



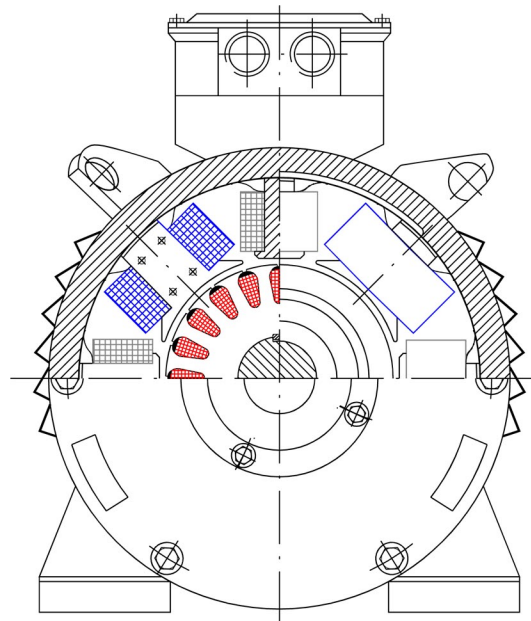
**Забудский  
Евгений Иванович**

**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 978-5-6043722-7-2



9 785604 372272

**Е. И. Забудский**

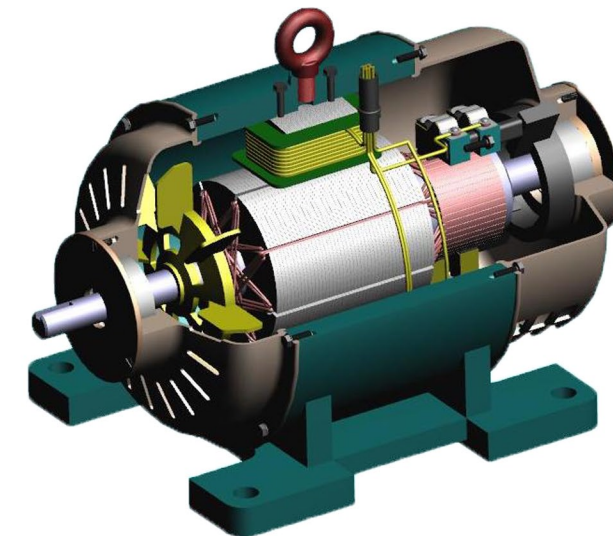
**Электрические машины**

**Часть 4**

**Е. И. Забудский**

# **Электрические машины**

## **Часть 4. Коллекторные машины постоянного и переменного тока**



**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Москва  
2020

**Е. И. ЗАБУДСКИЙ**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

Часть четвёртая

**КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ  
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В четырёх частях

**Учебное пособие для вузов**

*Рекомендовано*

*Научно-методическим советом по технологиям,  
средствам механизации и энергетическому оборудованию  
в сельском хозяйстве Федерального УМО  
по сельскому, лесному и рыбному хозяйству*

Москва  
ООО “Мегаполис”  
2020

УДК 621.313(075.8)

ББК 31

3 128

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.**

3 128 Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4 частях.

Ч. 4. Коллекторные машины постоянного и переменного тока /

Е. И. Забудский. – М.: ООО “Мегаполис”, 2020. – 294 с.

**На передней стороне:** аксонометрическая проекция машины постоянного тока;

**на задней стороне:** чертёж поперечного вида машины постоянного тока

ISBN 978-5-6043722-7-2

Книга является четвертой частью учебного пособия по курсу “Электрические машины”. В соответствии с утверждённой программой в ней рассматриваются принципы устройства и основные вопросы теории коллекторных машин постоянного и переменного тока; режимы работы, характеристики и эксплуатационные свойства коллекторных машин постоянного и переменного тока. Приведено описание экспериментальных работ.

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

Рекомендовано научно-методическим советом по технологиям, средствам механизации и энергетическому оборудованию в сельском хозяйстве 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 621.313(075.8)

ББК 31

ISBN 978-5-6043722-7-2

© Забудский Е. И., 2020

© ООО “Мегаполис”, 2020

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Термины и определения .....</b>	<b>17</b>
1.1. Машины постоянного тока .....	17
1.2. Основные детали и сборочные единицы вращающихся электрических машин .....	17
1.3. Вращающиеся электрические машины, различающиеся областью применения, назначения или конструкцией .....	20
1.4. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по способу возбуждения .....	20
1.5. Режимы работ и процессы, связанные с изменением состояния машины .....	22
1.6. Характеристики вращающихся электрических машин .....	24
1.7. Расчётные параметры вращающихся электрических машин .....	26
1.8. Электромашинные преобразователи .....	29
1.9. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по характеру изменения частоты вращения .....	29
1.10. Информационные электрические машины .....	29
<b>2. Буквенные и графические обозначения элементов в электрических схемах .....</b>	<b>31</b>
2.1. Буквенные обозначения элементов в схемах .....	31
2.2. Графические обозначения элементов электрических машин .....	32
<b>3. Обозначение выводов обмоток электрических машин, разработанных после 1.01.1987 г. ....</b>	<b>34</b>
3.1. Обозначения выводов .....	34
3.1.1. Обмотки электрических машин постоянного тока .....	34
3.1.2. Обмотки трёхфазных машин переменного тока .....	35
3.2. Определение направления вращения .....	36
3.3. Связь между обозначением выводов и направлением вращения	36
<b>Часть первая. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА *</b>	
<b>4. Устройство и принцип действия машин постоянного тока .....</b>	<b>37</b>
4.1. Закон электромагнитной индукции; электромагнитная сила .....	37

4.2. Принцип действия простейшего генератора постоянного тока. Коллектор – механический выпрямитель ЭДС и тока обмотки якоря .....	41
4.3. Устройство генератора постоянного тока .....	45
4.4. Устройство обмотки якоря .....	51
4.4.1. Шаги обмотки .....	51
4.4.2. Радиальная схема обмотки .....	53
4.4.3. Развёрнутая схема обмотки .....	55
4.4.4. Электрическая схема обмотки .....	56
4.5. Электродвижущая сила обмотки якоря .....	59
4.6. Схемы возбуждения генераторов постоянного тока .....	61
4.6.1. Классификация генераторов по способу возбуждения .....	61
4.7. Энергетическая диаграмма генератора .....	62
4.8. Электромагнитный момент генератора .....	64
4.8.1. Момент холостого хода генератора .....	65
4.8.2. Уравнение равновесия моментов генератора .....	65
4.9. Уравнение равновесия напряжений обмотки якоря генератора ..	65
4.10. Двигатели постоянного тока. Классификация .....	67
4.11. Энергетическая диаграмма двигателя .....	67
4.12. Уравнение равновесия вращающих моментов двигателя .....	69
4.13. Уравнение равновесия напряжений двигателя .....	72
<b>5. Номинальные величины исследуемых электрических машин ...</b>	<b>73</b>
5.1. Генератор постоянного тока (Работа №1) .....	73
5.2. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением (Работа №2) .....	73
5.3. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением (Работа №3) .....	74
5.4. Электромашинный усилитель (Работа №4) .....	75
<b>6. Работа № 1. Исследование генератора постоянного тока         при различных способах возбуждения.</b>	
<b>Оглавление .....</b>	<b>76</b>
<b>7. Работа № 2. Исследование двигателя постоянного тока         с параллельным возбуждением.</b>	
<b>Оглавление .....</b>	<b>132</b>

<b>8. Работа № 3. Исследование двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.</b>	
Оглавление .....	<b>181</b>
<b>9. Работа № 4. Исследование электромашинного усилителя поперечного поля.</b>	
Оглавление .....	<b>192</b>
<b>10. Машины постоянного тока, изготавливаемые в России .....</b>	<b>214</b>
<b>Часть вторая. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА **</b>	
<b>11. Назначение коллекторных машин переменного тока .....</b>	<b>217</b>
<b>12. Трёхфазные коллекторные машины .....</b>	<b>219</b>
12.1. Работа трёхфазной асинхронной бесколлекторной машины при введении в цепь ротора дополнительной ЭДС .....	219
12.2. Введение в цепь ротора асинхронной машины дополнительной ЭДС при помощи коллектора .....	225
12.3. Коммутация тока в трёхфазном коллекторном роторе .....	229
12.4. Трёхфазные коллекторные машины с параллельным соединением цепей статора и ротора (двигатель Шраге - Рихтера) .....	233
12.5. Трёхфазные коллекторные машины с последовательным соединением цепей статора и ротора .....	240
<b>13. Однофазные коллекторные машины .....</b>	<b>244</b>
13.1. Применение, устройство и основные определения .....	244
13.2. Электродвижущие силы, наводимые в обмотке ротора однофазного коллекторного двигателя .....	245
13.3. Вращающий момент, действующий на ротор однофазного коллекторного двигателя .....	249
13.4. Коммутация тока в обмотке однофазного ротора .....	252
13.5. Двигатели с последовательным соединением цепей статора и ротора .....	256
13.6. Двигатели с трансформаторной связью цепей статора и ротора (репульсионные) .....	260
<b>14. Вентильные двигатели .....</b>	<b>267</b> ***
14.1. Сопоставление механических характеристик электродвигателей общепромышленного назначения .....	267
14.1.1. Коллекторный двигатель постоянного тока .....	267

14.1.2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором .	269
14.1.3. Синхронный двигатель .....	270
14.2. Двигатель постоянного тока	
с полупроводниковым коммутатором – <b>вентильный двигатель</b>	273
<b>Литература</b> .....	277
<b>Приложение 1</b>	
<b>П1.1.</b> Паскаль-программа “Расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением” .....	279
<b>П1.2.</b> Доклад на конференции International Conference “Modern (e-) Learning” (MeL 2011), Varna (Bulgaria) / Сборник “Applicable Information Models”, ITHEA, Sofia, 2011. pp. 232-243: Забудский Е.И. Учебно-методический комплекс дисциплины “Электрические машины” /Интернет-реализация/ Интернет-ресурс – <a href="http://zabudsky.ru/ZEI_Doklad_2011_BG.pdf">http://zabudsky.ru/ZEI_Doklad_2011_BG.pdf</a> .....	283

**Перечень рисунков в Введении, в 4-, 12-, 13- и 14-м разделах** – см. с. 7, сл.

**Перечень рисунков в 6-, 7-, 8- и 9-м разделах**

см., соответственно, с. 79, с. 134, с. 182 и с. 193.

**Перечень таблиц в 3-, 4-, 5- и 14-м разделах** – см. с. 10.

**Перечень таблиц в 6-, 7-, 8- и 9-м разделах**

см., соответственно, с. 80, с. 134, с. 182 и с. 193.

\* **Теория коллекторной машины постоянного тока** изложена в **разделе 4** (с. 37, сл.)  
**NB** и в **разделе 3 Работ №№ 1, 2, 3 и 4.**

См. **Оглавление этих Работ**, соответственно, на с. **76, 132, 181 и 192.**

\*\* **Теория коллекторной машины переменного тока** изложена  
**NB** в **разделах 11, 12 и 13.** См. с. 217, сл.

\*\*\* **Основы теории вентильного двигателя** изложены  
**NB** в **разделе 14.** См. с. 267, сл.

## Перечень рисунков в Введении, в 4-, 12-, 13- и 14-м разделах

Рис. В1. Общий вид базиса стенда “Генератор постоянного тока” .....	15
Рис. В2. Стенд “Генератор постоянного тока” с исследуемым агрегатом .....	16
Рис. В3. Передняя (приборная) панель стенда “Генератор постоянного тока” .....	16
Рис. 4.1. К иллюстрации правил: <i>a</i> – правой руки (ЭДС $e_{вр}$ ); <i>b</i> – левой руки (сила $f_{эм}$ ) ...	38
Рис. 4.2. Картина распределения магнитного поля двух полюсов и проводника с током: <i>a</i> – поля совмещены; <i>b</i> – результирующее поле, возникновение электромагнитной силы $f_{эм}$ .....	40
Рис. 4.3, лист 1. Принцип действия простейшего генератора переменного тока .....	42
Рис. 4.3, лист 2. Принцип действия простейшего генератора постоянного тока (на якоре один виток) .....	43
Рис. 4.3, лист 3. Принцип действия простейшего генератора постоянного тока (на якоре два витка) .....	44
Рис. 4.4, лист 1. Поперечный вид (чертёж): <i>a</i> – машина постоянного тока; <i>b</i> – сердечник главного полюса .....	46
Рис. 4.4, лист 2. Продольный вид: <i>a</i> – машина постоянного тока (чертёж); <i>b</i> – аксонометрическая проекция ....	47
Рис. 4.4, лист 2. Продольный вид: <i>v</i> – якорь .....	48
Рис. 4.5. Коллектор машин постоянного тока: <i>a</i> – общий вид (чертёж); <i>b</i> – разборный; <i>v</i> – неразборный, на пластмассе ( <i>b</i> и <i>v</i> – аксонометрические проекции) .....	49
Рис. 4.6. Щёткодержатели с вставленной щёткой (аксонометрические проекции): <i>a</i> – радиальный; <i>b</i> – реактивный .....	50
Рис. 4.7. Щёточная траверса малых машин постоянного тока (чертёж) .....	50
Рис. 4.8. Развернутая схема простой петлевой обмотки: <i>a</i> – шаги обмотки; <i>b</i> – в пазы уложена вся обмотка .....	52
Рис. 4.9. Радиальная схема простой петлевой обмотки: <i>a</i> – уложена 1-я секция; <i>b</i> – уложены 1, 2 и 3-я секции; <i>v</i> – уложена вся обмотка .....	54
Рис. 4.10. Радиальная схема простой петлевой обмотки при различных положениях якоря (по сравнению с рис. 4.9, <i>v</i> ) .....	56
Рис. 4.11. Электрическая схема соединений обмотки якоря, соответствующая положению якоря: <i>a</i> – на рис. 4.9, <i>v</i> ; <i>b</i> – на рис. 4.10, <i>a</i> ; <i>v</i> – на рис. 4.10, <i>b</i> ; <i>z</i> – на рис. 4.10, <i>v</i> .....	57
Рис. 4.12. Распределение физических величин: <i>a</i> – магнитной индукции в пространстве на двух полюсных делениях; <i>b</i> – переменной ЭДС во времени в витке; <i>v</i> – выпрямленных ЭДС во времени и тока в нагрузке .....	60
Рис. 4.13. Схемы генераторов при различном возбуждении: <i>a</i> – независимое; <i>b</i> – параллельное; <i>v</i> – последовательное; <i>z</i> – смешанное возбуждение.....	61
Рис. 4.14. Энергетическая диаграмма генератора независимого возбуждения .....	63



## Продолжение перечня рисунков в 4- и 12-м разделах

Рис. 4.15. Схемы двигателей при различном возбуждении: <i>a</i> – независимое; <i>b</i> – параллельное; <i>в</i> – последовательное; <i>г</i> – смешанное возбуждение.....	68
Рис. 4.16. Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения .....	69
Рис. 4.17. Иллюстрация к принципу действия: <i>a</i> – генератора; <i>b</i> – двигателя .....	70
Рис. 12.1. Векторные диаграммы цепи ротора при введении в неё ЭДС $\underline{E}_\Delta$ , находящейся в фазе или противофазе с ЭДС $\underline{E}_{2s}$ при $M_c = \text{const}$ .....	220
Рис. 12.2. Векторные диаграммы цепи ротора при введении в неё ЭДС $\underline{E}_\Delta$ , находящейся в квадратуре с ЭДС $\underline{E}_{2s}$ .....	221
Рис. 12.3. Векторная диаграмма цепи ротора при введении в неё ЭДС $\underline{E}_\Delta$ в общем случае при $M_c = \text{const}$ .....	222
Рис. 12.4. Зависимость момента вращения от скольжения при разных значениях $k = E_\Delta : U_1$ .....	225
Рис. 12.5. Принцип устройства трёхфазной коллекторной машины .....	226
Рис. 12.6. Введение в цепь ротора ЭДС с помощью коллектора .....	228
Рис. 12.7. Форма переменного тока в цепи ротора .....	229
Рис. 12.8. Пространственная диаграмма МДС .....	230
Рис. 12.9. К определению сдвига фаз между ЭДС $e_R$ и $e_B$ .....	231
Рис. 12.10. Схема трёхфазного коллекторного двигателя с параллельным возбуждением .....	233
Рис. 12.11. Рабочие характеристики трёхфазного коллекторного двигателя с параллельным возбуждением .....	234
Рис. 12.12. Схема двигателя Шраге – Рихтера .....	235
Рис. 12.13. Различные случаи расположения щёток на коллекторе двигателя Шраге – Рихтера и регулирование скорости вращения .....	236
Рис. 12.14. Пространственные векторные диаграммы МДС обмоток ротора и статора двигателя Шраге – Рихтера для трёх случаев расположения щёток на коллекторе ...	237
Рис. 12.15. Векторная диаграмма двигателя Шраге – Рихтера .....	237
Рис. 12.16. Схема устройства для передвижения щёток в двигателе Шраге – Рихтера .....	238
Рис. 12.17. Характеристики момента вращения в функции скольжения двигателя Шраге – Рихтера при различных значениях $E'_\Delta / E_1$ .....	239
Рис. 12.18. Схема включения коллекторного двигателя последовательного возбуждения с понижением напряжения на обмотках статора и ротора .....	240
Рис. 12.19. Схема включения коллекторного двигателя последовательного возбуждения с понижением напряжения на обмотке ротора .....	241
Рис. 12.20. Различное взаимное расположение осей обмоток статора и ротора .....	242
Рис. 12.21. Зависимость направления вращения ротора от направления сдвига щёток .....	243

### Продолжение перечня рисунков в 13- и 14-м разделах

Рис. 13.1. Магнитная система (два полюсных деления) однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения .....	245
Рис. 13.2. Образование в обмотке якоря ЭДС вращения .....	246
Рис. 13.3. Образование в обмотке якоря ЭДС трансформации .....	247
Рис. 13.4. Пространственное разложение МДС и магнитного потока на продольные и поперечные составляющие .....	248
Рис. 13.5. Векторная диаграмма магнитных потоков и ЭДС .....	249
Рис. 13.6. Образование момента вращения в однофазном двигателе .....	250
Рис. 13.7. Мгновенные и средние значения момента вращения однофазного двигателя ...	250
Рис. 13.8. Изменение тока в коммутируемой секции однофазного коллекторного двигателя ...	252
Рис. 13.9. Потокосцепление с коммутируемой секцией .....	253
Рис. 13.10. Векторная диаграмма ЭДС, действующих в коммутируемой секции .....	254
Рис. 13.11. Схема однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения ....	256
Рис. 13.12. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения .....	257
Рис. 13.13. Схема однофазного коллекторного двигателя Аткинсона .....	260
Рис. 13.14. Схема однофазного коллекторного репульсионного двигателя .....	261
Рис. 13.15. Векторная диаграмма репульсионного двигателя .....	262
Рис. 13.16. Характеристики репульсионного двигателя .....	264
Рис. 13.17. Пусковые характеристики репульсионного двигателя .....	264
Рис. 13.18. Направление вращения репульсионного двигателя .....	265
Рис. 13.19. Рабочие характеристики репульсионного двигателя .....	266
Рис. 14.1. Механическая характеристика: $a$ – коллекторного двигателя независимого возбуждения; $b$ – асинхронного двигателя; $c$ – синхронного двигателя. Регулировочная характеристика коллекторного двигателя независимого возбуждения – $b$ .....	268
Рис. 14.2. Схема двигателя постоянного тока с полупроводниковым коммутатором .....	274

### Перечень таблиц в 3-, 4-, 5- и 14-м разделах

Табл. 3.1. Обозначение выводов обмоток машин <i>постоянного</i> тока .....	34
Табл. 3.2. Обозначение выводов обмотки статора .....	35
Табл. 3.3. Обозначение выводов обмоток ротора .....	35
Табл. 4.1. Состояние секций обмотки якоря в процессе его вращения .....	58
Табл. 5.1.1. Номинальные величины исследуемого генератора .....	73
Табл. 5.1.2. Номинальные величины приводного двигателя .....	73
Табл. 5.2.1. Номинальные величины исследуемого двигателя .....	73
Табл. 5.2.2. Номинальные величины двигателя, работающего в режиме электромагнитного тормоза .....	74
Табл. 5.3.1. Номинальные величины исследуемого двигателя .....	74
Табл. 5.3.2. Номинальные величины нагрузочного генератора постоянного тока .....	74
Табл. 5.4.1. Номинальные величины исследуемого электромашинного усилителя .....	75
Табл. 5.4.2. Номинальные величины приводного асинхронного двигателя .....	75
Табл. 14.1. Свойства электрических двигателей общепромышленного назначения .....	271

## Введение

Электрические машины по типу питания делятся на машины *переменного* и *постоянного* тока. Машины постоянного тока подключаются к сети постоянного тока.

