

Разработан трехфазный НР, его активная часть состоит из магнитопровода и совмещенной трехфазной рабочей обмотки (рис. П4.8). Активная часть выполнена в виде трех одинаковых модулей, соединенных электрически [10, 13].

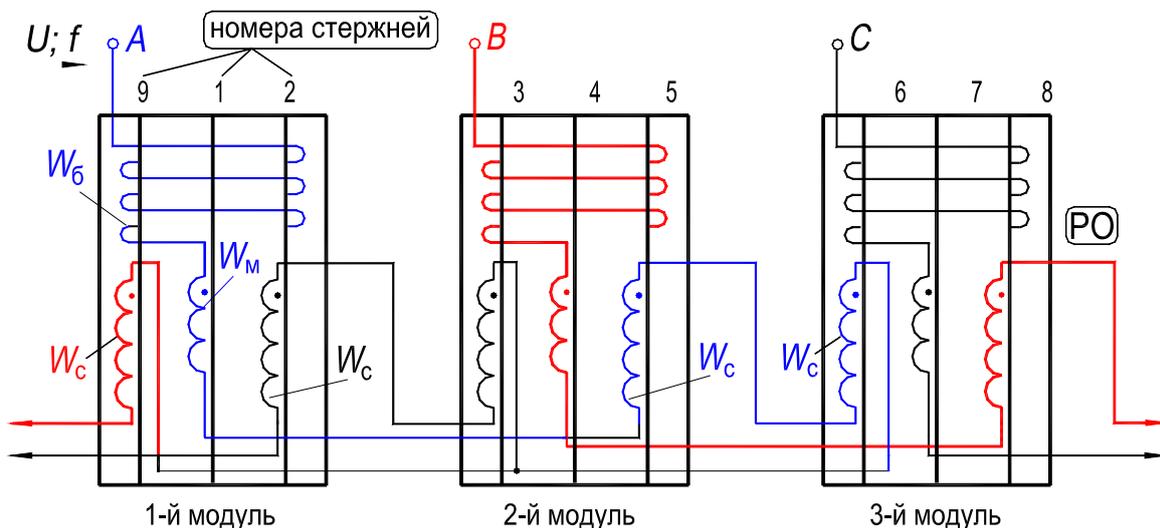


Рис. П4.8. Электромагнитная схема трёхфазного НР с четырьмя катушками в фазе

Модуль содержит трёхстержневой, бронестержневой сердечник и четыре катушки разных фаз обмотки. Каждая фаза состоит из четырех последовательно соединенных катушек, соотношение чисел их витков составляет $W_B : W_M : W_C : W_C = 1 : 0,347 : 0,532 : 0,532$. Катушки с числами витков W_B и W_M являются основными, а две катушки с числом витков W_C – фазосдвигающими. Таким образом, совмещенная рабочая обмотка выполняет функции двух обмоток: основной и фазосдвигающей. Принятые соотношения чисел витков катушек, схема соединения катушек и расположение их на стержнях обеспечивают исключение из тока обмотки гармоник с номерами 3, 5, 7, 9, 11, 13, Нечетные гармоники, оставшиеся нескомпенсированными, имеют номера 17, 19; 35, 37;