С точки зрения происходящих электромагнитных процессов принято выделять в электрической машине две части: 1) часть, обеспечивающую создание магнитного потока – *индуктор*, и 2) часть, в которой наводится ЭДС и протекает ток нагрузки, – *якорь*. В машинах постоянного тока *якорь вращается*, а *индуктор*, имеющий явно выраженные полюсы чередующейся полярности, – *неподвижен* (напомним, что в синхронной машине классической конструкции якорь неподвижен, а индуктор вращается [5]). Необходимыми элементами современной машины постоянного тока являются также *коллектор* и *щётки*.

В истории развития машин постоянного тока было два периода, когда предполагали, что они не будут выпускаться промышленностью. *Первый период* относится к началу XX века, когда активное внедрение переменного тока, казалось, вытеснит постоянный ток и останутся только машины переменного тока. *Второй период* относится к 75–80-летней давности, когда быстрое развитие полупроводниковой техники, казалось должно было вытеснить *механический преобразователь частоты* – *коллектор* и машины постоянного тока *в классической конструкции* не будут выпускаться. Однако развитие электромашиностроения опровергло эти предположения [1,13].

Машины постоянного тока благодаря: 1) экономичному регулированию частоты вращения, 2) благоприятным механическим характеристикам, 3) появлению новых источников постоянного тока нашли новые области применения и выдержали конкуренцию с машинами переменного тока.

Машины постоянного тока широко используются в электрических установках в качестве двигателей и генераторов. Их мощность колеблется в пределах от долей киловатта до 10 000 кВт и выше. Напряжение машин постоянного тока не превосходит обычно нескольких тысяч вольт. Наибольшее распространение имеют машины, напряжение которых не превышает 1000 В. Скорость вращения машин постоянного тока колеблется в весьма широких пределах: *от нескольких десятков до нескольких тысяч оборотов в минуту*.

*Двигатели широко применяются* в качестве тяговых на электровозах, тепловозах, в пригородных электропоездах, метрополитене, трамвае, троллейбусе, электрокарах, морских и речных судах. *Крановые* двигатели постоянного тока часто применяются в приводе различных *подъёмных устройств*. С помощью мощных двигателей постоянного тока (до 12000 кВт) приводятся в действие *прокатные станы*. Крупные двигатели постоянного тока приводят во вращение *гребные винты* на судах. Выпускаемые массовыми сериями двигатели постоянного тока общепромышленного применения используются в приводах, *требующих регулирования частоты вращения*. В подавляющем большинстве автомобилей, тракторов, самолетов и других летательных аппаратов, имеющих систему электропитания на постоянном токе, все вспомогательные устройства приводятся в действие двигателями постоянного тока.

*Основное преимущество двигателей постоянного тока по сравнению с асинхронными [4] и синхронными [5] – возможность плавного и экономичного регулирования их скорости вращения в широких пределах и отсутствие ограничивающего верхнего предела 3000 об/мин, существующего в бесколлекторных двигателях переменного тока при 50 Гц.*

*Генераторы постоянного тока находят применение* в промышленности для питания электропривода постоянного тока, в установках проводной и радиосвязи, авто- и авиатранспорте. Питание *обмоток возбуждения синхронных генераторов* осуществляется во многих случаях от генераторов постоянного тока (*возбудителей*) [5]. Широко также распространены генераторы постоянного тока *специального исполнения*, обладающие особыми свойствами (сварочные, генераторы для освещения поездов, электромашинные усилители постоянного тока и пр.).

*Основной недостаток машин постоянного тока – относительно высокая стоимость и более сложная технология их изготовления из-за наличия коллектора* и несколько меньшая надежность из-за применения в основной рабочей цепи *скользящих щётчных контактов*, имеющих склонность к искрению, сравнительно быстрый износ и требующих специального наблюдения в процессе эксплуатации машины. Двигатели постоянного тока в 2...3 раза дороже, чем асинхронные короткозамкнутые двигатели.

Находят применение машины постоянного тока, в которых *механический выпрямитель – коллектор* заменен *полупроводниковым преобразователем*. Такие машины называются вентильными машинами или машинами с полупроводниковыми коммутаторами [13,19].

Основные серии машин постоянного тока общего назначения 2П и 4П. Помимо этих серий выпускаются серии краново-металлургических двигателей и серии специализированного назначения.

Серия 2П включает двигатели мощностью от 0,13 до 200 кВт с высотой оси вращения 90–135 мм. Для замены двигателей серии П габаритов 12-26 выпускается серия П2.

Разработана новая серия машин постоянного тока 4П, которая имеет лучшие технико-экономические показатели и использует некоторые узлы и детали асинхронных двигателей серии 4А [4].

Двигатели серии 2П и 4П выпускаются на напряжения 110, 220, 340 и 440 В, на номинальные частоты вращения 750, 1000, 1500, 2200 и 3000 об/мин. Машины выполняются в защищённом исполнении с самовентиляцией и независимой вентиляцией от постороннего вентилятора; в закрытом исполнении – с естественным охлаждением и наружным обдувом от постороннего вентилятора.

Двигатели серии 2П имеют независимое возбуждение и компенсационную обмотку, обеспечивающую большие кратковременные перегрузки и широкий диапазон изменения частоты вращения.

Для металлургических, крановых, экскаваторных и других электроприводов выпускаются двигатели постоянного тока серии Д. Двигатели имеют мощность от 2,5 до 185 кВт, напряжение 220 и 440 В и номинальную частоту вращения 400–1440 об/мин. Масса двигателя мощностью 2,5 кВт 130 кг, а двигателя 185 кВт – 3745 кг.

Для горнодобывающей металлургической и других отраслей промышленности выпускаются уникальные машины постоянного тока [13].

В *первом – третьем разделах* учебного пособия приведены выдержки из стандартов, касающиеся терминологии, буквенных обозначений коллекторных машин постоянного и переменного тока и их элементов в электрических схемах, обозначений выводов обмоток.

В *пятом разделе* приведены номинальные данные коллекторных машин постоянного тока, исследуемых в лабораторном цикле.

В *Приложениях П1.1 и П1.2* приведены Паскаль-программа “Расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением”, а также описание учебно-методического комплекса по дисциплине “Электрические машины”, который разработан и размещён в Интернете автором учебного пособия (URL-адрес – <http://zabudsky.ru/index1.html>).

В *четвёртом, шестом – девятом разделах* приведены основы теории и устройства коллекторных машин постоянного тока и описана последовательность выполнения экспериментальных исследований процессов и явлений, а также обработки результатов: генераторов с различным возбуждением (*разд. 6*); двигателя параллельного возбуждения (*разд. 7*); двигателя последовательного возбуждения (*разд. 8*); электромашинного усилителя постоянного тока (*разд. 9*).

В *одиннадцатом, двенадцатом и тринадцатом разделах* приведены основы теории и устройства коллекторных машин переменного тока.

В *четырнадцатом* разделе изложены основы теории вентильного двигателя.

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 выпускаемой электротехнической продукции.

Автором разработаны и изготовлены стенды для экспериментального исследования машин постоянного тока. Их фотографии представлены на рис. В1, В2, В3 (с.15, 16); рис. 7.13, 7.14 (с. 164); рис. 9.4, 9.5 (с. 203). Реализован фронтальный метод проведения работ. Фотографии и описание стендов, разделы настоящего учебного пособия, разработанные мультимедийные материалы, а также электронный учебно-методический комплекс дисциплины “Электрические машины” размещены на web-сайте автора <http://zabudsky.ru>.



**Рис. В1. Общий вид базиса стенда “Генератор постоянного тока”:**  
под столешницей, в верхнем левом углу, расположен пусковой реостат





**Рис. В2. Стенд “Генератор постоянного тока” с исследуемым агрегатом:**  
слева от стенда расположены генератор и двигатель постоянного тока



**Рис. В3. Передняя (приборная) панель стенда “Генератор постоянного тока”**

## 1. Термины и определения

(выдержки из ГОСТ 27471–87 Машины электрические вращающиеся.  
Термины и определения)

Термин	Определение
<b>1.1. Машины постоянного тока</b>	
<b>1. Коллекторная машина</b> (24)*	Вращающаяся электрическая машина, у которой хотя бы одна из обмоток, участвующих в основном процессе преобразования энергии, соединена с коллектором (см. термин 17)
<b>2. Компенсированная коллекторная машина постоянного тока</b> (47)	Коллекторная машина постоянного тока с компенсационной обмоткой на статоре (см. термин 21)
<b>3. Униполярная машина</b> (49)	Одноимённополюсная бесколлекторная машина постоянного тока, якорь которой связан с внешними цепями скользящими контактами
<b>4. Вентильная машина</b> (50)	<i>Бесщёточная</i> машина постоянного тока, обмотка якоря которой связана с внешними цепями через <i>вентильное коммутационное устройство</i>
<b>5. Вентильный генератор постоянного тока</b> (52)	Электромашинный генератор постоянного тока, вентильное коммутационное устройство которого представляет собой <i>выпрямитель</i>
<b>6. Вентильный электродвигатель постоянного тока</b> (53)	Электродвигатель постоянного тока, вентильное коммутационное устройство которого представляет собой <i>инвертор</i> , управляемый либо по положению ротора, либо во фазе напряжения на обмотки якоря, либо по положению магнитного поля
<b>1.2. Основные детали и сборочные единицы вращающихся электрических машин</b>	
<b>7. Статор вращающейся электрической машины</b> (369)	Часть электрической машины, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой

Термин	Определение
<b>8. Ротор электрической машины (370)</b>	Вращающаяся часть электрической машины
<b>9. Якорь коллекторной машины постоянного тока (или синхронной машины) (371)</b>	Часть коллекторной машины постоянного тока (или синхронной машины), в которой индуцируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки
<b>10. Магнитная система вращающейся электрической машины (373)</b>	Совокупность элементов вращающейся электрической машины, предназначенных для проведения основного магнитного потока
<b>11. Основной воздушный зазор вращающейся электрической машины (374)</b>	Минимальное расстояние в <i>радиальном</i> направлении между неподвижной и движущейся частями магнитопровода вращающейся электрической машины
<b>12. Осевой воздушный зазор вращающейся электрической машины (375)</b>	Воздушный зазор вращающейся электрической машины, через который магнитный поток проходит в осевом направлении
<b>13. Полюс вращающейся электрической машины (376)</b>	Часть сердечника вращающейся электрической машины, на котором расположена обмотка возбуждения или выступающая в направлении воздушного зазора часть магнитопровода. <i>Примечание.</i> Полюс может быть также образован постоянным магнитом
<b>14. Паз вращающейся электрической машины (377)</b>	Углубление или полость вблизи поверхности магнитопровода статора или ротора вращающейся электрической машины, обращённые к основному воздушному зазору, предназначенные для размещения проводов обмотки
<b>15. Зубец вращающейся электрической машины (378)</b>	Часть магнитопровода между соседними пазами вращающейся электрической машины
<b>16. Контактное кольцо вращающейся электрической машины (379)</b>	Токопроводящее кольцо с расположенными на нём щётками, обеспечивающее протекание тока во вращающейся электрической машине из одной части цепи в другую при помощи скользящего контакта

Термин	Определение
<b>17. Коллектор вращающейся электрической машины</b> (380)	Комплект изолированных друг от друга токопроводящих пластин с расположенными на них щётками, обеспечивающий протекание тока во вращающейся электрической машине из одной части цепи в другую при помощи скользящего контакта
<b>18. Обмотка вращающейся электрической машины</b> (381)	Совокупность витков или катушек, образующих электрическую цепь или часть цепи во вращающейся электрической машине
<b>19. Печатная обмотка якоря вращающейся электрической машины</b> (383)	Обмотка якоря вращающейся электрической машины, витки которой выполнены путём нанесения электропроводящего материала на поверхность изолирующего материала
<b>20. Обмотка возбуждения вращающейся электрической машины</b> (384)	Обмотка вращающейся электрической машины, предназначенная для создания магнитного поля возбуждения
<b>21. Компенсационная обмотка вращающейся электрической машины</b> (385)	Обмотка вращающейся электрической машины, по которой протекает ток нагрузки или пропорциональный ему ток, расположенная таким образом, чтобы противодействовать искажению магнитного поля, вызываемому токами нагрузки, протекающими в других обмотках
<b>22. Успокоительная обмотка вращающейся электрической машины</b> (386)	Обмотка вращающейся электрической машины, обычно короткозамкнутая, предназначенная для успокоения быстрых изменений сцепленного с ней потока
<b>23. Обмотка добавочных полюсов вращающейся электрической машины</b> (387)	Обмотка вращающейся электрической машины, расположенная на добавочных полюсах, по которой протекает ток, равный или пропорциональный току нагрузки, и которая предназначена для создания коммутирующего поля

Термин	Определение
<b>1.3. Вращающиеся электрические машины, различающиеся областью применения, назначения или конструкцией</b>	
<b>24. Электромашинный возбудитель</b> (113)	Электромашинный генератор, предназначенный для питания обмотки возбуждения другой электрической машины
<b>25. Электромашинный подвозбудитель</b> (114)	Электромашинный генератор, предназначенный для питания обмотки возбуждения электромашинного возбудителя
<b>26. Зарядный генератор</b> (115)	Генератор постоянного или пульсирующего тока, предназначенный для зарядки аккумулятора
<b>27. Сварочный генератор</b> (116)	Электромашинный генератор, предназначенный для дуговой электросварки
<b>28. Электромашинный усилитель</b> (117)	Электромашинный генератор с электромагнитным возбуждением, у которого в широком диапазоне нагрузок выходная мощность пропорциональна мощности цепи обмотки независимого возбуждения, предназначенный для усиления электрических сигналов
<b>29. Электростартёр</b> (126)	Вращающийся электродвигатель, предназначенный для пуска двигателя внутреннего сгорания или газовой турбины
<b>30. Магнето</b> (129)	Электромашинный генератор импульсов высокого напряжения, предназначенный для зажигания горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания
<b>31. Автомобильный (тракторный) генератор</b> (130)	Электромашинный генератор, предназначенный для питания электрооборудования автомобиля ( <i>трактора</i> )
<b>1.4. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по способу возбуждения</b>	
<b>32. Машина с электромагнитным возбуждением</b> (13)	Вращающаяся электрическая машина с одной или несколькими обмотками возбуждения, питаемыми электрическим током
<b>33. Машина с независимым возбуждением</b> (14)	Машина с электромагнитным возбуждением, все обмотки возбуждения которой питаются от посторонних источников электрического тока

Термин	Определение
<b>34. Машина с самовозбуждением</b> (15)	Машина с электромагнитным возбуждением, обмотки возбуждения которой питаются током якоря или частью тока якоря
<b>35. Машина параллельного возбуждения</b> (16)	Машина с самовозбуждением, цепь обмотки возбуждения которой соединена с цепью якоря параллельно непосредственно или через преобразовательное устройство
<b>36. Машина последовательного возбуждения</b> (17)	Машина с самовозбуждением, обмотка возбуждения которой соединена с цепью якоря последовательно непосредственно или через преобразовательное устройство
<b>37. Машина смешанного возбуждения</b> (18)	Машина с самовозбуждением, имеющая по меньшей мере две обмотки возбуждения, одна из которых соединена с цепью якоря последовательно непосредственно или через преобразовательное устройство, а остальные – параллельно
<b>38. Машина смешанного возбуждения с согласным включением</b> (19)	Машина смешанного возбуждения, у которой магнитодвижущие силы обмоток, возбуждения имеют одинаковое направление
<b>39. Машина смешанного возбуждения с встречным включением</b> (20)	Машина смешанного возбуждения, у которой магнитодвижущие силы обмоток возбуждения направлены противоположно
<b>40. Машина с комбинированным электромагнитным возбуждением</b> (21)	Машина с электромагнитным возбуждением, имеющая несколько обмоток возбуждения, одна из которых питается от постороннего источника тока, а другие питаются током якоря или током вспомогательной обмотки самой машины
<b>41. Машина с постоянными магнитами</b> (22)	Вращающаяся электрическая машина, возбуждаемая постоянными магнитами
<b>42. Машина с комбинированным возбуждением</b> (23)	Вращающаяся электрическая машина, возбуждаемая постоянными магнитами с обмотками возбуждения, питаемыми электрическим током

Термин	Определение
<b>1.5. Режимы работы и процессы, связанные с изменением состояния машины</b>	
<b>43. Режим работы вращающейся электрической машины (267)</b>	Установленный порядок чередования и продолжительности нагрузки, холостого хода, торможения, короткого замыкания, пуска и реверса вращающейся электрической машины во время её работы
<b>44. Режим холостого хода электромашинного генератора (268)</b>	Режим работы электромашинного генератора при номинальной частоте вращения, номинальном напряжении, но без нагрузки
<b>45. Режим холостого хода вращающегося электродвигателя (269)</b>	Режим работы вращающегося электродвигателя при номинальном напряжении, но без нагрузки
<b>46. Режим короткого замыкания электромашинного генератора (270)</b>	Режим работы электромашинного генератора при замкнутых накоротко выводах обмотки якоря и номинальном постороннем возбуждении
<b>47. Режим короткого замыкания вращающегося электродвигателя (271)</b>	Режим работы вращающегося электродвигателя, подключенного к питающей сети при номинальном напряжении и при <i>неподвижном</i> роторе
<b>48. Динамическое торможение вращающегося электродвигателя (282)</b>	Электрическое торможение вращающегося электродвигателя, при котором энергия рассеивается в обмотках или в отдельном сопротивлении
<b>49. Рекуперативное торможение вращающегося электродвигателя (285)</b>	Электрическое торможение вращающегося электродвигателя, при котором энергия отдается в сеть
<b>50. Торможение противовключением вращающегося электродвигателя (287)</b>	Электрическое торможение вращающегося электродвигателя, осуществляемое путём переключения его обмоток в положение, соответствующее другому направлению вращения
<b>51. Прямой пуск вращающегося электродвигателя (299)</b>	Пуск вращающегося электродвигателя путём непосредственного подключения его к питающей сети

Термин	Определение
<b>52. Правое направление вращения вращающейся электрической машины</b> (313)	Направление вращения по часовой стрелке вращающейся электрической машины с односторонним приводом, определяемое со стороны присоединения её к первичному двигателю или рабочему механизму
<b>53. Реакция якоря вращающейся электрической машины</b> (314)	Воздействие магнитодвижущей силы обмотки якоря на магнитное поле вращающейся электрической машины, создаваемое обмоткой возбуждения или постоянными магнитами
<b>54. Продольная реакция якоря вращающейся электрической машины</b> (315)	Реакция якоря вращающейся электрической машины, образуемая составляющей магнитодвижущей силы обмотки якоря, создающей магнитный поток, направленный по продольной оси полюсов
<b>55. Поперечная реакция якоря вращающейся электрической машины</b> (316)	Реакция вращающейся электрической машины, образуемая составляющей магнитодвижущей силы обмотки якоря, создающей магнитный поток, направленный по поперечной оси полюсов
<b>56. Возбуждение вращающейся электрической машины</b> (317)	Создание магнитного потока во вращающейся электрической машине током в какой-либо из её обмоток или постоянными магнитами
<b>57. Коммутация коллекторной машины</b> (320)	Переключение секций обмотки якоря коллекторной машины из одной параллельной ветви в другую
<b>58. Прямолинейная коммутация коллекторной машины</b> (321)	Коммутация коллекторной машины, при которой ток в коммутирующей секции изменяется в функции времени линейно
<b>59. Ускоренная коммутация коллекторной машины</b> (322)	Коммутация коллекторной машины, при которой средняя скорость изменения тока в коммутирующей секции в первую половину периода коммутации <i>больше</i> чем во вторую



Термин	Определение
<b>60. Замедленная коммутация коллекторной машины</b> (323)	Коммутация коллекторной машины, при которой средняя скорость изменения тока в коммутируемой секции в первую половину периода коммутации <i>меньше</i> чем во вторую
<b>61. Круговой огонь по коллектору коллекторной машины</b> (324)	Дуговой разряд, возникающий по окружности коллектора коллекторной машины между щётками разной полярности
<b>62. Область безыскровой работы коллекторной машины постоянного тока</b> (325)	Диапазон изменения магнитодвижущей силы добавочных полюсов коллекторной машины постоянного тока, при котором коммутация является практически безыскровой в заданном диапазоне нагрузок и при фиксированном положении щёток
<b>63. Период коммутации коллекторной машины</b> (326)	Интервал времени, в течение которого секция обмотки якоря коллекторной машины замкнута щёткой и в ней происходит коммутация
<b>1.6. Характеристики вращающихся электрических машин</b>	
<b>64. Магнитная характеристика вращающейся электрической машины</b> $\Phi = f(I_B)$ (135)	Зависимость магнитного потока в воздушном зазоре вращающейся электрической машины от тока возбуждения
<b>65. Характеристика холостого хода электромашинного генератора</b> $E_a = f(I_B)$ (136)	Зависимость электродвижущей силы обмотки якоря вращающегося электромашинного генератора от тока возбуждения при разомкнутой обмотке якоря и при заданной частоте вращения
<b>66. Нормальная характеристика холостого хода электромашинного генератора</b> (137)	Усреднённая характеристика холостого хода электромашинного генератора, выраженная в относительных единицах
<b>67. Характеристика короткого замыкания электромашинного генератора</b> $I_a = f(I_B)$ (139)	Зависимость тока в короткозамкнутой обмотке якоря электромашинного генератора от тока возбуждения при заданной частоте вращения

Термин	Определение
<b>68. Внешняя характеристика электромашинного генератора</b> $U = f(I_a)$ (141)	Зависимость напряжения на обмотке якоря электромашинного генератора от тока нагрузки в заданных условиях при номинальной частоте вращения и неизменных внешних сопротивлений в цепях обмоток возбуждения
<b>69. Нагрузочная характеристика электромашинного генератора</b> $U = f(I_B)$ (142)	Зависимость напряжения на выводах цепи обмотки якоря электромашинного генератора от тока возбуждения при неизменных токах нагрузки и частоте вращения
<b>70. Регулировочная характеристика электромашинного генератора</b> $I_B = f(I_a)$ (143)	Зависимость тока в обмотке независимого возбуждения или тока в обмотке параллельного возбуждения от тока нагрузки при неизменном напряжении на выводах обмотки якоря и номинальной частоте вращения ротора электромашинного генератора
<b>71. Механическая характеристика электродвигателя</b> $M = f(n)$ (146)	Зависимость вращающего момента от частоты вращения ротора вращающегося электродвигателя при неизменном напряжении, частоте тока питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток двигателя
<b>72. Скоростная характеристика вращающегося электродвигателя</b> $n = f(I_a)$ (148)	Зависимость частоты вращения ротора вращающегося электродвигателя от потребляемого тока в заданных условиях
<b>73. Рабочие характеристики электромашинного генератора</b> $P_2, I_a, U, \eta = f(P_1)$ (147)	Зависимости генерируемой мощности, тока в обмотке якоря, напряжения на выводах обмотки якоря и коэффициента полезного действия электромашинного генератора от полезной мощности на валу при неизменных частоте вращения и токе возбуждения
<b>74. Рабочие характеристики вращающегося электродвигателя</b> $P_1, I_a, n, \eta = f(P_2)$ (149)	Зависимости подводимой мощности, тока в обмотке якоря, частоты вращения, коэффициента полезного действия электродвигателя от полезной мощности на валу при неизменном напряжении питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток

Термин	Определение
<b>75. Вольт-амперная характеристика щётчного контакта (152)</b>	Зависимость падения напряжения в скользящем электрическом контакте щётки от средней плотности тока в нём
<b>76. Потенциальная кривая по коллектору вращающейся электрической машины (153)</b>	Кривая распределения напряжения между соседними пластинами по коллектору вращающейся электрической машины
<b>1.7. Расчётные параметры вращающихся электрических машин</b>	
<b>77. Номинальные данные вращающейся электрической машины (163)</b>	Совокупность числовых значений электрических и механических параметров, обусловленных изготовителем и указанных на табличке, которым удовлетворяет вращающаяся электрическая машина в заданных условиях
<b>78. Линейная нагрузка вращающейся электрической машины (164)</b>	Отношение арифметической суммы действующих значений токов всех проводников обмотки якоря вращающейся электрической машины к длине окружности по поверхности якоря
<b>79. Магнитная индукция в рабочем зазоре вращающейся электрической машины (165)</b>	<i>Амплитуда основной гармонической</i> в кривой распределения магнитной индукции в рабочем зазоре в режиме холостого хода при номинальном напряжении вращающейся электрической машины
<b>80. Коэффициент насыщения магнитной цепи вращающейся электрической машины (166)</b>	Отношение суммы магнитных напряжений всех участков магнитной цепи вращающейся электрической машины к магнитному напряжению её воздушного зазора
<b>81. Критическое сопротивление цепи возбуждения (170)</b>	Максимальное сопротивление цепи параллельной обмотки возбуждения электромашинного генератора, при котором в данных условиях возможно самовозбуждение генератора
<b>82. Зона коммутации коллекторной машины (171)</b>	Часть окружности якоря коллекторной машины, через которую проходит осевая линия паза в течение времени, когда расположенные в этом пазу катушечные стороны замкнуты щётками накоротко

Термин	Определение
<b>83. Реактивная коммутационная ЭДС</b> $e_p = e_l + e_m$ коллекторной машины(172)	Электродвижущая сила, возникающая в коммутируемой секции коллекторной машины вследствие изменения тока в ней и токов в других одновременно коммутируемых секциях, имеющих индуктивную связь с ней
<b>84. Трансформаторная коммутационная ЭДС <math>e_{тр}</math> коллекторной машины</b> (173)	Электродвижущая сила, возникающая в коммутируемой секции коллекторной машины вследствие пульсации результирующего магнитного поля в зоне коммутации
<b>85. Коммутационная ЭДС вращения <math>e_{вр}</math> коллекторной машины</b> (174)	Электродвижущая сила, возникающая в коммутируемой секции коллекторной машины вследствие её относительного перемещения во внешнем магнитном поле
<b>86. Коммутирующее магнитное поле коллекторной машины</b> (175)	Магнитное поле, индуцирующее в коммутируемой секции коллекторной машины электродвижущую силу вращения $e_{вр}$ для компенсации реактивной коммутационной электродвижущей силы $e_p$
<b>87. Физическая нейтраль вращающейся электрической машины</b> (176)	Линия на поверхности якоря вращающейся электрической машины, вдоль которой радиальная составляющая магнитной индукции равна нулю. <i>Примечание.</i> Для машин постоянного тока положение промежутков между каждыми двумя пластинами коллектора, в которых напряжение между этими пластинами равно нулю
<b>88. Момент трогания вращающегося электродвигателя</b> (181)	Минимальный вращающий момент, который необходимо развить вращающемуся электродвигателю для перехода от состояния покоя к устойчивому вращению
<b>89. Тормозной момент вращающегося электродвигателя</b> (185)	Вращающий момент на валу вращающегося электродвигателя, действующий так, чтобы снизить частоту вращения двигателя
<b>90. Потери вращающейся электрической машины</b> (204)	Мощность, теряемая вращающейся электрической машиной в процессе преобразования энергии

Термин	Определение
<b>91. Основные потери вращающейся электрической машины (205)</b>	Потери вращающейся электрической машины, связанные с основными электромагнитными и механическими процессами, представляющие собой сумму потерь в обмотках, определяемых сопротивлением обмоток постоянному току, электрических потерь в скользящих контактах, потерь от основного магнитного потока в магнитопроводе и механических потерь
<b>92. Добавочные потери вращающейся электрической машины (206)</b>	Потери вращающейся электрической машины, возникающие в результате наличия высших гармонических в кривых намагничивающей силы обмоток, потока рассеяния обмоток, пульсации магнитного потока в воздушном зазоре, вытеснения тока в проводниках и других неосновных электромагнитных процессов
<b>93. Постоянные потери вращающейся электрической машины (207)</b>	Потери вращающейся электрической машины, практически не зависящие от нагрузки, если напряжение и частота вращения при этом остаются неизменны
<b>94. Основные электрические потери вращающейся электрической машины (208)</b>	Потери в обмотках вращающейся электрической машины, определяемые как произведение сопротивления постоянному току на квадрат тока в обмотке, и электрические потери в скользящих контактах
<b>95. Основные магнитные потери вращающейся электрической машины (209)</b>	Потери от гистерезиса и вихревых потоков, возникающие в ферромагнитных участках магнитной цепи во вращающейся электрической машине при их перемагничивании основным магнитным потоком
<b>96. Механические потери вращающейся электрической машины (210)</b>	Потери вращающейся электрической машины, возникающие в результате трения в подшипниках, трения щеток о коллектор или контактные кольца, трения вращающихся частей о воздух, вентиляционные и другие потери на трение

Термин	Определение
<b>1.8. Электромашинные преобразователи</b>	
<b>97. Одноякорный преобразователь (82)</b>	Вращающаяся электрическая машина с неподвижным индуктором и вращающимся якорем, обмотка которого подключена к коллектору и контактными кольцам, предназначенная для преобразования переменного тока в постоянный или постоянного в переменный
<b>98. Электромашинный преобразователь постоянного напряжения (83)</b>	Коллекторная машина постоянного тока с двумя или несколькими обмотками на якоре, соединёнными с разными коллекторами, предназначенная для изменения значения напряжения постоянного тока
<b>1.9. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по характеру изменения частоты вращения</b>	
<b>99. Управляемый вращающийся электродвигатель (34)</b>	Вращающийся электродвигатель с малым динамическим моментом инерции ротора, частота вращения или положения ротора которого определяется параметрами сигнала управления
<b>100. Исполнительный электродвигатель (41)</b>	Вращающийся электродвигатель для высоко динамичного режима работы
<b>101. Вращающаяся машина постоянного тока (43)</b>	Вращающаяся электрическая машина, основной процесс преобразования энергии в которой обусловлен потреблением или генерированием только постоянного электрического тока
<b>102. Универсальный электродвигатель (46)</b>	Вращающийся электродвигатель, который может работать при питании от сети как постоянного, так и однофазного переменного тока
<b>1.10. Информационные электрические машины</b>	
<b>103. Информационная электрическая машина (8)</b>	Вращающаяся электрическая машина, предназначенная для выработки электрических сигналов, характеризующих частоту вращения ротора или его угловое положение, или для преобразования электрического сигнала в соответствующее ему угловое положение ротора

Термин	Определение
<b>104. Тахогенератор</b> (89)	Информационная электрическая машина, предназначенная для выработки электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения ротора
<b>105. Синхронный тахогенератор</b> (90)	Информационная электрическая машина, представляющая собой синхронный генератор с постоянными магнитами или независимого возбуждения, частота и амплитуда выходного напряжения которого пропорциональны частоте вращения ротора
<b>106. Асинхронный тахогенератор</b> (91)	Двухфазная асинхронная машина с полым ротором, возбуждаемая однофазным напряжением, амплитуда выходного напряжения которой пропорциональна частоте вращения ротора
<b>107. Тахогенератор постоянного тока</b> (92)	Маломощный генератор постоянного тока, выходное напряжение которого пропорционально частоте вращения ротора

---

\* В скобках указаны номера согласно ГОСТ 27471–87 Машины электрические вращающиеся. Термины и определения

## 2. Буквенные и графические обозначения элементов в электрических схемах

### 2.1. Буквенные обозначения элементов в схемах


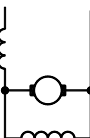
(выдержки из ГОСТ 2.710–81 Обозначения буквенные цифровые в электрических схемах)

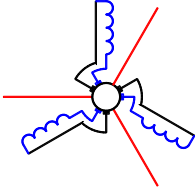

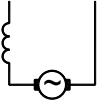
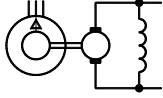
Код элемента	Виды элементов
<b>M</b>	Двигатели
<b>G</b>	Генераторы
<b>GC</b>	Синхронный компенсатор
<b>GE</b>	Возбудитель генератора
<b>LG</b>	Обмотка возбуждения генератора
<b>LM</b>	Обмотка возбуждения электродвигателя
<b>LE</b>	Обмотка возбуждения возбудителя
<b>LR</b>	Реактор
<b>RR</b>	Реостат
<b>PA</b>	Амперметр
<b>PV</b>	Вольтметр
<b>PW</b>	Ваттметр
<b>PF</b>	Частотомер
<b>PS</b>	Регистрирующий прибор
<b>TA</b>	Трансформатор тока
<b>QF</b>	Выключатель автоматический в силовых цепях
<b>QS</b>	Разъединитель
<b>SA</b>	Переключатель
<b>SBC</b>	Выключатель кнопочный на включение
<b>HL</b>	Прибор световой сигнализации



## 2.2. Графические обозначения элементов электрических машин

(выдержки из ГОСТ 2.722–68 Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические)

Наименование	Обозначение
1. Обмотка добавочных полюсов, обмотка компенсационная (1) *	
2. Обмотка статора (каждой фазы) машины переменного тока, обмотка последовательного возбуждения машины постоянного тока (2)	
3. Обмотка параллельного возбуждения машины постоянного тока, обмотка независимого возбуждения (3)	
4. Ротор. Общее обозначение (6)	
5. Ротор с обмоткой, коллектором и щётками (12)	
6. Машина постоянного тока с независимым возбуждением (23)	
7. Машина постоянного тока с последовательным возбуждением (24)	
8. Машина постоянного тока с параллельным возбуждением (25)	
9. Машина постоянного тока со смешанным возбуждением (26)	
10. Машина постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (30)	
11. Усилитель электромашинный с поперечным потоком и несколькими обмотками управления (например, простейший с тремя обмотками) (31)	
12. Двигатель коллекторный трёхфазный последовательного возбуждения с регулированием скорости вращения передвижением щеток (33)	

<p><b>13.</b> Двигатель коллекторный трёхфазный параллельного возбуждения с питанием в ротор с регулированием скорости вращения передвижением щеток (двигатель Шраге-Рихтера) (34)</p>	
<p><b>14.</b> Двигатель коллекторный однофазный репульсионный (35)</p>	
<p><b>15.</b> Двигатель коллекторный однофазный последовательного возбуждения (36)</p>	
<p><b>16.</b> Агрегат, состоящий из асинхронного трёхфазного двигателя с короткозамкнутым ротором и генератора постоянного тока с параллельным возбуждением; обмотка статора двигателя соединена в треугольник (40)</p>	

\* В скобках указаны номера согласно ГОСТ 2.722–68 Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические

### 3. Обозначение выводов обмоток электрических машин, разработанных после 1.01.1987 г.

(выдержки из ГОСТ 26772–85 Машины электрические вращающиеся.  
Обозначение выводов и направления вращения)

#### 3.1. Обозначения выводов

##### 3.1.1. Обмотки электрических машин *постоянного* тока

Выводы обмоток электрических машин постоянного тока следует обозначать в соответствии с табл. 3.1.

Таблица 3.1. Обозначение выводов обмоток машин *постоянного* тока

Наименование обмотки	Обозначение вывода	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	A1	A2
Обмотка добавочного полюса	B1	B2
Двухсекционная обмотка добавочного полюса (присоединённая к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	1B1 2B1	1B2 2B2
Обмотка компенсационная	C1	C2
Обмотка компенсационная, двухсекционная (присоединённая к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	1C1 2C1	1C2 2C2
Обмотка последовательного возбуждения	D1	D2
Обмотка параллельного возбуждения	E1	E2
Обмотка независимого возбуждения	F1	F2

### 3.1.2. Обмотки трёхфазных машин *переменного* тока

Выводы первичных обмоток трёхфазных машин следует обозначать в соответствии с табл. 3.2.