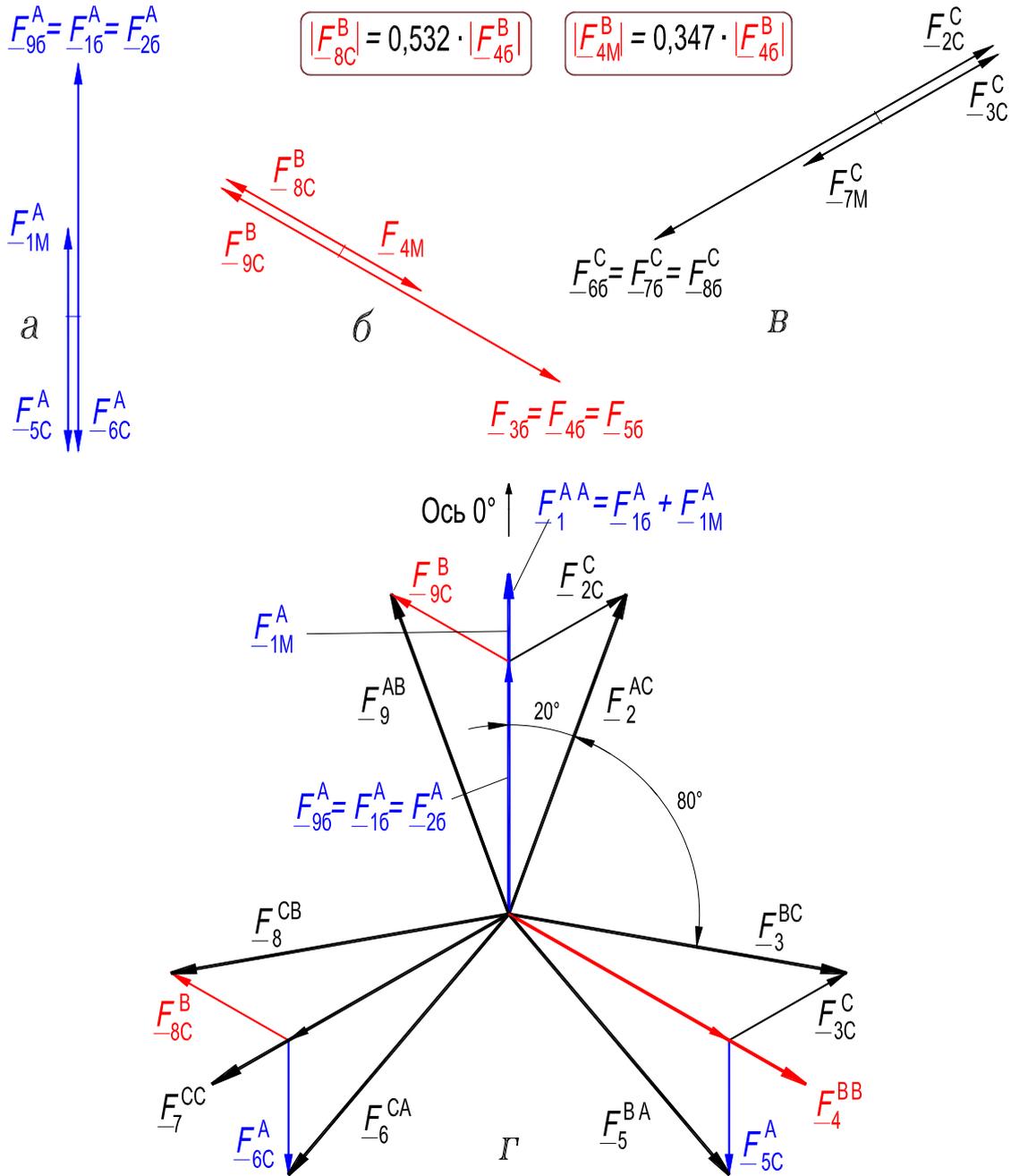


Рис. П4.9. Векторы МДС катушек фаз: *A-X* (*a*), *B-Y* (*б*), *C-Z* (*в*); звезда векторов МДС стержней магнитопровода НР (*г*)

Гармонический состав тока обмотки проанализируем на основе звезды векторов 1-й гармоники МДС стержней магнитопровода и векторных диаграмм ЭДС, обусловленных 1-й и высшими гармониками магнитного потока в фазах обмотки. На рис. П4.9,*а,б,в* показаны векторы 1-й гармоники МДС катушек соответственно фаз *A*, *B*, и *C* обмотки в предположении, что ток протекает только по одной из фаз, а по двум другим не протекает. В табл. П4.1 приведены принятые обозначения векторов МДС катушек и МДС стержней магнитопровода.

Таблица П4.1. Обозначения векторов МДС катушек и МДС стержней магнитопровода НР с четырьмя катушками в фазе

Номер на рис. П4.8		Обозначение на рис. П4.9 векторов МДС			
мо- ду- лей	стержней, расположение стержней	катушек фаз			стержней магнито- провода
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
1	9, левый	\underline{F}_{96}^A	\underline{F}_{9c}^B		\underline{F}_9^{AB}
	1, средний	\underline{F}_{16}^A и $\underline{F}_{1м}^A$			\underline{F}_1^{AA}
	2, правый	\underline{F}_{26}^A		\underline{F}_{2c}^C	\underline{F}_2^{AC}
2	3, левый		\underline{F}_{36}^B	\underline{F}_{3c}^C	\underline{F}_3^{BC}
	4, средний		\underline{F}_{46}^B и $\underline{F}_{4м}^B$		\underline{F}_4^{BB}
	5, правый	\underline{F}_{5c}^A	\underline{F}_{56}^B		\underline{F}_5^{BA}
3	6, левый	\underline{F}_{6c}^A		\underline{F}_{66}^C	\underline{F}_6^{CA}
	7, средний			\underline{F}_{76}^C и $\underline{F}_{7м}^C$	\underline{F}_7^{CC}
	8, правый		\underline{F}_{8c}^B	\underline{F}_{86}^C	\underline{F}_8^{CB}

В обозначениях векторов МДС катушек (например \underline{F}_{26}^A) верхний индекс соответствует фазе (*A*), которой принадлежит катушка; первый нижний индекс «2» указывает номер стержня на котором расположена катушка; второй нижний индекс «б» указывает, что катушка имеет большее (или среднее – индекс «с», или меньшее – индекс «м») число витков, чем другие катушки фазы (*A*). Векторы МДС катушек, имеющие одинаковый первый нижний индекс в своем обозначении, созданы катушками, расположенными на одном и том же стержне. Средний стержень каждого модуля (рис. П4.8) охватывают две катушки W_6 и W_m , соединенные согласно-последовательно и принадлежащие в каждом модуле одной и той же фазе, поэтому результирующая МДС стержня равна арифметической сумме МДС этих катушек. На левом и правом стержнях каждого модуля также расположено по две катушки, W_6 и W_c , но так как они принадлежат разным фазам, то результирующая МДС любого из этих стержней равна геометрической сумме МДС катушек.

Таким образом, звезда векторов результирующих МДС стержней получается трехфазно-расщепленной (рис. П4.9,з), причем, фазосдвигающими являются катушки с числом витков W_c . В обозначении векторов результирующих МДС (например \underline{F}_1^{AA} или \underline{F}_2^{AC}) нижний индекс соответствует номеру

стержня, а верхний индекс указывает фазу (или фазы), катушки которой(ых) участвуют в создании этой МДС. Векторы 1-х гармоник результирующих МДС, например, среднего и правого стержня каждого модуля сдвинуты на 20° . По высшей гармонике магнитной индукции порядка ν этот сдвиг составляет $20\nu^\circ$. На основании изложенного в клетках табл. П4.2 приведены выражения для мгновенных значений 1-й гармоники МДС и 1, 3, 5, 7, 9-й гармоник магнитной индукции в 9-ти стержнях магнитопровода.

Таблица П4.2. Выражения для мгновенных значений гармоник МДС и магнитной индукции в стержнях магнитопровода НР с четырьмя катушками в фазе

Номер стержня	МДС стержня	Гармоника магнитной индукции порядка ν				
		1	3	5	7	9
1	$F_1 \sin \omega t$	$B_1 \sin \omega t$	$B_3 \sin 3 \omega t$	$B_5 \sin 5 \omega t$	$B_7 \sin 7 \omega t$	$B_9 \sin 9 \omega t$
2	$F_1 \sin (\omega t - 20^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 20^\circ)$	$B_3 \sin (3 \omega t - 60^\circ)$	$B_5 \sin (5 \omega t - 100^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 140^\circ)$	$B_9 \sin (9 \omega t - 180^\circ)$
3	$F_1 \sin (\omega t - 100^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 100^\circ)$	$B_3 \sin (3 \omega t - 300^\circ)$	$B_5 \sin (5 \omega t - 140^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 340^\circ)$	$B_9 \sin (9 \omega t - 180^\circ)$
4	$F_1 \sin (\omega t - 120^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 120^\circ)$	$B_3 \sin 3 \omega t$	$B_5 \sin (5 \omega t - 240^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 120^\circ)$	$B_9 \sin 9 \omega t$
5	$F_1 \sin (\omega t - 140^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 140^\circ)$	$B_3 \sin (3 \omega t - 60^\circ)$	$B_5 \sin (5 \omega t - 340^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 260^\circ)$	$B_9 \sin (9 \omega t - 180^\circ)$
6	$F_1 \sin (\omega t - 220^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 220^\circ)$	$B_3 \sin (3 \omega t - 300^\circ)$	$B_5 \sin (5 \omega t - 20^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 100^\circ)$	$B_9 \sin (9 \omega t - 180^\circ)$
7	$F_1 \sin (\omega t - 240^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 240^\circ)$	$B_3 \sin 3 \omega t$	$B_5 \sin (5 \omega t - 120^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 240^\circ)$	$B_9 \sin 9 \omega t$
8	$F_1 \sin (\omega t - 260^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 260^\circ)$	$B_3 \sin (3 \omega t - 60^\circ)$	$B_5 \sin (5 \omega t - 220^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 20^\circ)$	$B_9 \sin (9 \omega t - 180^\circ)$
9	$F_1 \sin (\omega t - 340^\circ)$	$B_1 \sin (\omega t - 340^\circ)$	$B_3 \sin (3 \omega t - 300^\circ)$	$B_5 \sin (5 \omega t - 260^\circ)$	$B_7 \sin (7 \omega t - 220^\circ)$	$B_9 \sin (9 \omega t - 180^\circ)$

На рис. П4.10,а, ..., з показаны векторные диаграммы 1, 3, ..., 15 гармоник ЭДС, индуцируемых в катушках фаз обмотки; взяты в рамку обозначения результирующих векторов. При построении векторных диаграмм принимались во внимание: значения фазных углов ψ_ν , приведенных в табл. П4.2; соотношения чисел витков катушек фаз обмотки $W_b : W_m : W_c : W_c = 1 : 0,347 : 0,532 : 0,532$; взаимные соединения катушек, встречное или согласное. При построении векторных диаграмм не принималось во внимание различие амплитуд гармоник. В обозначениях векторов ЭДС катушек (например E_{1M}^5) верхний индекс соответствует порядку гармоники ν ; первый нижний индекс соответствует номеру стержня, который охватывает катушка (1-й стержень); второй нижний индекс (м) указывает какое число витков имеет эта катушка (меньшее – индекс «м», среднее – индекс «с» или большее – индекс «б»).

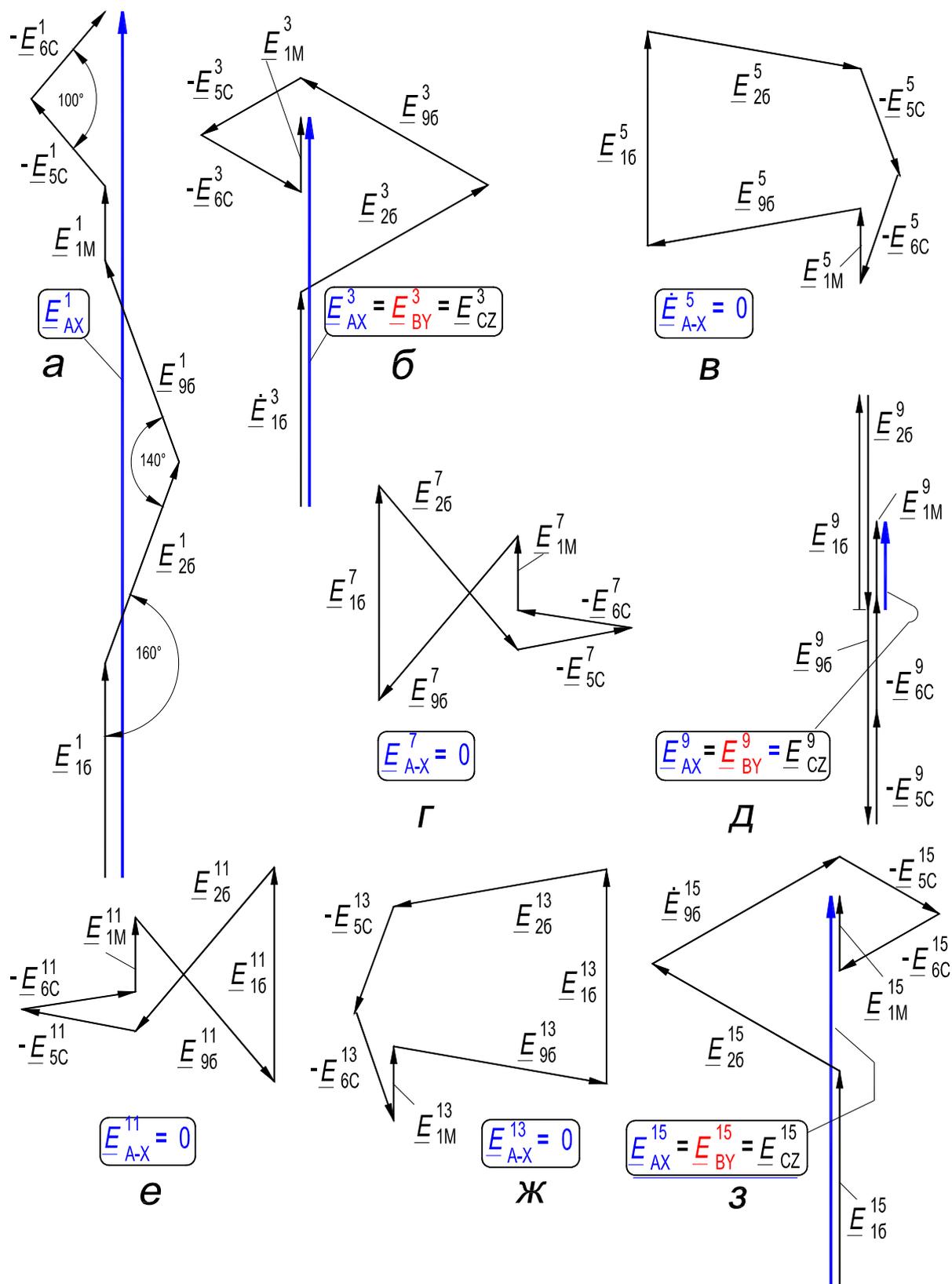


Рис. П4.10. Векторные диаграммы ЭДС, индуцируемых 1, 3, 5, ..., 15-й гармониками магнитного потока

Как следует из табл. П4.2 и векторных диаграмм, представленных на рис. П4.10,*a*,...,*з*, пары гармоник 5 и 13-я, 7 и 11-я являются взаимнообратными, и они не индуцируют результирующих ЭДС в фазах обмотки. Третья, девятая и пятнадцатая гармоники магнитного потока не обуславливают ЭДС между парами зажимов *A*, *B* или *C* обмотки реактора, но в фазах обмотки эти гармоники обуславливают уменьшенные ЭДС соответствующей частоты, которые составляют нулевую последовательность (можно показать, что коэффициент распределения фазы обмотки по 3 и 15-й гармоникам равен ~ 0.6 , а по 9-й гармонике ~ 0.1).