Таблица 3.2. Обозначение выводов обмотки *статора*

Схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Открытая схема	6	Первая фаза	U1	U2
		Вторая фаза	V1	V2
		Третья фаза	W1	W2
Соединение в звезду	3	Первая фаза	U	
	или	Вторая фаза	V	
	4	Третья фаза	W	
		Точка звезды	N	
Соединение в треугольник	3	Первый вывод	U	
		Второй вывод	V	
		Третий вывод	W	

Выводы вторичных обмоток трёхфазных асинхронных двигателей с фазным ротором и обмоток возбуждения синхронных машин следует обозначать в соответствии с табл. 3.3.

Таблица 3.3. Обозначение выводов обмотки *ротора*

Наименование или схема соединения	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Вторичная обмотка (открытая схема)	6	Первая фаза	K1	K2
		Вторая фаза	L1	L2
		Третья фаза	M1	M2

Продолжение табл. 3.3

Наименование или схема соединения	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза	K	
		Вторая фаза	L	
		Третья фаза	M	
		Точка звезды	Q	
Соединение в треугольник	3	Первый вывод	K	
		Второй вывод	L	
		Третий вывод	M	
Обмотка возбуждения синхронных машин	2	–	F1	F2

### 3.2. Определение направления вращения

Правым направлением следует считать вращение по направлению вращения часовой стрелки.

Если машина имеет только один конец вала (или два конца разных диаметров), то направление вращения рассматривают со стороны единственного конца вала (или со стороны конца вала наибольшего диаметра).

### 3.3. Связь между обозначением выводов и направлением вращения

Для бесколлекторных трёхфазных машин переменного тока направление вращения будет правым, если алфавитная последовательность обозначения выводов группы фаз будет соответствовать временной последовательности напряжения на зажимах.

## Часть первая. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 4. Устройство и принцип действия машин постоянного тока

#### 4.1. Закон электромагнитной индукции; электромагнитная сила

Работа электрической машины базируется на законе электромагнитной индукции Майкла Фарадея и на законе Андре-Мари Ампера.

По закону электромагнитной индукции величина ЭДС, наведенной в замкнутом контуре, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур. Различают электродвижущую силу вращения (*ЭДС вращения*) и трансформаторную электродвижущую силу (*трансформаторная ЭДС*).

Электродвижущая сила, индуцируемая магнитным полем вследствие перемещения проводника обмотки якоря называется *ЭДС вращения*. Электродвижущую силу, индуцируемую в неподвижном витке магнитным полем, *изменяющимся во времени* называют *трансформаторной ЭДС*. Понятие “*ЭДС вращения*” используется в теории электрических машин. Понятие “*трансформаторная ЭДС*” – преимущественно в теории трансформаторов.

Формулу для определения трансформаторной ЭДС предложил Джеймс Клерк Максвелл

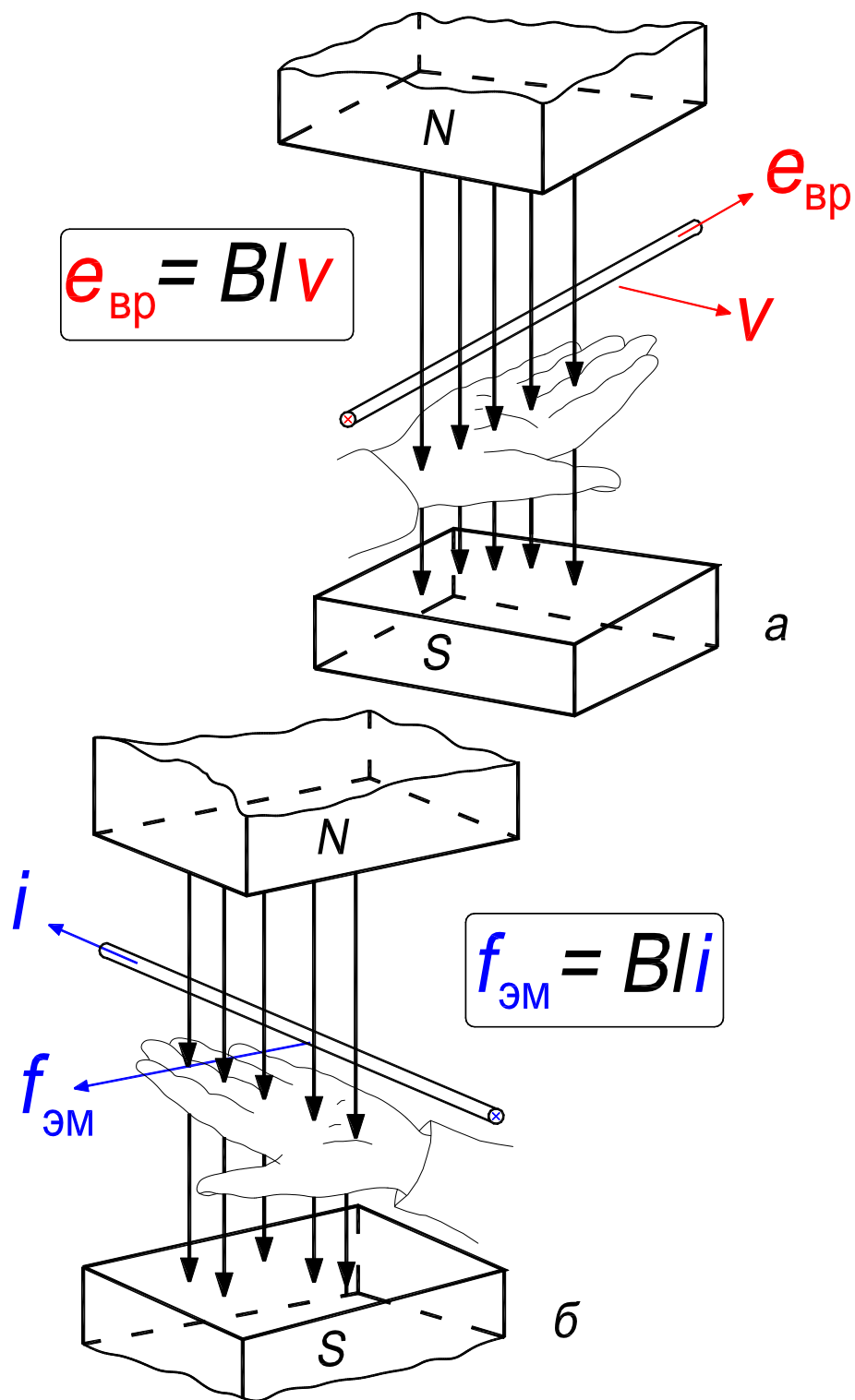
$$e_{\text{тр}} = -d\Phi/dt, \quad (4.1)$$

где  $\Phi$  – неподвижный в пространстве, но изменяющийся во времени магнитный поток, созданный переменным током, протекающим в обмотке трансформатора. Знак “–” отражает правило Э.Х. Ленца, которое гласит, что индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать вызвавшей его первопричине.

Формулу для определения ЭДС вращения предложил Майкл Фарадей

$$e_{\text{вр}} = Blv, \quad (4.2)$$

где  $B$  – постоянная магнитная индукция,  $l$  – длина проводника, перемещающегося в магнитном поле со скоростью  $v$  (формула записана в предположении, что направление перемещения проводника перпендикулярно направлению силовых линий магнитного поля, см. рис. 4.1,*a*).



**Рис. 4.1.** К иллюстрации правил:с  
*a* – правой руки (определение направления ЭДС вращения  $e_{\text{вр}}$ );  
*б* – левой руки (определение направления электромагнитной силы  $f_{\text{эм}}$ )

Направление наведенной в проводнике ЭДС вращения 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  $90^\circ$ , располагают *в направлении движения проводника*; тогда остальные пальцы руки, вытянутые в плоскости ладони, покажут направление наведенной в проводнике ЭДС.

Применяя правило правой руки к проводнику на рис. 4.1,*а*, можно установить, что ЭДС направлена за плоскость чертежа. Такое направление ЭДС и соответственно тока принято обозначать в сечении проводника знаком креста “ $\times$ ”, а их противоположное направление – знаком точки “ $\bullet$ ”.

Вокруг проводника с током возникает магнитное поле, направление которого определяется *правилом Максвелла (правилом буравчика)*. Если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление движения рукоятки укажет направление магнитных линий.

На рис. 4.2,*а* представлено совмещение магнитного поля двух полюсов и магнитного поля проводника с током, а на рис. 4.2,*б* – картина результирующего поля. В результате искажения магнитного поля появляется электромагнитная сила  $f_{\text{эм}}$ , которая стремится переместить проводник. Электромагнитная сила обусловлена стремлением силовых магнитных линий замыкаться по пути с минимальным магнитным сопротивлением, то есть по кратчайшему пути.

Если в магнитном поле с индукцией  $B$  находится проводник длиной  $l$ , перпендикулярный линиям поля, по которому протекает ток  $i$ , то величина электромагнитной силы согласно закону Андре-Мари Ампера записывается в виде

$$f_{\text{эм}} = Bli. \quad (4.3)$$

Направление действия электромагнитной силы определяется *по правилу левой руки* (рис. 4.1,*б*), 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, располагают в направлении тока; тогда большой палец, отогнутый в плоскости ладони на  $90^\circ$ , покажет направление электромагнитной силы.

В электродвигателе электромагнитные силы создают вращающий электромагнитный момент. В генераторе электромагнитный момент действует навстречу вращающему моменту приводного двигателя (см. разд. 4.8, с. 64).



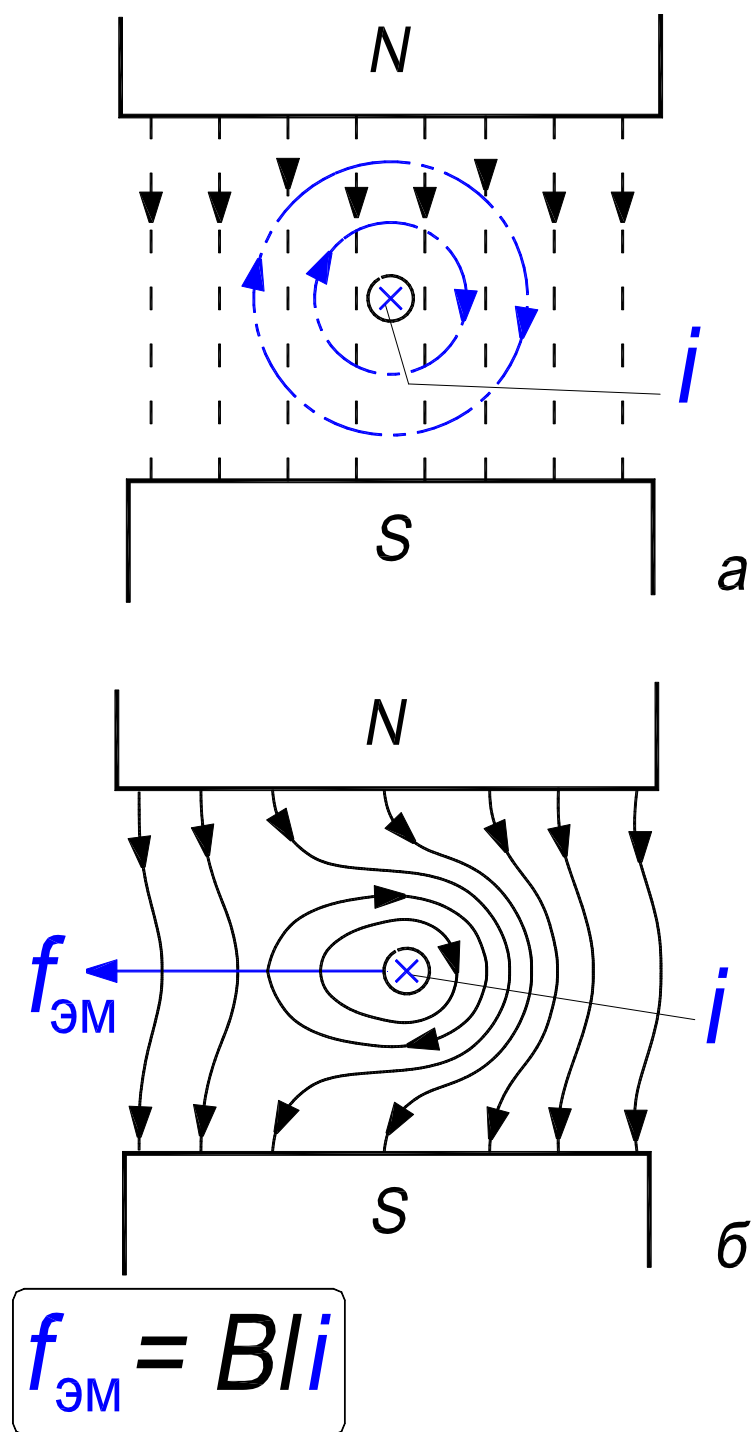


Рис. 4.2. Картина распределения магнитного поля двух полюсов и проводника с током:

*a* – поля совмещены;

*б* – результирующее поле, возникновение **электромагнитной силы**  $f_{эм}$

## 4.2. Принцип действия простейшего генератора постоянного тока.

### Коллектор – механический выпрямитель ЭДС и тока обмотки якоря

Простейший генератор *переменного тока* имеет следующие компоненты: два неподвижных полюса, один виток, концы которого подсоединены к двум контактными кольцам (термин 16, с. 18), которые изолированы друг от друга и от вала. На кольца наложены неподвижные щётки, к которым подсоединяется нагрузка (рис. 4.3, лист 1).

При вращении витка в пространстве между двумя полюсами с частотой  $n$  в витке индуцируется переменная ЭДС. Как следует из формулы (4.2), при  $n = \text{const}$ , изменение ЭДС *во времени* повторяет распределение магнитного поля под полюсом, то есть *в пространстве* (см. рис. 4.12, с. 60). При наличии нагрузки и в витке и в нагрузке протекает переменный ток. Частота ЭДС и тока в общем случае определяется из формулы

$$f = p \cdot n / 60, \text{ Гц}, \quad (4.4)$$

где  $p$  – число пар полюсов магнитного поля;  $n$  – частота вращения витка (обмотки якоря), измеряемая в об/мин.

Для выпрямления переменного тока, *протекающего в нагрузке* (то есть для реализации генератора постоянного тока), на валу вместо контактных колец устанавливается коллектор (термин 17, с. 19), который является *механическим выпрямителем* переменных ЭДС и тока обмотки якоря. В простейшем случае коллектор состоит из двух коллекторных пластин, которые изолированы друг от друга и от вала. Коллекторные пластины образуют цилиндр. К пластинам подсоединены концы витка якоря. На пластины наложены неподвижные щётки к которым подсоединена нагрузка (рис. 4.3, лист 2). При вращении витка (якоря) щётки скользят по поверхности цилиндра.

Для полного выпрямления переменного тока, протекающего в нагрузке, необходимо щётки установить так, чтобы наводимая в витке переменная ЭДС была равна нулю в момент перехода щётки с одной пластины на другую (в этот момент виток занимает горизонтальное положение). Тогда при вращении якоря в витке будет по-прежнему наводиться переменная ЭДС, но *каждая из щёток* будет соприкасаться *только с той* коллекторной пластиной и соответственно будет соединена *только с тем* проводником, которые находятся под полюсом *данной* (одной и той же) *полярности*. В нагрузке при этом ток будет протекать только в одном направлении от щётки  $B$  к щётке  $A$  (рис. 4.3, лист 2); другими словами происходит выпрямление *переменных ЭДС и тока витка в пульсирующие ЭДС и ток в нагрузке*.