Вследствие пониженного содержания гармоник подобный НР является наиболее часто используемым типом реакторов.

Отметим, что если на стержни поместить дополнительные катушки и соединить последовательно-согласно каждые три катушки, расположенные на стержнях 1, 4, 7; 2, 5, 8 и 3, 6, 9, то с полученных фаз, соединенных в звезду зажимами X_2 , B_2 , C_2 , можно снять *трехфазную ЭДС утроенной частоты*. Если же фазы этой дополнительной обмотки соединить в открытый треугольник, то с такой обмотки можно снять *однофазную ЭДС 9-кратной частоты* (см. табл. П4.2).

Фаза обмотки рассмотренного НР, представленного на рис. П4.8, состоит из четырех катушек, причем катушка с большим числом витков W_6 охватывает сечения трех стержней. Возможно выполнить обмотку с катушками, каждая из которых охватывает сечение только одного, своего стержня, как и в серийных силовых трансформаторах. Фаза этой обмотки содержит катушки с соотношением чисел витков $W_M : W_C : W_6 : W_C : W_M = 0,395 : 0,743 : 1 : 0,743 : 0,395$. Реактор с такой обмоткой показан на рис. П4.11,*a* [10]. Все выводы относительно качества формы кривой тока НР (рис. П4.8), справедливы и для реактора, показанного на рис. П4.11,*a*. В этом можно убедиться, если проанализировать звезду векторов МДС стержней на рис. П4.4, с. 504 (см. также рис. П4.10).

Катушки фаз обмотки реактора, приведенного на рис. П4.11,*a*, можно также соединить в три параллельные ветви в каждой фазе (рис. П4.11,*б*), при этом форма кривой фазного (линейного) тока практически не ухудшится (см. [4] рис. 5.3, с. 86).

В.3. Управляемый реактор

Реактор предназначен для улучшения режимов работы распределительных электросетей 6 – 10 кВ и выше и устанавливается в этих сетях параллельно с нерегулируемыми источниками реактивной мощности (батарея конденсаторов). В совокупности УР и батарея конденсаторов представляют

собой статический компенсатор реактивной мощности (рис. П4.7,*а*), который плавно регулирует реактивную мощность как по величине, так и по знаку (рис. П4.7,*б*), т. е. выполняет функцию синхронного компенсатора. Статический компенсатор реактивной мощности конкурирует с синхронным компенсатором в экономическом отношении и превосходит его по таким важным показателям, как быстродействие, надежность, перегрузочная способность, поведение в аварийных режимах и др.