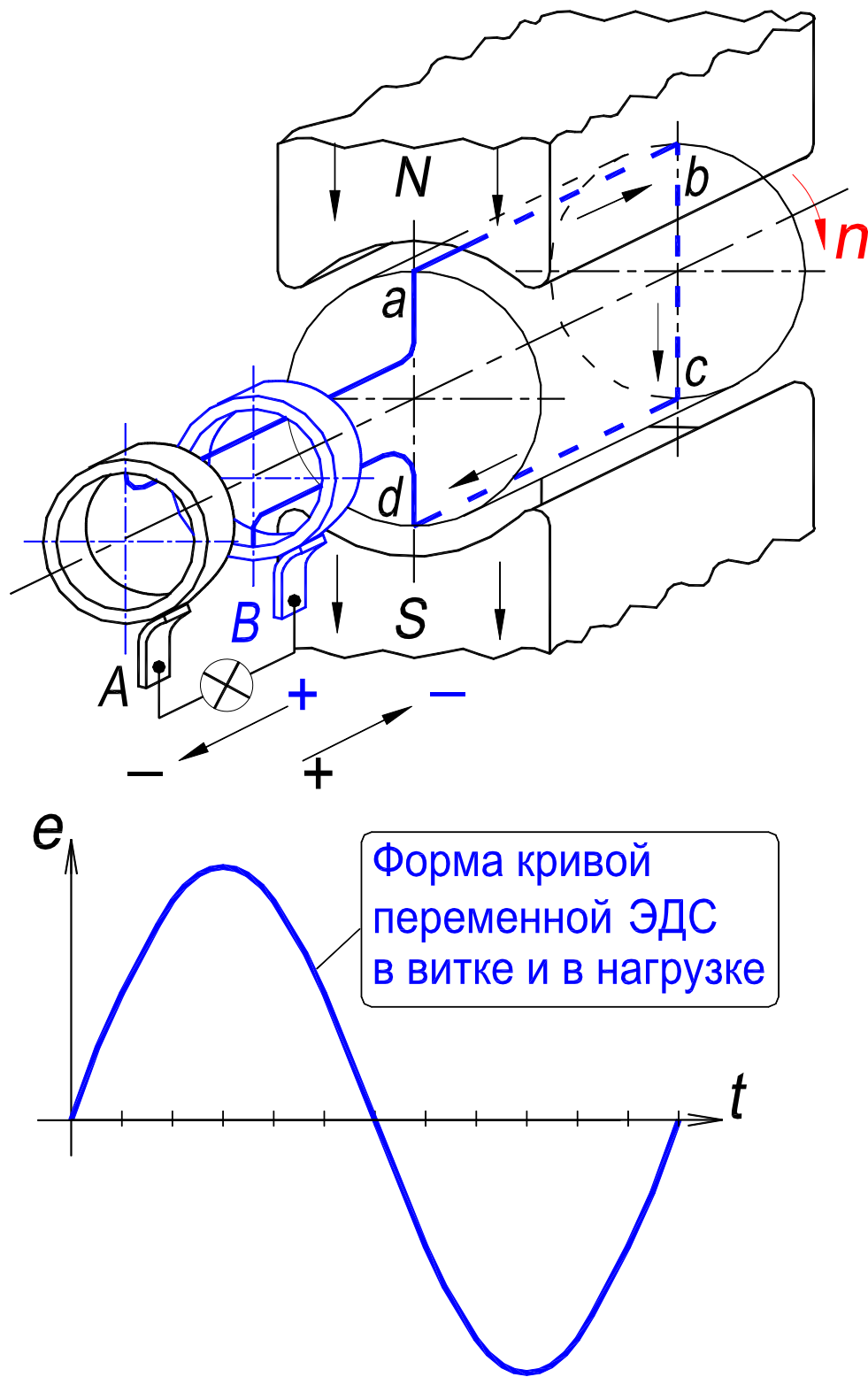


Рис. 4.3, лист 1. Принцип действия простейшего генератора переменного тока

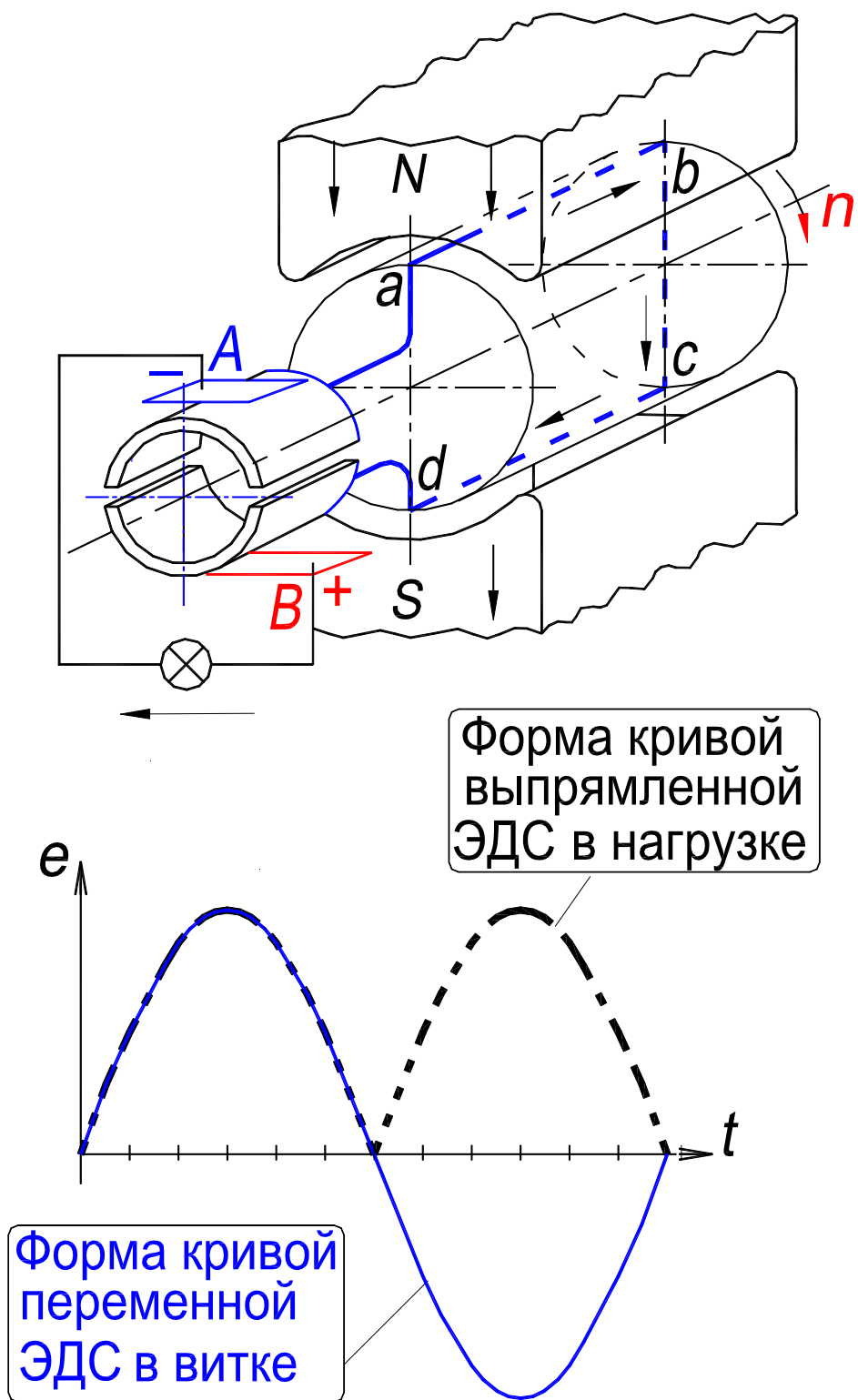
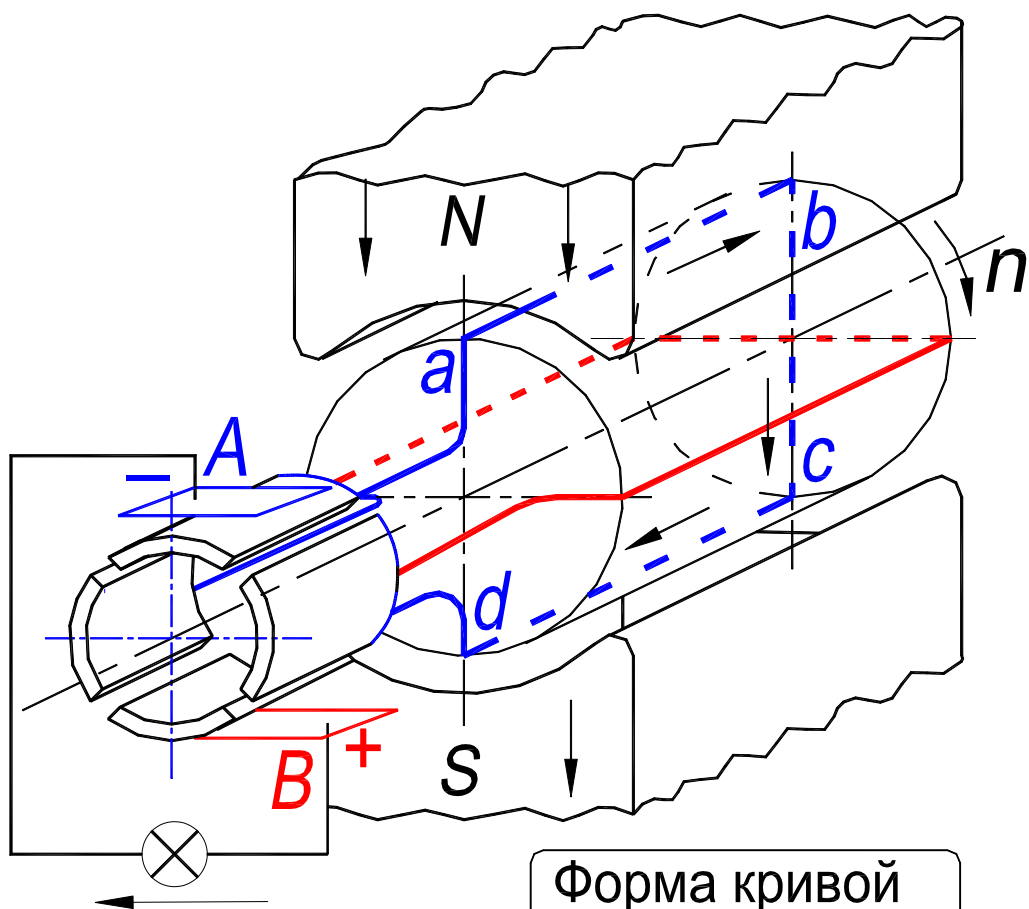


Рис. 4.3, лист 2. Принцип действия простейшего генератора постоянного тока  
(на якоре один виток)



Форма кривой  
выпрямленной  
ЭДС в нагрузке

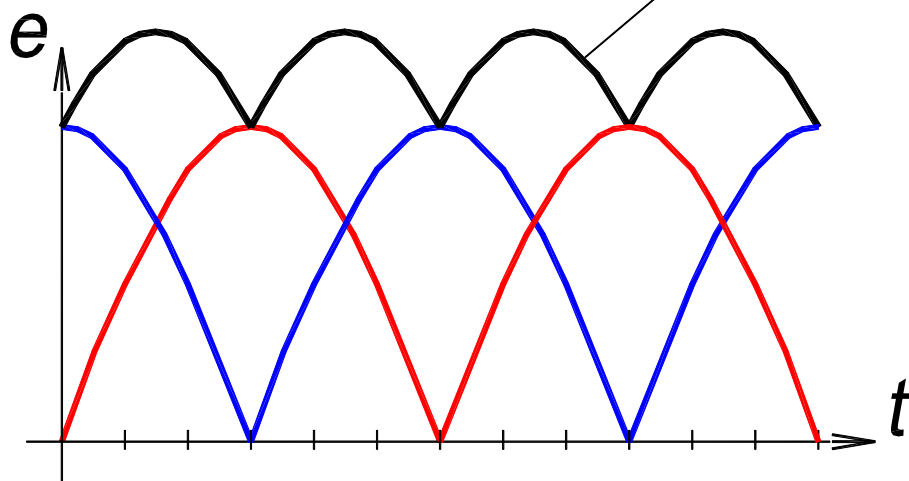


Рис. 4.3, лист 3. Принцип действия простейшего генератора постоянного тока  
(на якоре два витка)

Для сглаживания пульсаций необходимо разместить на якоре несколько витков равномерно распределенных по окружности и соответственно увеличить число коллекторных пластин. На рис. 4.3, лист 3 показано два витка на якоре, смещенных на  $90^\circ$ , и коллектор, имеющий четыре пластины,  $K = 4$ . Очевидно, что форма изменения ЭДС и тока в нагрузке в этом случае будет соответствовать огибающей (изображена утолщенной линией), а их пульсации будут меньше. Можно показать, что уже при отношении  $K/2p = 8$  пульсации будут практически незаметны.

Таким образом, на рис. 4.3, листы 2 и 3 представлен простейший генератор постоянного тока. В генераторе постоянного тока *за счет наличия коллектора* в нагрузке действуют постоянные по величине и направлению ЭДС и ток, вместе с тем в обмотке якоря индуцируется переменная ЭДС и протекает переменный ток изменяющиеся с частотой  $f$  (формула 4.4)

### **4.3. Устройство генератора постоянного тока \***

Генератор постоянного тока состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – ротора (он называется якорем)/термин 9, с. 18/. На рис. 4.4, листы 1 и 2 представлены поперечный и продольный виды машин постоянного тока [11].

На валу  $1$  ротора укрепляется сердечник якоря  $2$ , набираемый из пластин электротехнической стали. В пазы якоря укладывается обмотка якоря  $3$  (ОЯ), которая соединяется с коллектором  $4$  (см. также рис. 4.4, лист 2, в и 4.5).

Статор состоит из массивной (*не шихтованной*) стальной или чугунной станины  $5$ , по которой замыкается *постоянный* магнитный поток. На станине укреплены главные полюсы  $6$  и добавочные полюсы  $7$ . На главных полюсах размещаются катушки обмотки возбуждения  $8$  (ОВ) (термин 20, с. 19), создающие основной магнитный поток (поле возбуждения). На добавочных полюсах располагаются катушки обмотки добавочных полюсов  $9$  (ОДП) (термин 23, с. 19). Добавочные полюсы предназначены для уменьшения искрения под щётками, то есть для улучшения коммутации. Сердечники главных и добавочных полюсов выполняются или массивными или набираются из листовой стали. Сердечники главных полюсов имеют полюсные наконечники  $10$  (рис. 4.4, лист 1). Путем выбора формы последних регулируется распределение магнитного поля возбуждения в воздушном зазоре вдоль полюсного деления  $\tau$ . В генераторе постоянного тока магнитное поле возбуждения распределяется вдоль полюсного деления по трапецеидальному закону (рис. 4.12, с. 60).

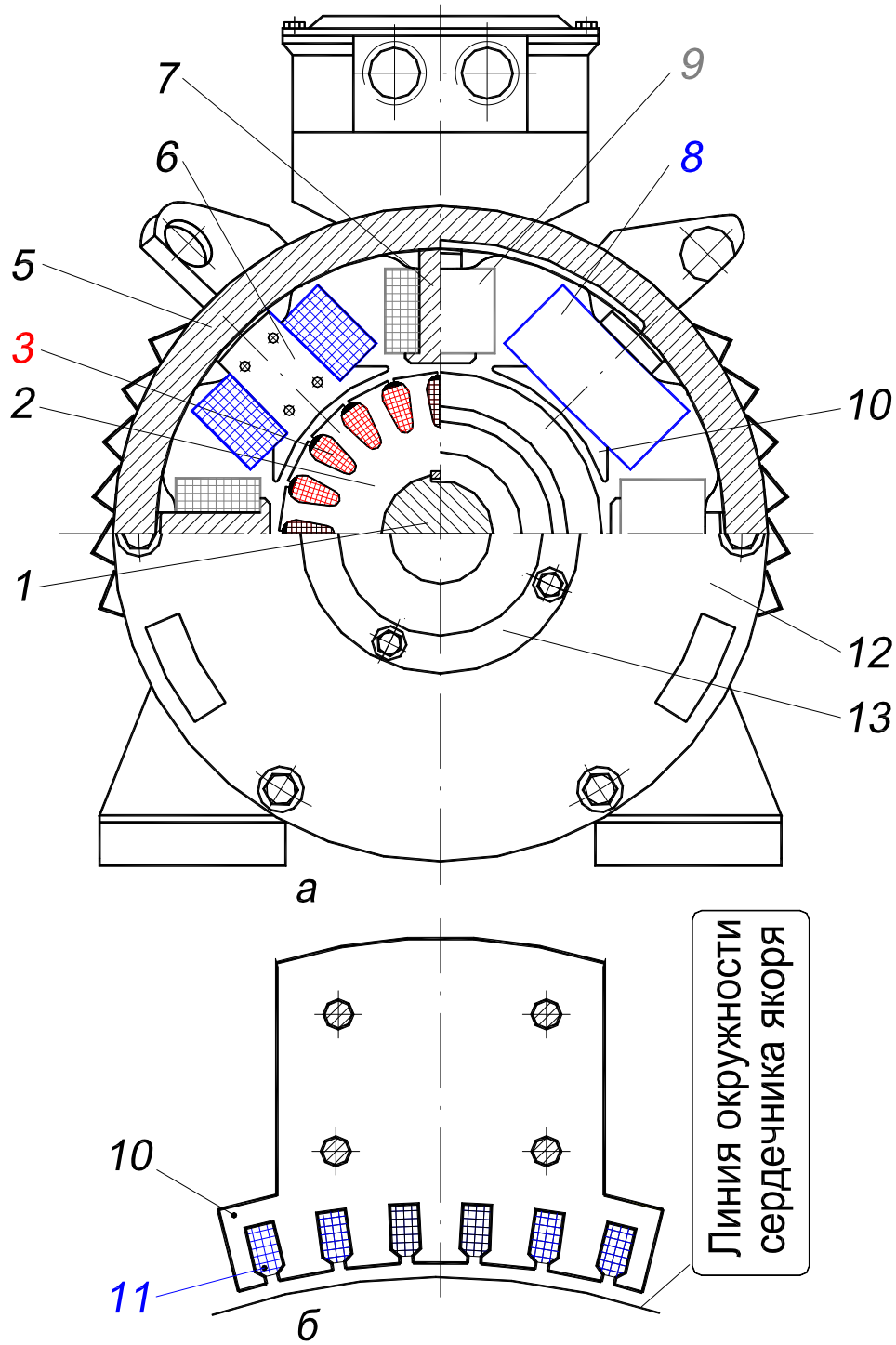
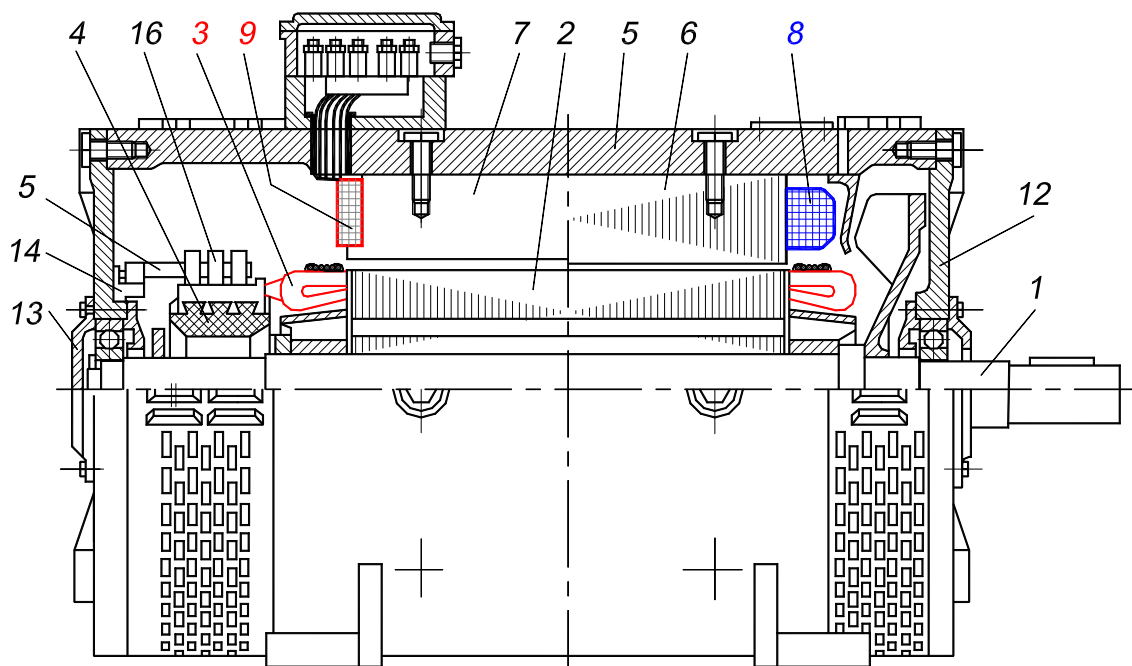


Рис. 4.4, лист 1. Поперечный вид:

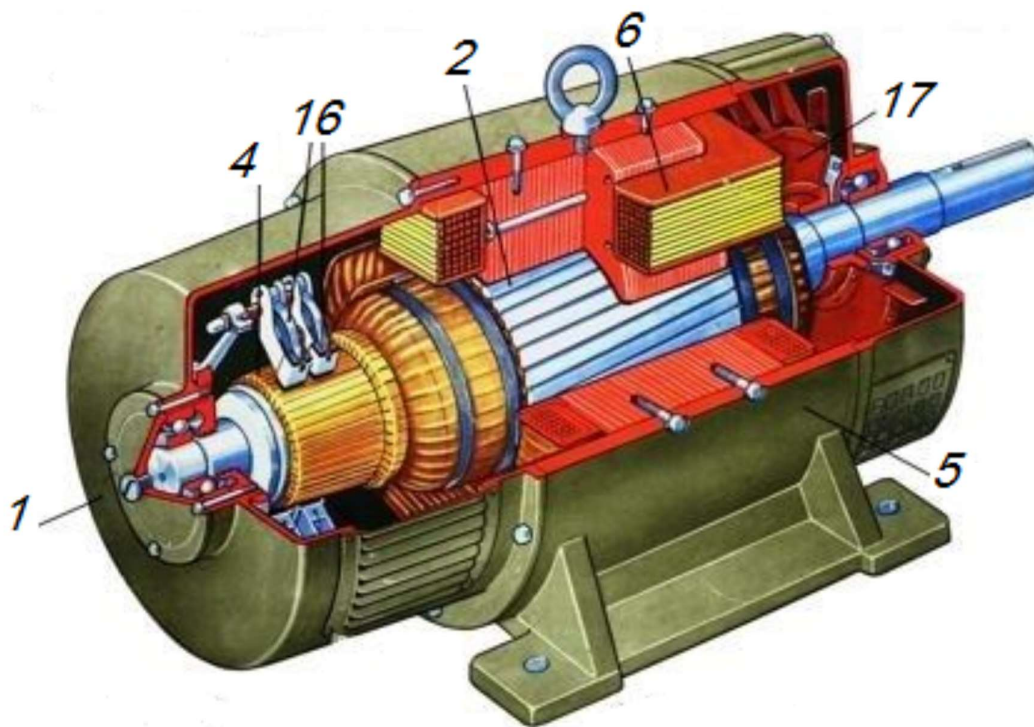
*a* – машины постоянного тока; *б* – сердечника главного полюса

\* см. Забудский Е.И. [Мультимедиа-иллюстрация](#). Конструкция и технология сборки электрических машин. Часть 4. Машины постоянного тока [11]

URL- адрес: [http://zabudsky.ru/Prezent\\_MPT/!MPT\\_Prezent.ppt](http://zabudsky.ru/Prezent_MPT/!MPT_Prezent.ppt)



**a**



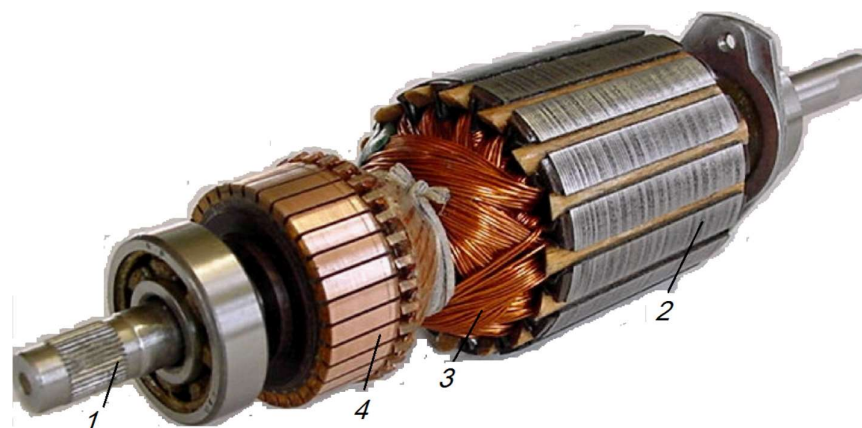
**б**

**Рис. 4.4, лист 2. Продольный вид:**

*a* – машины постоянного тока; *б* – аксонометрическая проекция



В машинах мощностью 100 кВт и выше в полюсных наконечниках могут быть выполнены пазы, в которые укладывается компенсационная обмотка *II* (КО, термин 21, с. 19). Эта обмотка соединяется с обмоткой якоря последовательно и встречно. Компенсационная обмотка предназначена для уменьшения влияния МДС обмотки якоря на магнитное поле обмотки возбуждения.



**в**

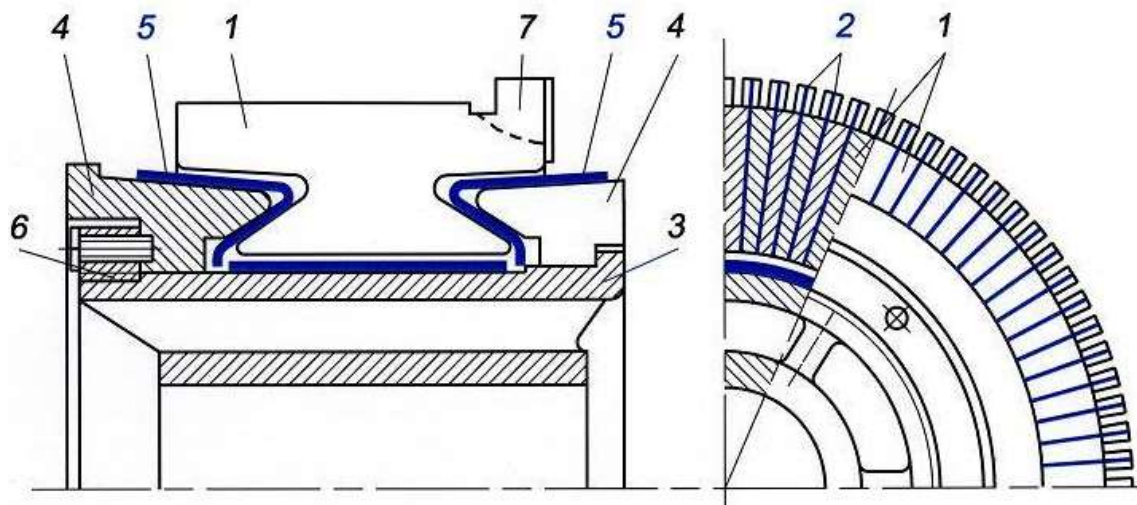
Рис. 4.4, лист 2. Продольный вид: *в* – якорь

Якорь машины (рис. 4.4, лист 2, *а*, *б*, *в*) соединяют со статором подшипниковые щиты *12*, в которых находятся подшипники, закрепленные крышками *13*. К одному из подшипниковых щитов крепится траверса *14*, на которой расположены щеточные пальцы *15* со щёткодержателями *16* (см. рис. 4.6 и 4.7). На щеточном пальце укрепляются щёткодержатели со щётками только одной полярности. Все щеточные пальцы одной полярности соединяют между собой сборными шинами. Шины подсоединяются к выводам машины.

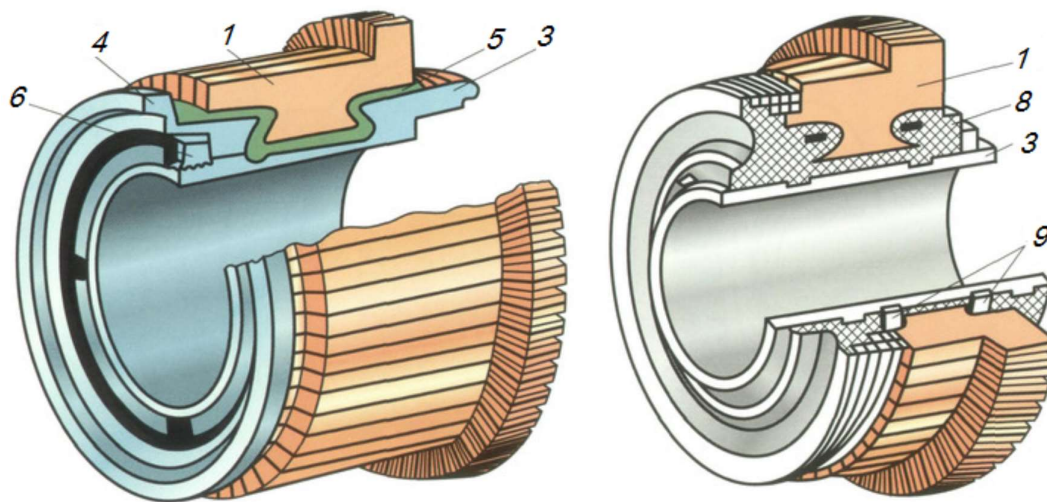
Коллектор (рис. 4.5) набирают из медных пластин *1*, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками *2*. Для изоляции пластин от корпуса *3* на нажимные фланцы *4* надевают прессованные миканитовые манжеты *5*. Нажимные фланцы стягивают кольцевой гайкой *6*. Секции обмотки, припаивают к петушкам *7* (см. на рис. 4.4, лист 2, *а* позиции 3 и 4). Коллектор подвергают термообработке таким образом, что он образует монолитную конструкцию, исключая биения и вибрации.

По внешней поверхности коллектора скользят щётки, расположенные в щёткодержателях (рис. 4.6), которые за счет пружины *3* обеспечивают определенное нажатие щётки на коллектор и надежный контакт щётки с коллектором при всех режимах работы машины [11].

Щётки для электрических машин прессуют из угольных и графитных порошков. Электрические свойства щеток и их размеры стандартизованы [16].



а



б

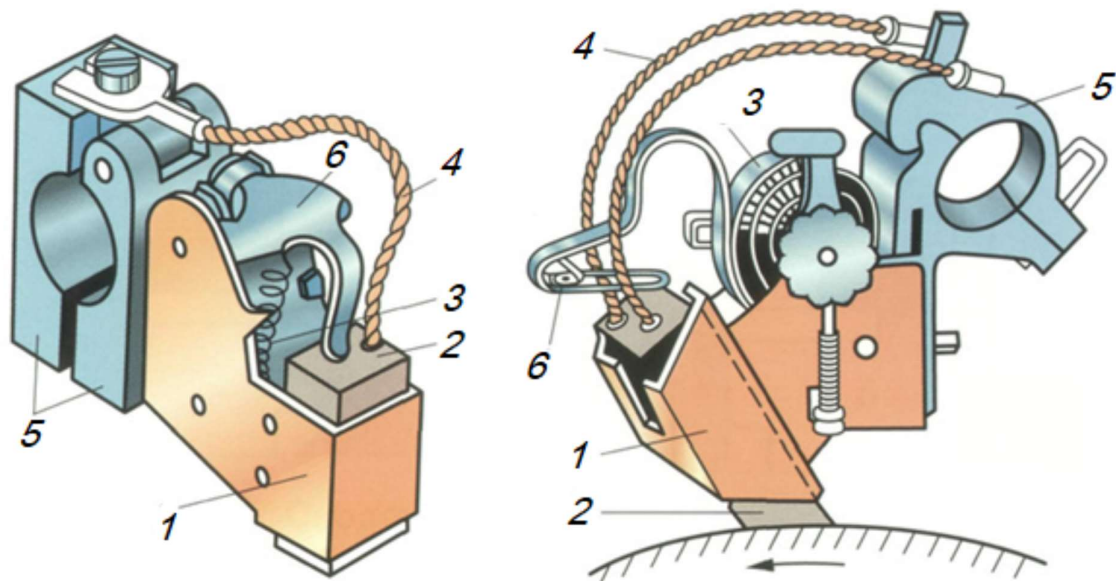
в

**Рис. 4.5. Коллектор машин постоянного тока:**

а – общий вид; б – разборный; в – неразборный, на пластмассе

На рис. 4.6 показаны щёткодержатели с вставленной щёткой 2. На рис. 4.7 приведена щеточная траверса машины постоянного тока, которая крепится на подшипниковом щите. Траверса имеет щеточные пальцы 3, количество которых равно числу полюсов машины. Пальцы представляют собой цилиндрические или призматические стержни. Второе исполнение (оно показано на рис. 4.7) проще в производстве и лучше фиксирует положение щеток. Призматические пальцы выполняют из гетинакса или текстолита (см. позицию 3) либо из полосы стали, опрессованной в месте крепления к траверсе (позиция 4). В траверсе предусмотрена прорезь, стягиваемая стяжным винтом 1. Его назначение – осуществить затяг траверсы на её опорной поверхности. Материалом для траверс обычно служит серый чугун. Траверса при отпущенном винте 1 должна свободно проворачиваться

по окружности с целью установки щеток на геометрическую нейтраль при сборке и наладке машины. Для фиксации траверсы служит стопорный винт 2.

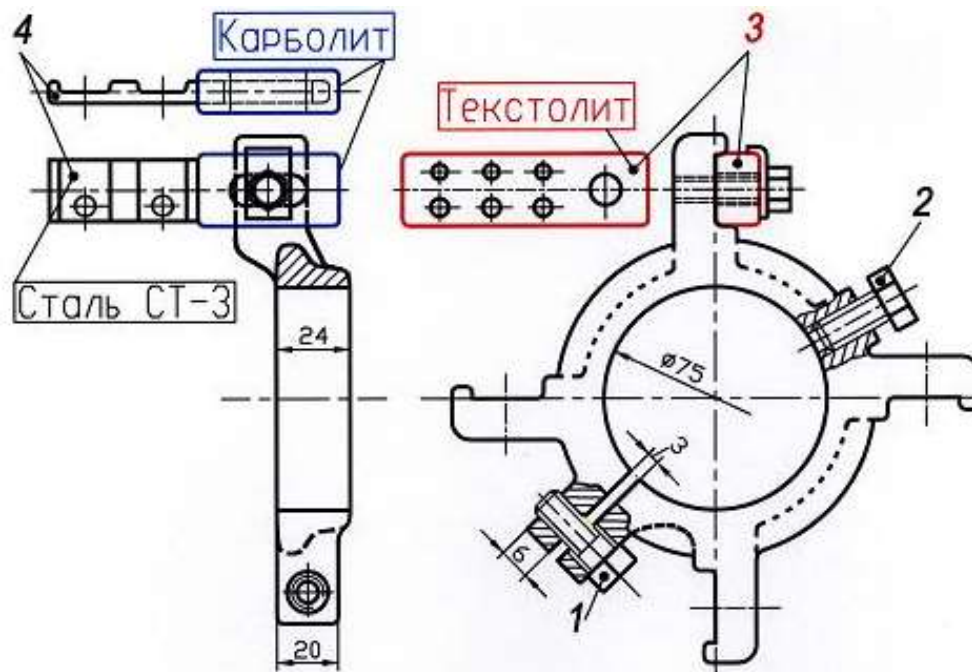


**Рис. 4.6. Щёткодержатели с вставленной щёткой:**

*a* – радиальный; *б* – реактивный

1 – обойма; 2 – щётка; 3 – пружина; 4 – медный гибкий шунт;

5 – зажим; 6 – нажимная планка



**Рис. 4.7. Щеточная траверса малых машин постоянного тока**

1 – стяжной винт; 2 – стопорный винт; 3, 4 – щеточные пальцы

В [4, с. 41] на рис. 8.8 представлен электромашинный агрегат "Асинхронный двигатель – генератор постоянного тока".

#### 4.4. Устройство обмотки якоря

Используются следующие *основные* типы обмотки якоря: простая петлевая, простая волновая, сложная петлевая, сложная волновая [1,13].

Простые обмотки образуют только одну замкнутую на себя систему проводников, тогда как сложные обмотки могут образовать несколько таких систем. Далее будет рассмотрена только простая петлевая обмотка.

##### 4.4.1. Шаги обмотки

Различают следующие конструктивные элементы обмотки якоря:

1) *виток* – совокупность двух проводников, располагаемых на расстоянии, приблизительно равном одному полюсному делению  $\tau$ ; 2) *секция* – один или несколько витков подсоединённых к двум коллекторным пластинам; 3) *активная часть секции* – её часть, лежащая в пазу; 4) *лобовая часть секции* – её часть вне паза.

У петлевой обмотки форма витка напоминает петлю, чем и обусловлено название обмотки – ”петлевая”. *Простой петлевой обмоткой* называется такая обмотка, у которой *начало и конец секции присоединяются к рядом расположенным коллекторным пластинам*. Обмотка выполняется двухслойной, то есть в одном пазу располагаются активные стороны двух разных секций. Очевидно, что справедливо равенство

$$S = K = Z, \quad (4.5)$$

где  $S$  – число секций обмотки якоря,  $K$  – число коллекторных пластин в коллекторе,  $Z$  – число зубцов (пазов) сердечника якоря (элементарные пазы не рассматриваются).

На рис. 4.8,*a* показаны две секции простой петлевой обмотки и обозначены четыре шага этой обмотки:

1) *первый шаг обмотки*  $y_1$  – расстояние между двумя активными сторонами одной и той же секции. Шаг  $y_1$  измеряется числом пазов и приблизительно равен полюсному делению

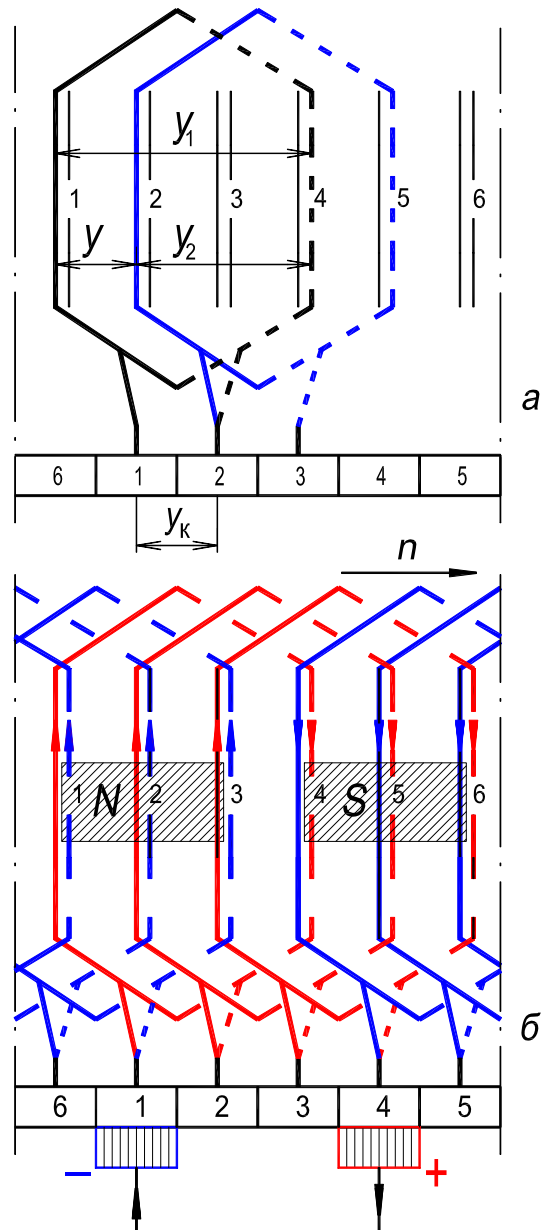
$$y_1 = (Z/2p) \pm \varepsilon, \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon$  – дробное число, дополняющее отношение  $Z/2p$  до целого значения;

2) *второй шаг обмотки*  $y_2$  – расстояние между второй активной стороной первой секции и первой активной стороной второй секции, следующей за первой;

3) *результующий шаг обмотки*  $y$  – расстояние между первыми активными сторонами двух секций, следующих друг за другом

$$y_2 = y - y_1; \quad (4.7)$$



**Рис. 4.8. Развернутая схема простой петлевой обмотки:**

*a* – шаги обмотки; *б* – в пазы уложена вся обмотка

4) *шаг обмотки по коллектору* в соответствии с определением простой петлевой обмотки

$$y_k = +1 \quad (4.8)$$

(петлевые обмотки с шагом  $y_k = -1$  не рассматриваются).