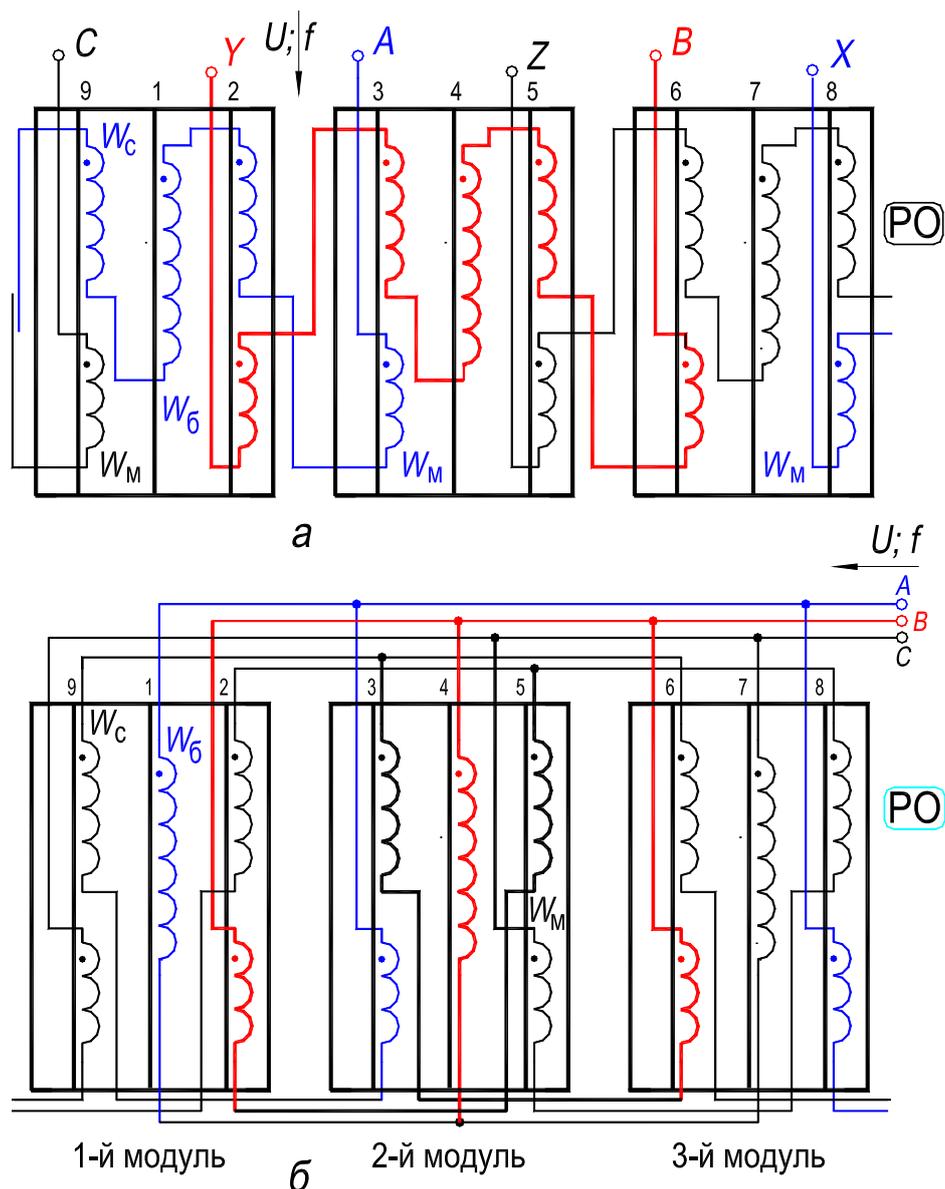


Рис. П4.11. Электромагнитная схема трёхфазного НР с пятью катушками в фазе:
а – последовательное соединение катушек в фазе; *б* – три параллельных ветви в фазе

Разработан трехфазный управляемый реактор, активная часть которого состоит из трех одинаковых модулей (рис. П4.12,*а*) [11]. Модуль выполняется на базе четырехстержневого планарного магнитопровода. На стержнях располо-

жены катушки двух совмещенных обмоток: рабочая (сетевая) трехфазная обмотка (РО) реактора, которая выполняет также функцию фазосдвигающей обмотки, и обмотка управления (ОУ) постоянного тока, которая совмещена с трехфазными обмотками короткозамкнутыми по 2, 10 и 4, 8-й гармоникам поля.

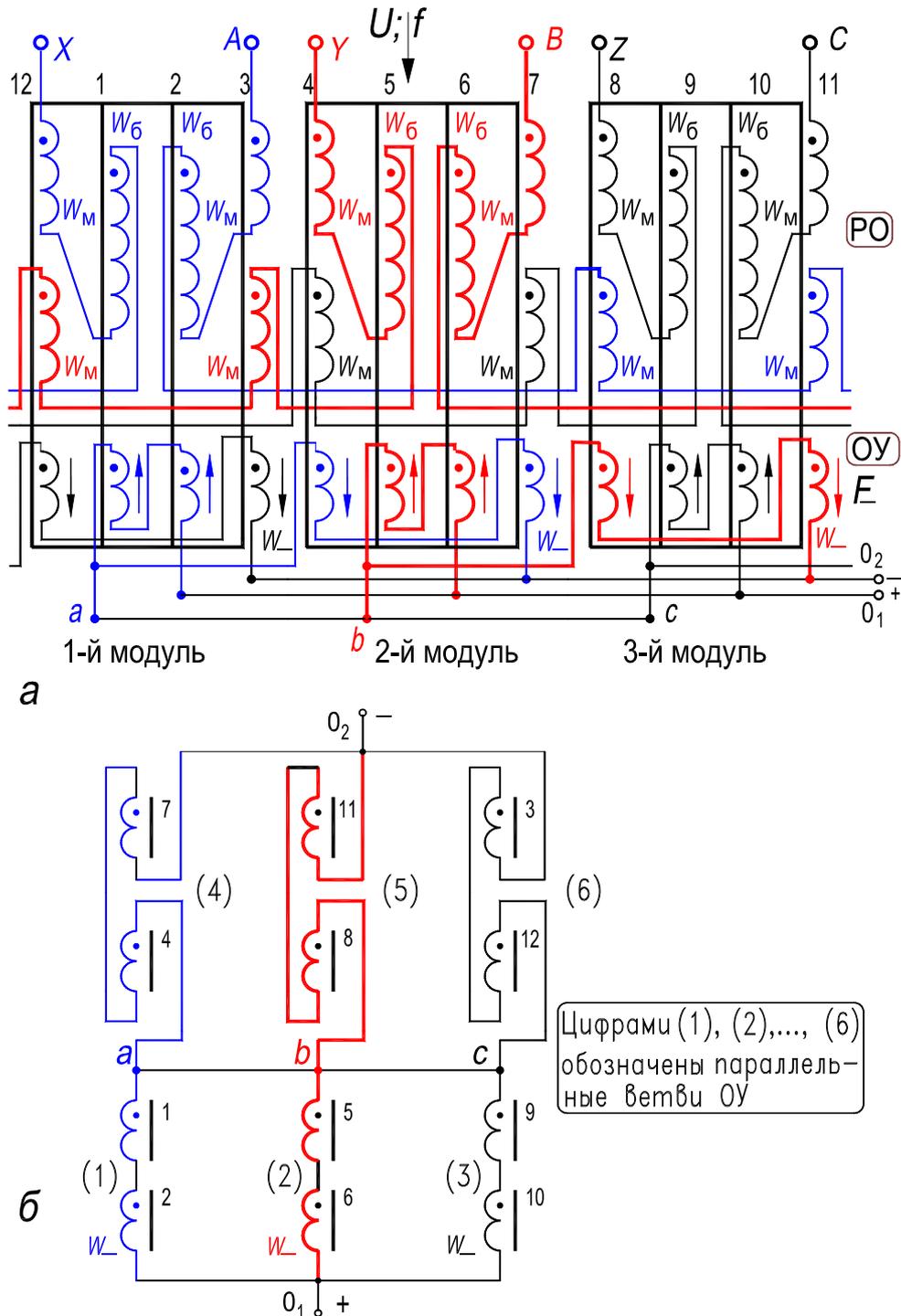


Рис. П4.12. Электромагнитная схема совмещённого УР – а;
структурная схема обмотки управления ОУ – б

Каждая фаза рабочей обмотки состоит из двух встречно-последовательно соединенных групп катушек. Каждая группа состоит из трех встречно-последовательно соединенных катушек. Соотношение чисел витков катушек составляет $W_M: W_C: W_M = 0,577: 1: 0,577$. Катушки с меньшим числом витков W_M являются фазосдвигающими, эти катушки расположены на крайних стержнях (левом и правом) каждого модуля, причем принадлежат они разным фазам рабочей обмотки.

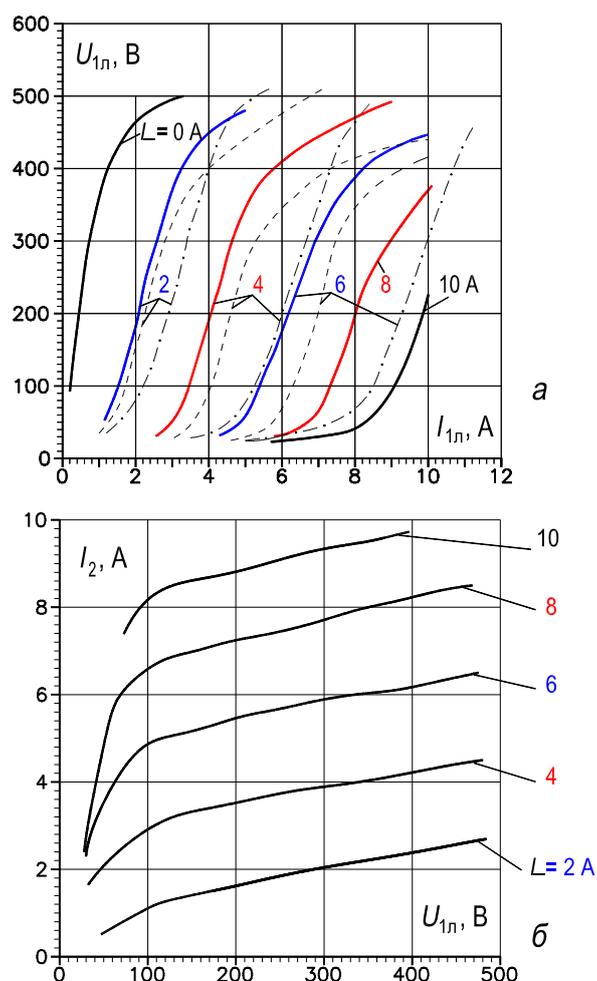


Рис. П4.13. Вольт-амперные характеристики реактора для режимов:
a – ВН (сплошные линии, СН4_8 (пунктирные), СН2_4_8_10 (штрих-пунктирные);
б – зависимость тока удвоенной частоты, протекающего в перемычке, соединяющей зажимы *a, b, c* обмотки управления ОУ, от напряжения, подведенного к рабочей обмотке РО

Катушки ОУ, структурная схема которой показана на рис. П4.12,б, соединены в шесть параллельных ветвей, причем в пределах 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6-й ветвей замыкаются 4 и 8-я гармоники тока, а по отношению к зажимам *a, b, c* являются короткозамкнутыми 2 и 10-я гармоники тока. Это согласуется с данными эксперимента (рис. П4.13,а, б), с результатами анализа индуктивных связей гармоник насыщения магнитного поля с обмоткой управления,

а также с результатами анализа математической модели электромагнитных режимов, выполненного на ПК (см. в [4] рис. 5.10, с. 99) для рассматриваемого управляемого реактора.

Гармонический состав тока обмоток и их индуктивные связи анализируются так же, как и для НР (разд. П4.2, В.2, с. 525, сл.), на основе: звезды векторов 1-й гармоники МДС стержней магнитопровода, звезд векторов гармоник магнитного потока и векторных диаграмм ЭДС, обусловленных этими гармониками потока в обмотках УР.

Из анализа диаграмм ЭДС следует, что в линейном токе рабочей обмотки из высших гармоник будут присутствовать, по существу, лишь 11 и 13-я гармоники тока, четных же гармоник и других высших нечетных гармоник в кривой тока проявляться практически не будет.

Как следует из сопоставления звезд векторов 2, 4, 8, 10-й гармоник магнитных потоков и схемы обмотки управления (рис. П4.12,б), в ее контурах будут короткозамкнутыми 2, 4, 8, 10-я гармоники тока, что положительно сказывается на диапазоне регулирования реактивной мощности реактора, на форме кривой тока рабочей обмотки, на способности ограничивать токи короткого замыкания в месте установки УР и на уменьшении потерь в стали магнитопровода. На зажимах O_1 и O_2 обмотки управления будет индуцироваться ЭДС лишь 12-й гармоникой магнитного потока, амплитуда которой относительно невелика.

Нечетные гармоники потока результирующей ЭДС в обмотке управления не создают. Как отмечено выше, эти выводы подтверждаются данными экспериментальных исследований (рис. П4.13,а, б), а также результатами расчетов [4].

Изготовлены на основе магнитопроводов силовых серийных трансформаторов два совмещенных управляемых реактора-трансформатора на мощность 250 кВ·А, напряжение 10/0,4 кВ. На стороне высокого напряжения включены батареи конденсаторов 3 x 100 квар; 6,3 кВ (рис. П4.7,а). Устройства установлены на подстанциях в распределительных электросетях с целью выполнения следующих функций: трансформация напряжения, компенсация реактивной мощности, улучшение качества электроэнергии.

Фотографии и описание разработанных устройств, а также системы автоматического управления стабилизацией напряжения распределительной электросети, реализованной на основе однокристалльной микроЭВМ и управляемого реактора, приведены на Web-сайте <http://zabudsky.ru/1.html>.

Литература *

1. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
2. Глебов И.А. Всесоюзный симпозиум «Эффективность применения управляемых реакторов в энергосистемах» // Электротехника. – 1990. – №5. – С.76 – 77.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
4. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 120 с.
<http://zabudsky.ru/UP1el-mag.pdf>
5. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 1999. – 141 с.
<http://zabudsky.ru/UP2mke-v.pdf>
6. Забудский Е.И. Управляемые реакторы для электроэнергетики // Электрификация, автоматизация и компьютеризация сельского хозяйства: Сборник научных трудов. – Москва: МГАУ, 2000. – С. 41 – 52.
<http://zabudsky.ru/statiya/wp.htm>
7. А.с. 1345294 СССР. Трехфазный статический ферромагнитный утроитель частоты / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки. Опубл. 15.10.87. Бюл. № 38.
8. А.с. 1347131 СССР. Трехфазный статический ферромагнитный удвоитель частоты / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки. Опубл. 23.10.87. Бюл. № 39.
9. А.с. 1541681 СССР. Трехфазный управляемый реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки. Опубл. 07.02.90. Бюл. № 5.
10. А.с. 1651326 СССР. Трехфазный насыщающийся реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин. Опубл. 23.05.91. Бюл. № 19.
11. А.с. 1658224 СССР. Трехфазный управляемый реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин. Опубл. 23.06.91. Бюл. № 23.
12. А.с. 1663721 СССР. Трехфазный статический ферромагнитный утроитель частоты / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин, В.Г. Ольховский, О.В. Воловецкий. Опубл. 15.07.91. Бюл. № 26.
13. А.с. 1781711 СССР. Трехфазный насыщающийся реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, Г.А. Евдокунин, С.Ф. Козырин. Опубл. 15.12.92. Бюл. № 46.
14. Забудский Е.И., Ермураки Ю.В., Козырин С.Ф. Новые конструкции ферромагнитных устройств для электроэнергетики // Электротехника. – 1991. – № 2. – С. 44 – 48.