Для правильного выполнения обмотки необходимо, чтобы ход обмотки по якорю и по коллектору соответствовали, то есть должно выполняться равенство

$$y_k = y. \quad (4.9)$$

#### 4.4.2. Радиальная схема обмотки

Рассмотрим радиальную схему *простой петлевой обмотки якоря* со следующими данными (они приняты исходя из методических соображений):

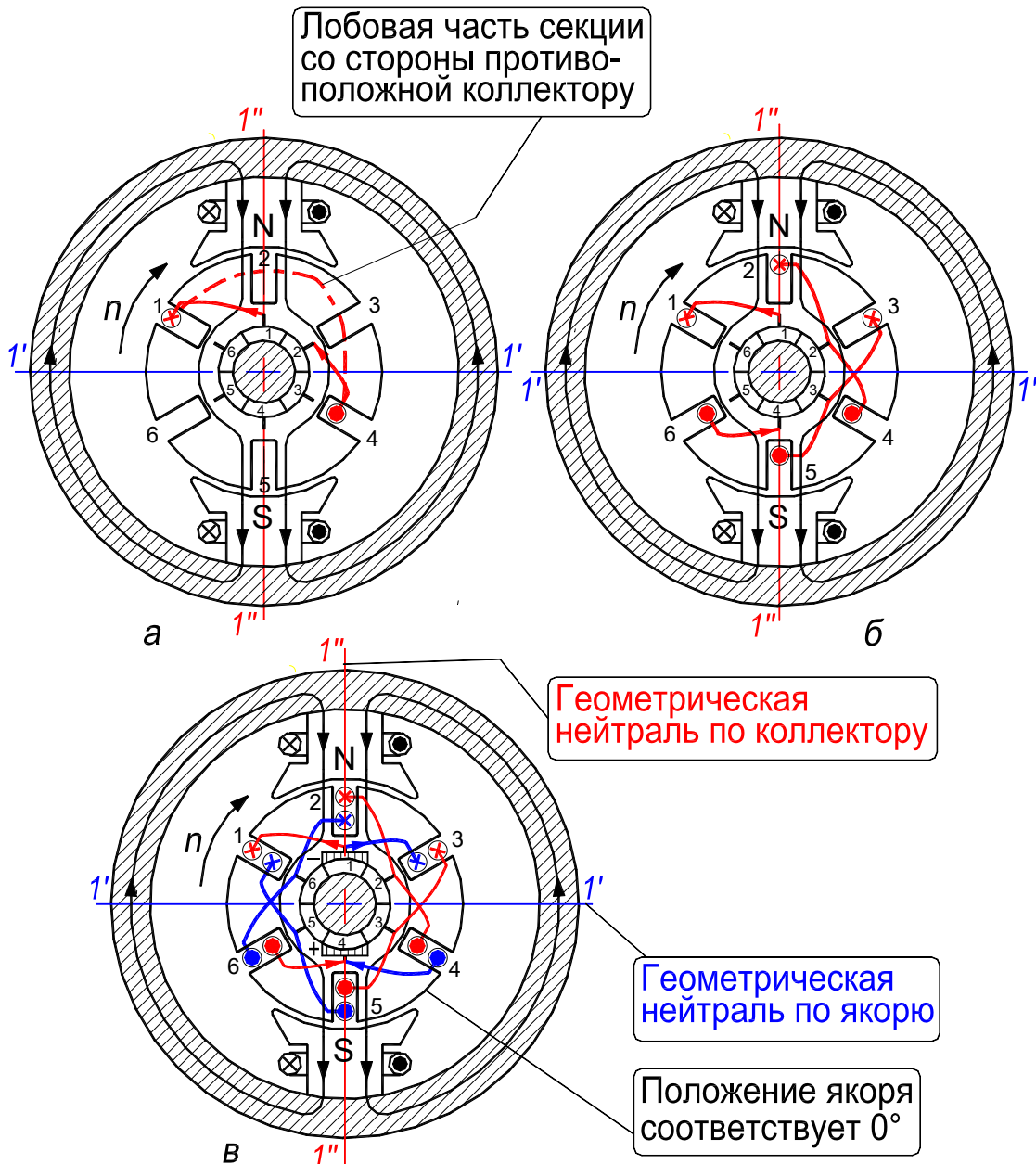
- 1)  $S = K = Z = 6$ ,
- 2) число полюсов обмотки  $2p = 2$ ,
- 3) шаги обмотки  $y_k = y = 1$ ,  $y_1 = (Z/2p) \pm \varepsilon = 6/2 \pm 0 = 3$ ,  
 $y_2 = y - y_1 = 1 - 3 = -2$ .

При изображении схемы обмотки условимся *обозначать одной и той же цифрой*: а) коллекторную пластину и секцию, левая сторона которой подсоединяется к данной коллекторной пластине; б) паз, в верхнюю часть которого укладывается левая сторона секции.

На рис. 4.9,а,б,в показана радиальная схема простой петлевой обмотки, причем на рис. 4.9,а показана только первая секция обмотки; на рис. 4.9,б показаны первая, вторая и третья секции обмотки (эти три секции, при положении якоря зафиксированном на рис. 4.9, составляют первую параллельную ветвь обмотки); на рис. 4.9,в показана вся обмотка (линиями **красного** цвета изображена первая параллельная ветвь обмотки, а **синего** – вторая параллельная ветвь).

Горизонтальная линия  $I' - I'$ , которая делит пространство между полюсами на две равные части, называется *геометрической нейтралью по якорю*. Очевидно, что на линии геометрической нейтрали по якорю поле возбуждения равно нулю. При принятом направлении вращения якоря (по часовой стрелке), в проводниках, уложенных в пазы расположенные выше геометрической нейтрали  $I' - I'$  индуцируется ЭДС полем возбуждения одного направления (знак “х”), а в проводниках, уложенных в пазы расположенные ниже этой геометрической нейтрали индуцируется ЭДС полем возбуждения другого направления (знак “•”).

Наряду с геометрической нейтралью  $I' - I'$  по якорю различают геометрическую нейтраль  $I'' - I''$  по коллектору. Геометрическая нейтраль по коллектору совпадает с осью главных полюсов и смещена по отношению к геометрической нейтрали по якорю на  $90^\circ$  (см. рис. 4.9,в).



**Рис. 4.9. Радиальная схема простой петлевой обмотки:**

*a* – уложена 1-я секция; *б* – уложены 1, 2 и 3-я секции; *в* – уложена вся обмотка

Последовательность укладки секций обмотки в пазы следующая:

- 1) Левая сторона *первой* секции укладывается в верхнюю часть *первого* паза, а начало секции подсоединяется к *первой* коллекторной пластине (см. рис. 4.9,*a*);
- 2) В соответствии с шагом  $y_1 = 3$  правая сторона *первой* секции укладывается в нижнюю часть *четвертого* паза, а конец её подсоединяется ко *второй* коллекторной пластине, так как  $y_k = 1$ . На этом процесс укладки *первой* секции закончен;

3) Далее начинается процесс укладки второй секции (см. рис. 4.9,б). В соответствии с шагом  $y = 1$  левая сторона *второй* секции укладывается в верхнюю часть *второго* паза, а начало её подсоединяется ко *второй* коллекторной пластине. В соответствии с шагом  $y_1 = 3$  правая сторона второй секции укладывается в нижнюю часть *пятого* паза, а конец её подсоединяется к *третьей* коллекторной пластине, так как  $y_k = 1$ . На этом процесс укладки второй секции закончен. Аналогично укладывается третья секция. При положении якоря зафиксированном на рис. 4.9 1, 2 и 3-я секции входят в первую параллельную ветвь обмотки (она показана линиями красного цвета).

4) Далее начинается процесс укладки второй параллельной ветви обмотки (см. рис. 4.9,в). При положении якоря зафиксированном на рис. 4.9 во вторую параллельную ветвь обмотки входят 4, 5 и 6-я секции (они показаны линиями синего цвета). Левая сторона *четвертой* секции укладывается в верхнюю часть *четвертого* паза, а начало её подсоединяется к *четвертой* коллекторной пластине. В соответствии с шагом  $y_1 = 3$  правая сторона четвертой секции укладывается в нижнюю часть *первого* паза, а конец её подсоединяется к *пятой* коллекторной пластине. На этом процесс укладки четвертой секции закончен. Аналогично укладывается 5 и 6-я секции. Конец шестой секции подсоединяется к первой коллекторной пластине. На этом процесс укладки обмотки закончен.

На рис. 4.10 приведена рассмотренная выше радиальная схема обмотки для трёх положений якоря, смещенных по направлению его вращения, соответственно на 30, 60 и 90° (по сравнению с рис. 4.9,в).

#### 4.4.3. Развернутая схема обмотки

Для изображения развернутой схемы обмотки якоря необходимо цилиндрическую поверхность якоря вместе с обмоткой и коллектором развернуть в плоскость. Развернутая схема обмотки якоря приведена на рис. 4.8,б (радиальная схема этой обмотки показана на рис. 4.9,в).

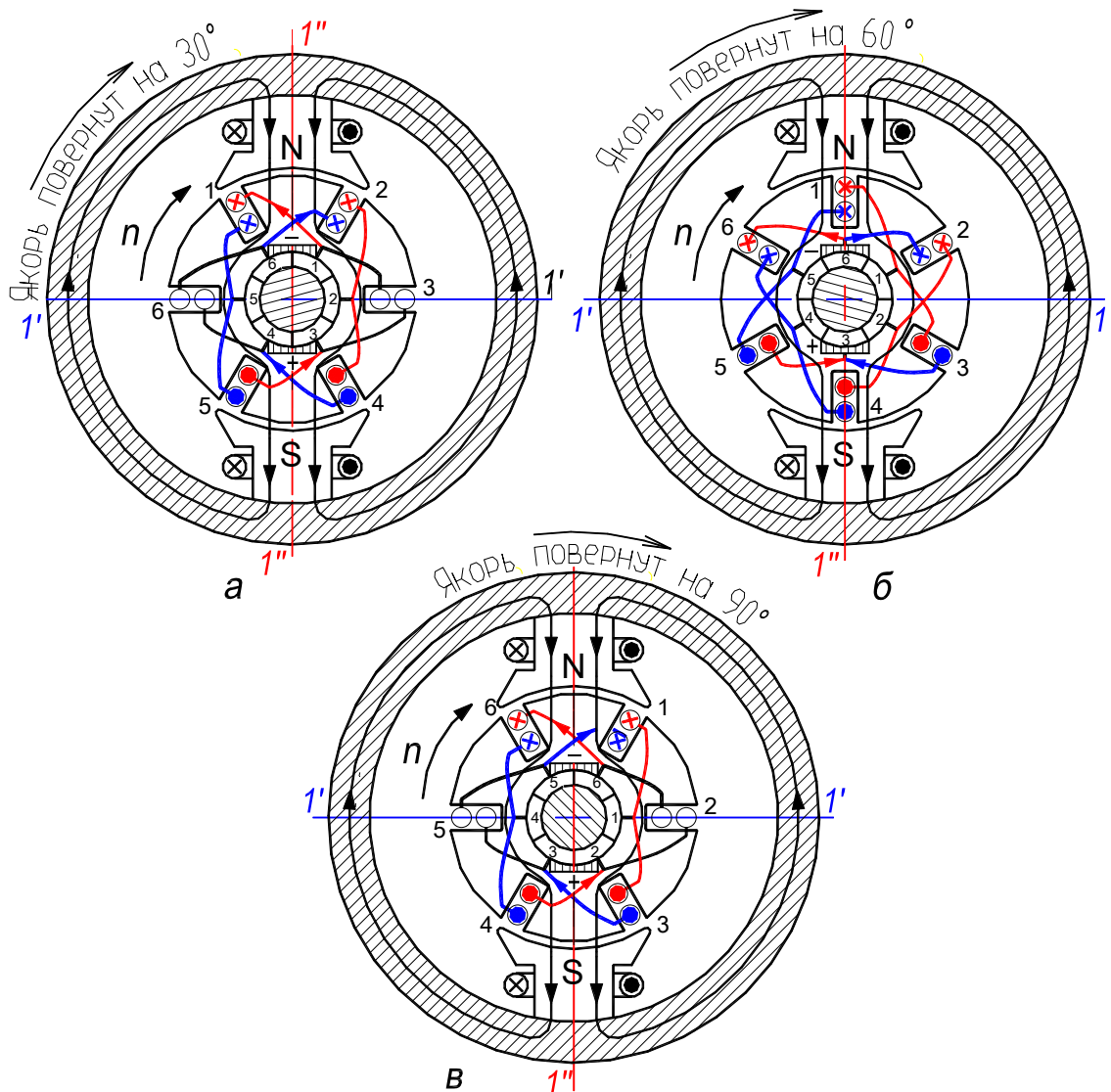
На коллектор устанавливают щётки с учетом следующих соображений:

1) на равном расстоянии друг от друга, так как при этом переменный ток обмотки якоря будет полностью выпрямлен коллектором (выпрямленный ток протекает в нагрузке);

2) на линии геометрической нейтрали  $I'' - I''$  по коллектору, так как при этом напряжение на щётках будет наибольшим.

Для положения якоря зафиксированного на рис. 4.9,в и 4.8,б щётки установлены с учетом этих соображений на коллекторных пластинах 1 и 4.



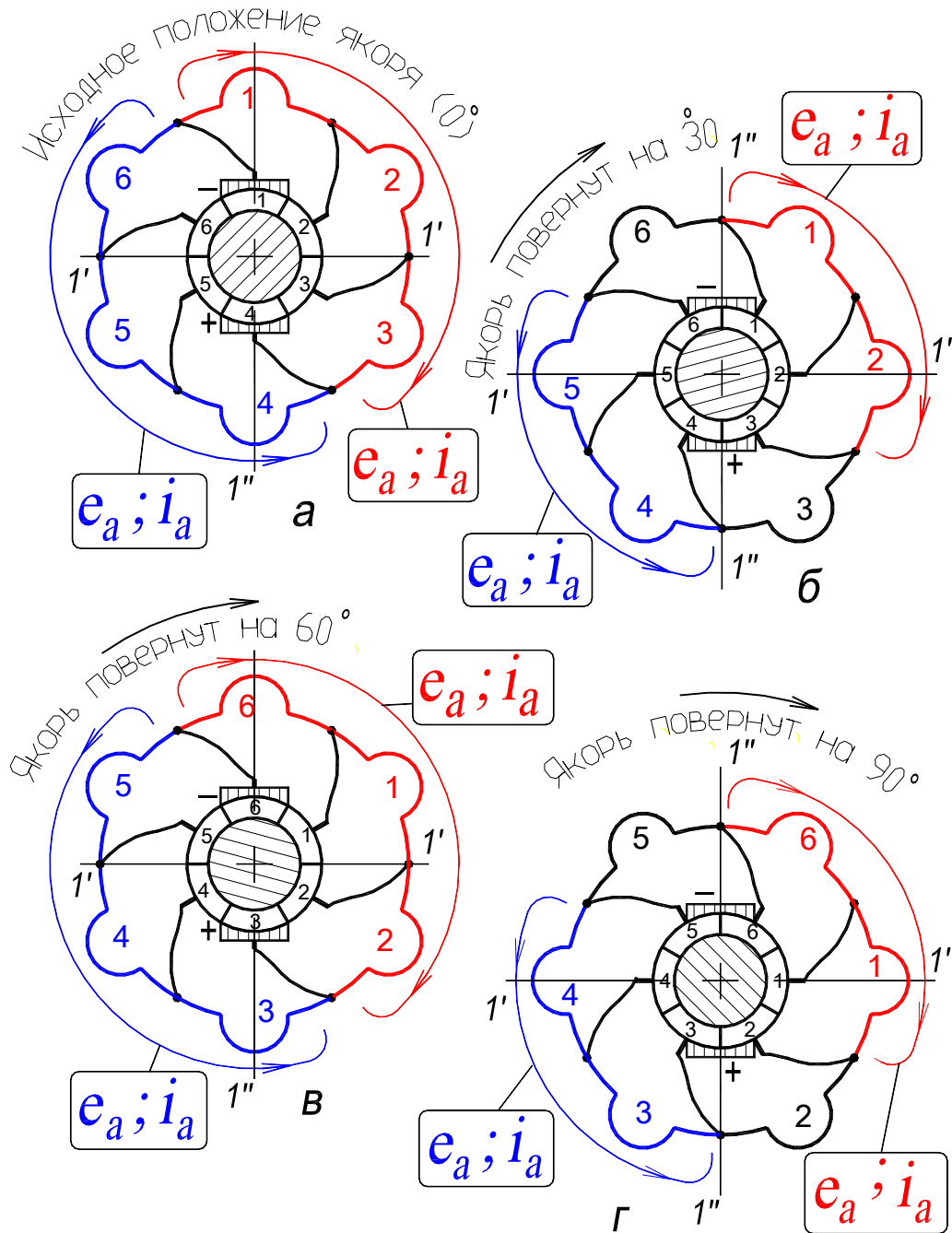


**Рис. 4.10. Радиальная схема простой петлевой обмотки при различных положениях якоря:**  
(по сравнению с рис. 4.9,в)

#### 4.4.4. Электрическая схема обмотки

Развернутую схему простой петлевой обмотки можно представить в виде двух участков (*параллельных ветвей*), каждый из которых состоит из *последовательно* соединённых секций, включённых между щётками разной полярности.

Для положения якоря зафиксированного на рис. 4.9,б, 4.9,в и 4.8,б одна параллельная ветвь (первая) состоит из секций 1, 2 и 3, а другая параллельная ветвь (вторая) состоит из секций 4, 5 и 6. Электрическая схема обмотки, соответствующая этому положению якоря, показана на рис. 4.11,а.



**Рис. 4.11. Электрическая схема соединений обмотки якоря, соответствующая положению якоря:**

*а* – на рис. 4.9, *б* – на рис. 4.10, *а*; *в* – на рис. 4.10, *б*; *г* – на рис. 4.10, *в*

Из анализа рис. 4.9, *в*, 4.8, *б* и 4.11, *а* следует, что электродвижущие силы параллельных ветвей действуют относительно друг друга встречно, а по отношению к внешней цепи (то есть по отношению к нагрузке) ветви включены параллельно. Следовательно напряжение на щётках определяется

ЭДС одной параллельной ветви, а ток в нагрузке равен суммарному току всех параллельных ветвей (он равен току протекающему через щётку).

Замечаем, что число пар параллельных ветвей  $a$  равно числу пар полюсов  $p$ :

$$a = p. \quad (4.10)$$

Этот вывод является общим для простой петлевой обмотки.