* Данный список литературы относится к Приложению 4, с. 490,сл.

15. Забудский Е.И., Three-phase matched reactors-transformers for electric power engineering // 9th International Power System Conference, Vol.2: Доклады конференции. – Санкт-Петербург: СПбГТУ, 1994. – 12 с.

16. Забудский Е.И., Павлов М.В. Расчет магнитного поля в устройствах электромеханики и интерпретация результатов средствами компьютерной графики // Электротехника. – 1995. – № 4. – С. 44 – 46.

17. Забудский Е.И. Совмещенные электромагнитные устройства для систем управления в электроэнергетике // Всероссийский Электротехнический конгресс «На рубеже веков: итоги и перспективы» – Москва: МЭИ. – 1999. – С. 43 – 45.

18. Забудский Е.И. Расчет стационарного магнитного поля в ферромагнитных устройствах электроэнергетического назначения: Пакет компьютерных программ / Зарегистрирован в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Минобрования РФ. Регистр. № 94700, 16.02.94.

19. Забудский Е.И. Расчет переменного магнитного поля в ферромагнитных устройствах электроэнергетического назначения: Пакет компьютерных программ / (там же). Регистр. № 94698, 16.02.94.

20. Забудский Е.И. Расчет электромагнитных режимов работы ферромагнитных устройств электроэнергетического назначения: Пакет компьютерных программ / (там же). Регистр. № 94699, 16.02.94.

21. Забудский Е.И. Компьютерный фильм Геометрическая интерпретация результатов расчета магнитного поля в устройствах электромеханики: Пакет компьютерных программ / (там же). Регистр. № 94696, 16.02.94.

(Фильм демонстрируется на Web-сайте автора <http://zabudsky.ru/>).

22. Забудский Е.И. Стабилизация напряжения электросети на основе однокристалльной микроЭВМ // Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения электроэнергетики сельского хозяйства: Сборник научных трудов. – Москва: МГАУ, 2001. – С.50 – 69.

http://zabudsky.ru/Bolgar2017p1-2_72-99_100.pdf

23. Кулон Ж.-Л., Сабонадьер Ж.-К. САПР в электротехнике. Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 203 с.

24. ПУЭ 7. [Правила устройства электроустановок](#). Издание 7. –2020.

25. Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 190 с.

26. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат. 2003. – 436 с.

http://zabudsky.ru/Evgeny_Zabudsky-C_M_R.pdf

27. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: Монография. – М.: ООО «Мегаполис», 2018. – 355 с.

http://zabudsky.ru/Monograph_March2018site.pdf

П5. Компьютерный видеofilm «Конструкция и технология электрических машин. В 5-ти частях. Ч. 1. Трансформаторы»

URL-адрес – http://zabudsky.ru/Prezent_Trans/!Trans_Prez.ppt:

представлено устройство трансформатора на 58 слайдах с аудиокомментариями [9].



а



б

Рис. П5.1. Скриншоты кадров компьютерного видеofilm «Конструкция и технология электрических машин. Часть 1. Трансформаторы»: а – заставка фильма; б – фотография трансформатора, установленного на Асуанской ГЭС

Пб. Научный и учебно-методический комплекс

/ интернет-ресурс <http://zabudsky.ru/> /

(вместо заключения)

В этом комплексе представлены результаты научно-исследовательской и учебно-методической работы, а также CV автора книги.

Результаты научной работы

1. Опубликованные монографии (выборочно)

1.1. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. Москва: Энергоатомиздат, 2003. - 436 с.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/Evgeny_Zabudsky-C_M_R.pdf

1.2. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: Монография. Москва: ООО «Мегаполис», 2018. – 356 с.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/Monograph_March2018site.pdf

2. Опубликованные статьи (выборочно)

2.1. Evgeny Zabudsky. Controlled Electro-Magnetic Reactors Optimization Based on Mathematical Modeling of the Magnetic Field// International Journal «Information technologies & knowledge» Vol. 7, Number 2, ITHEA, Sofia (Bulgaria), 2013, pp.152-171.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/MeL_2013_ZabudskyEI-3.pdf

2.2. Evgeny Zabudsky. Modeling and Analysis of Electromagnetic Modes of Electric Power Devices// International Journal «Information technologies & knowledge» Vol. 9, Number 1, ITHEA, Sofia (Bulgaria), June 2015, pp.80-99.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/IJ_ITK_2015_V09-N01.pdf

2.3. Evgeny Zabudsky. Voltage Regulation of Distributed System Based on Single-Chip Microcomputer // International Journal «Information technologies & knowledge» Vol. 11, Number 1, ITHEA, Sofia (Bulgaria), June 2017, pp.73-99.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/Bolgar2017p1-2_72-99_100.pdf

Результаты учебно-методической работы

А. Авторские курсы

1. Электрические машины. Учебно-методический комплекс:

КПИ, РУДН, РГАУ-МСХА.

URL-адрес: <http://zabudsky.ru/index1.html>

2. Моделирование в энергетике. План курса:

РГАУ-МСХА.

URL-адрес: <http://zabudsky.ru/Lecture14apr2020END.pdf>

3. Объектно-ориентированное программирование, язык C# (C-Sharp).

Учебно-методический комплекс:

ГУ ВШЭ, РУДН.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/New_Web_Page_ZEI.pdf

Б. Учебные пособия для вузов с грифом

Забудский Е.И. **Электрические машины. В 4-х частях** : Учебное пособие для вузов: **Часть 1. Трансформаторы**: / Е.И. Забудский – М.: ООО «Мегаполис», 2021. – 540 с.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/1-Trans_1-all.pdf

Часть 2. Асинхронные машины: / Е.И. Забудский – М.: ООО «Мегаполис», 2017. – 304 с.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/AD_UP2/1-2_UP2-AD_T.pdf

Часть 3. Синхронные машины: / Е.И. Забудский – М.: ООО «Мегаполис», 2019. – 295 с.

URL-адрес: <http://zabudsky.ru/SMedit2-10feb2019end-INT-T.pdf>

Часть 4. Коллекторные машины постоянного и переменного тока : / Е.И. Забудский – М.: ООО «Мегаполис», 2020. – 294 с.

URL-адрес: http://zabudsky.ru/MPT_UP4_end_ZEI.pdf

Забудский Е.И. **Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств**: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 120 с.

<http://zabudsky.ru/UP1el-mag.pdf>

Забудский Е.И. **Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов**: Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ. 1999. – 141 с.

<http://zabudsky.ru/UP2mke-v.pdf>

В. Мультимедиа

Забудский Е.И. **Конструкция и технология сборки электрических машин. Звуковой видеofilm. В 5-ти частях**. – М.: РУДН, 2015 (смотрите и слушайте).

Часть 1. Трансформаторы: 58 слайдов;

http://zabudsky.ru/Prezent_Trans/!Trans_Prez.ppt

Часть 2. Асинхронные машины: 74 слайда;

http://zabudsky.ru/Prezent_AM/!AM_Prezent.ppt

Часть 3. Синхронные машины: 126 слайдов

http://zabudsky.ru/Prezent_CM/!CM_Prezent.ppt

Часть 4. Машины постоянного тока: 46 слайдов;

http://zabudsky.ru/Prezent_MPT/!MPT_Prezent.ppt

Часть 5. Общие виды тепло- и гидроэлектростанций: 46 слайдов

http://zabudsky.ru/Prezent_El_St/!El_St_Prezent.ppt

Забудский Е.И. Саяно-Шушенская ГЭС. Демонтаж второго энергоблока (смотрите). (после аварии 17 августа 2009 г.).

http://zabudsky.ru/Prezent_El_St/S_ShGES_2dem.ppt

Забудский Е.И. Саяно-Шушенская ГЭС. Монтаж четвертого энергоблока (смотрите). (после аварии 17 августа 2009 г.).

http://zabudsky.ru/Prezent_El_St/S_ShGES_4mon.ppt

Забудский Е.И. Мультимедиа-иллюстрация условий создания вращающегося магнитного поля трехфазной пространственно-распределенной обмоткой. *

http://zabudsky.ru/Prezent_AM/vmp_news.exe

Забудский Е.И. Мультимедиа-иллюстрация изменения во времени пульсирующего магнитного поля, созданного сосредоточенной обмоткой трансформатора.

<http://zabudsky.ru/Trans-Field..exe>

Забудский Е.И. Мультимедиа-иллюстрация. Радиальная и электрическая схемы обмотки якоря машины постоянного тока: укладка обмотки в пазы сердечника якоря; выпрямление коллектором переменной ЭДС обмотки якоря генератора.

http://zabudsky.ru/Prezent_MPT/M_P_Tok.exe

Забудский Е.И. Шаговый двигатель. Устройство, принцип действия, назначение. Мультимедиа-учебное пособие. /Перед просмотром в меню VIEW установить «100 %», затем кликнуть по кнопке «Развернуть»/

http://zabudsky.ru/Sin-M_RAnchor/ShagDvig.exe

Забудский Е.И. Мультимедиа-лекция по теме «Реакция якоря синхронной машины». В 4-х частях.

1-я часть. Основные положения теории реакции якоря, 5 ‘;

http://zabudsky.ru/Sin-M_RAnchor/1partSMRA.exe

2-я часть. Устройство активной части СМ и основы теории реакции якоря, 5 ‘ /кликать по изображению только по приглашению: «перейдем к следующему изображению»;

http://zabudsky.ru/Sin-M_RAnchor/2partSMRA.exe

3-я часть. Построение векторных диаграмм, иллюстрирующих теорию реакции якоря, 6 ‘;

http://zabudsky.ru/Sin-M_RAnchor/3partSMRA.exe

4-я часть. Заключение к мультимедиа-лекции «Реакция якоря синхронной машины», 3 ‘;

http://zabudsky.ru/Sin-M_RAnchor/4partSMRA.exe

Забудский Е.И. Компьютерный фильм «Геометрическая интерпретация результатов расчета магнитного поля методом конечных элементов в устройстве трансформаторного типа».

<http://zabudsky.ru/filmr/film.html>

Забудский Е.И. Заключительная видео-лекция: дайджест курса «Электрические машины» (бак.). В 2-х частях. 19 мая 2020 г. Среда ZOOM.US.

1-я часть (30 ‘):

http://zabudsky.ru/Lecture19may2020END_1.mp4

2-я часть (10 ‘):

http://zabudsky.ru/Lecture19may2020END_2.mp4

Забудский Е.И. Заключительная видео-лекция: дайджест авторского курса «Моделирование в энергетике» (маг.; 30 ‘). 14 мая 2020 г. Среда ZOOM.US.

<http://zabudsky.ru/14may2020-Lecture-zoom.mp4>

etc.: см. web-сайт <http://zabudsky.ru>.

* **Примечание:** рекомендуется запускать файлы типа *.exe на выполнение в браузере <https://www.google.ru>. Файлы проверены на отсутствие вируса.

Учебное издание

Евгений Иванович Забудский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

**Часть 1. Трансформаторы.
Теория, устройство, эксперимент**

Учебное пособие для вузов

В четырёх частях

Издается в авторской редакции

Дизайн обложки

Полина Шапошникова

Подписано в печать 14.04.2021. Формат 70x100/16.
Усл.-печ. л. 33,7. Тираж 150 экз. Заказ № 10

ООО «Мегаполис»
www.m-megapolis.ru
Тел.: +7 (495) 643-28-71
E-mail: zakaz@m-megapolis.ru
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 23 А

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
Тел.: +7 (499) 322-38-31
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5