На рис. 4.11,б, 4.11,в и 4.11,г приведены электрические схемы обмотки для трёх положений якоря, смещённых по направлению его вращения, соответственно на 30, 60 и 90° (см. рис. 4.10,а, 4.10,б и 4.10,в). Из сравнительного анализа электрических схем рис. 4.11 замечаем, что в процессе вращения якоря имеет место следующее:

- 1) секции переходят из одной параллельной ветви в другую;
- 2) переходящие секции в период перехода замыкаются щётками коротко;

3) число секций в параллельных ветвях изменяется от минимального значения до максимального. Следовательно и выпрямленное напряжение на щётках изменяется от минимального значения до максимального. Этим и обусловлены пульсации напряжения на щётках, которые сглаживаются и становятся практически незаметными уже при отношении  $Z/2p = 8$  (см. рис. 4.3, лист 2 и 3);

4) в секциях, переходящих из одной ветви в другую, изменяется направление ЭДС и тока на противоположное.

В табл. 4.1 приведено состояние (положение) секций простой петлевой обмотки якоря для четырёх его положений соответствующих рис. 4.11.

**Таблица 4.1. Состояние секций обмотки якоря в процессе его вращения \***

Электрическая схема обмотки приведена на рисунке	Положение якоря	Номера секций, входящих в параллельную ветвь		Номера короткозамкнутых секций
		1-я ветвь	2-я ветвь	
4.11,а	соответствует рис. 4.9,в; это положение принято за исходное (0°)	1, 2 и 3	4, 5 и 6	нет

Продолжение табл. 4.1

4.11,б	смещено по направлению вращения на 30°; см. рис. 4.10,а	1 и 2	4 и 5	3 и 6
4.11,в	смещено по направлению вращения на 60°; см. рис. 4.10,б	6, 1 и 2	3, 4 и 5	нет
4.11,г	смещено по направлению вращения на 90°; см. рис. 4.10,в	6 и 1	3 и 4	5 и 2
...				

\* см. Забудский Е.И. [Мультимедиа-иллюстрация](#). Радиальная и электрическая схемы обмотки якоря машины постоянного тока [10].

URL- адрес: [http://zabudsky.ru/Prezent\\_MPT/M\\_P\\_Tok.exe](http://zabudsky.ru/Prezent_MPT/M_P_Tok.exe)

#### 4.5. Электродвижущая сила обмотки якоря

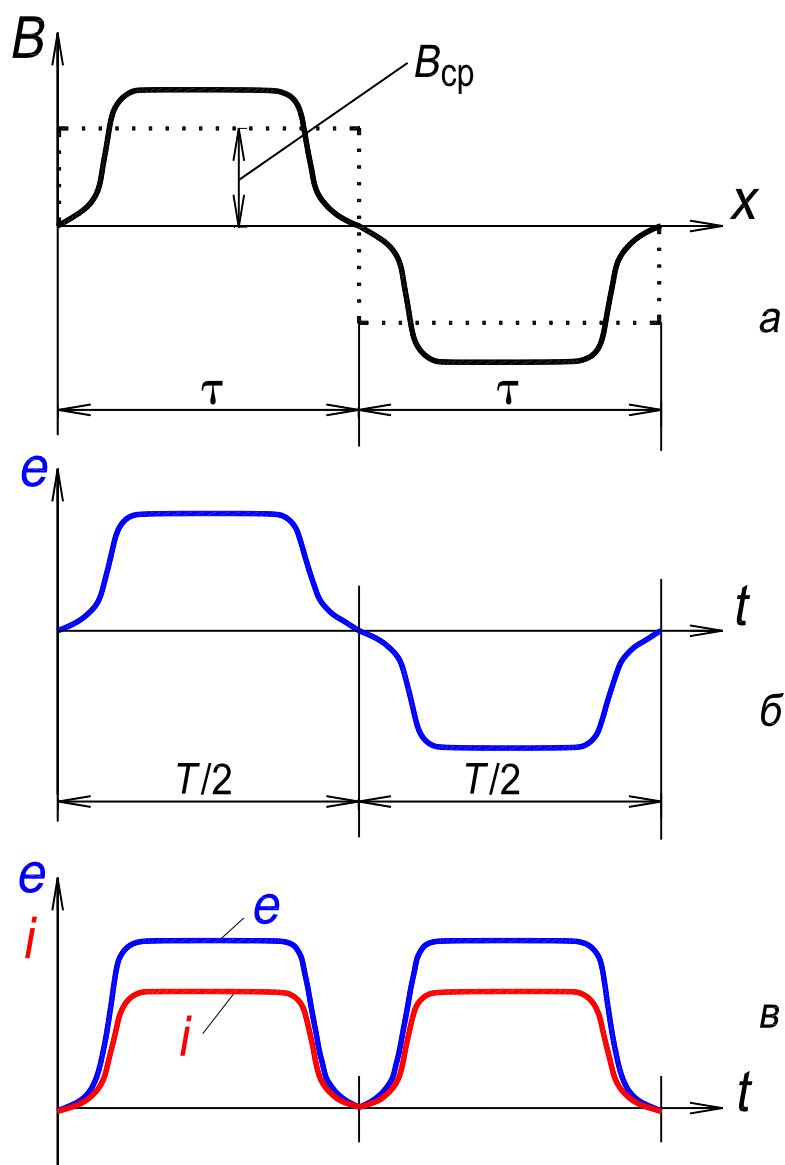
Электродвижущая сила индуцируется в обмотке якоря полем возбуждения при вращении якоря (см. рис. 4.9,в). Направление ЭДС в проводниках обмотки определяется по *правилу правой руки* (см. разд. 4.1, 37,сл.) В симметричной обмотке якоря ЭДС параллельных ветвей одинаковы (уравнивательные соединения не рассматриваются [1,13]).

Определение величины ЭДС параллельной ветви производится на основании закона электромагнитной индукции в формулировке Майкла Фарадея (4.2). После несложных преобразований формулы (4.2) выражение для определения ЭДС ветви записывается в виде:

$$E_a = c_e n \Phi, \text{ В}, \quad (4.11)$$

где  $c_e = pN/a$  – постоянная величина для данной машины,  $N$  – число активных проводников в обмотке якоря;  $n$  – частота вращения якоря, об/с;  $\Phi = B_{cp} l \tau$  – полезный магнитный поток на полюс обмотки возбуждения, Вб;  $B_{cp}$  – среднее значение магнитной индукции, Тл;  $\tau$  – полюсное деление (см. рис. 4.12).

Величина ЭДС параллельных ветвей зависит от их положения относительно главных полюсов, которое определяется установкой щеток на коллекторе. Если щётки расположены на линии геометрической нейтрали, то в параллельную ветвь входят секции только с одним направлением ЭДС, поэтому электродвижущая сила параллельной ветви будет наибольшей и определяется формулой (4.11). При сдвиге щеток с этого положения в параллельную ветвь войдут секции с ЭДС противоположного направления и общая ЭДС параллельной ветви будет меньше вычисленной по формуле (4.11).



**Рис. 4.12. Распределение физических величин:**

*a* – магнитной индукции в пространстве на двух полюсных делениях;

*б* – переменной ЭДС во времени в витке;

*в* – выпрямленных ЭДС и тока во времени в нагрузке

## 4.6. Схемы возбуждения генераторов постоянного тока

### 4.6.1. Классификация генераторов по способу возбуждения

Различают генераторы *независимого* возбуждения и генераторы с *самовозбуждением*.

Генераторы *независимого* возбуждения могут возбуждаться от постоянных магнитов или от постороннего источника постоянного тока (рис. 4.13,а).

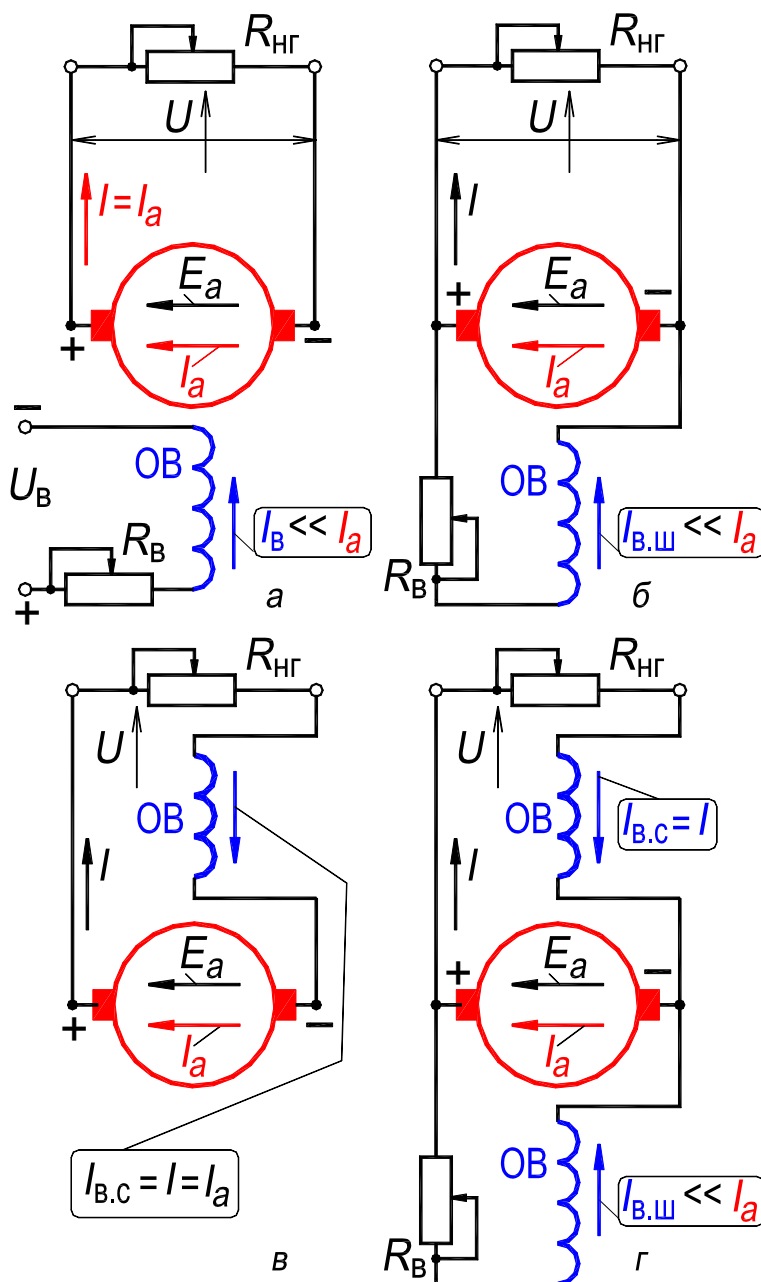


Рис. 4.13. Схемы генераторов при различном возбуждении:

а – независимое; б – параллельное; в – последовательное; г – смешанное возбуждение (в двигателе противо-ЭДС  $E_a$  действует навстречу току якоря  $I_a$ , см. рис. 4.15. с. 68)

Генераторы с *самовозбуждением* в зависимости от схемы включения обмотки возбуждения подразделяются на генераторы *параллельного* (рис. 4.13,б), *последовательного* (рис. 4.13,в) и *смешанного* возбуждения (рис. 4.13,г).

Обмотки *независимого и параллельного* возбуждения ОВ выполняются из провода небольшого сечения, но имеют большое число витков; их омическое сопротивление велико. Обмотка *последовательного* возбуждения имеет небольшое число витков, но в ней протекает ток нагрузки и она выполняется из провода большего сечения; её омическое сопротивление незначительно (см. разд. 5, с. 73, 74).

Для регулирования тока возбуждения в цепь обмоток параллельного и независимого возбуждения включается регулировочный резистор  $R_{\text{в}}$ . В генераторах параллельного возбуждения ток возбуждения составляет 1...5 % от номинального тока якоря  $I_a$ . Мощность возбуждения в генераторах постоянного тока составляет 5...10 % от номинальной мощности генератора.

Крупные генераторы постоянного тока работают с независимым возбуждением. Генераторы малой и средней мощности большей частью имеют параллельное или смешанное возбуждение.

#### **4.7. Энергетическая диаграмма генератора**

Генераторы постоянного тока преобразуют механическую энергию, подводимую к валу машины, в электрическую энергию постоянного тока.

На рис. 4.14 приведена энергетическая диаграмма генератора постоянного тока независимого возбуждения (см. рис. 4.13,а). *Механическая мощность*  $P_1$ , подводимая к валу генератора, преобразуется в *электрическую мощность*  $P_2$ ,

$$P_2 = P_1 - \sum p, \quad (4.12)$$

где  $\sum p$  – *сумма потерь мощности*:

$$\sum p = p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{эл}} + p_{\text{дб}}, \quad (4.13)$$

где  $p_{\text{мх}}$  – механические потери на трение;  $p_{\text{мг}}$  – магнитные потери в сердечнике якоря;  $p_{\text{эл}}$  – электрические потери в обмотке якоря, компенсационной обмотке, обмотке добавочных полюсов и др., а также электрические потери под щёткой;  $p_{\text{дб}}$  – добавочные потери.

*Электромагнитная мощность*  $P_{\text{эм}}$  – мощность в воздушном зазоре:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - p_{\text{мх}} - p_{\text{мг}} - p_{\text{дб}}. \quad (4.14)$$

Потери на возбуждение  $p_{\text{в}}$  относятся к источнику питающему обмотку возбуждения.

Магнитные потери (потери на гистерезис и вихревые токи), обусловлены перемагничиванием сердечника якоря при его вращении в магнитном поле.

Электрические потери в машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, составляют примерно 50 % от суммы всех потерь мощности. Электрические потери под щёткой:

$$p_{\text{эл.щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I,$$

где  $\Delta U_{\text{щ}}$  – переходное напряжение в щеточном контакте. Оно зависит от марки щётки и приводится в стандарте на пару щеток при рекомендуемой плотности тока. Для угольных и графитных щеток  $\Delta U_{\text{щ}} = 3 \text{ В}$ , для металлоугольных щеток  $\Delta U_{\text{щ}} = 0,5 \text{ В}$  [16].

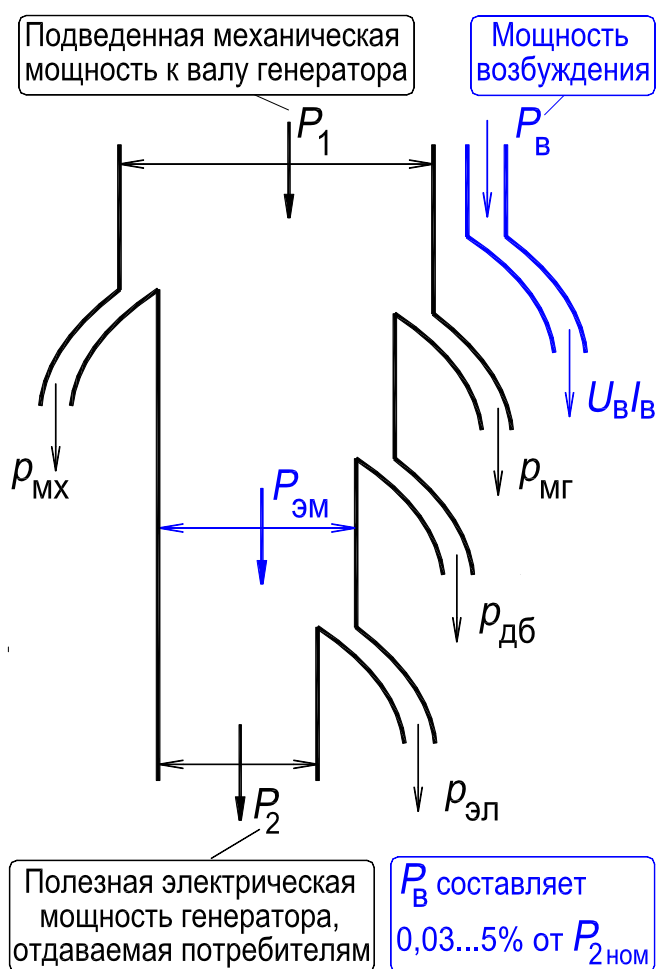


Рис. 4.14. Энергетическая диаграмма генератора независимого возбуждения



К добавочным потерям относят потери в бандажах, которые крепят обмотку якоря и обмоткодержатели. К ним также относят потери, связанные с коммутацией и искажением поля при нагрузке. Обычно добавочные потери принимают равными 0,5 % от отдаваемой мощности генератора при наличии компенсационной обмотки и 1,0 % – в машинах без компенсационной обмотки.

Коэффициент полезного действия генераторов постоянного тока

$$\eta = 1 - \sum p / (P_1 + \sum p) \quad (4.15)$$

и зависимость  $\eta = f(P_2)$  имеет такой же вид, как и других электрических машин. Максимум КПД, как и других электрических машин, имеет место при равенстве постоянных потерь переменным. Для генераторов независимого возбуждения постоянными потерями считается сумма потерь механических и магнитных,  $p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}} \approx \text{const}$ . Переменными потерями являются электрические потери,

$$p_{\text{эл}} = \text{var}.$$

Условие максимума КПД для генераторов независимого возбуждения записывается в виде:

$$p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}} = p_{\text{эл}}. \quad (4.16)$$

У генератора постоянного тока мощностью  $P_2 = 10$  кВт коэффициент полезного действия  $\eta$  составляет 83...87 %, а при мощности 1000 кВт –  $\eta = 92...96$  %.

#### 4.8. Электромагнитный момент генератора

Электромагнитный момент генератора обусловлен взаимодействием поля возбуждения  $\Phi$  машины с током якоря  $I_a$  (см. в разд. 4.1 формулу (4.3)) и определяется из формулы:

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / 2\pi n = E_a I_a / 2\pi n = c_e n \Phi I_a / 2\pi n = c_e \Phi I_a / 2\pi n = c_m I_a \Phi, \quad (4.17)$$

где  $P_{\text{эм}} = E_a I_a$  – электромагнитная мощность генератора;  $E_a = c_e n \Phi$  – ЭДС параллельной ветви обмотки якоря, см. в разд. 4.5 формулу (4.11);  $c_m = c_e / 2\pi$  – постоянная величина для данной машины постоянного тока. В системе единиц СИ момент измеряется в ньютон-метрах (Н·м).

Рис. 4.2 (см. с. 40) иллюстрирует физическую природу возникновения электромагнитного момента  $M_{\text{эм}}$ . Как следует из рисунка этот момент обусловлен

стремлением силовых линий результирующего магнитного поля замыкаться по пути с минимальным магнитным сопротивлением, то есть по кратчайшему пути. В результате на якорь действует электромагнитный момент, причем навстречу вращающему моменту приводного двигателя  $M_{п.д}$ , то есть *электромагнитный момент генератора является тормозным. Направление действия электромагнитного момента определяется по правилу левой руки* (см. рис. 4.1,б, с. 38).

#### 4.8.1. Момент холостого хода генератора

При холостом ходе генератора к щёткам не присоединена электрическая нагрузка, но к валу приложен момент приводного двигателя и подводится соответствующая ему механическая мощность. Эта мощность затрачивается на покрытие потерь холостого хода генератора. Ими являются магнитные и механические потери. Момент холостого хода генератора определяется суммой этих потерь:

$$M_x = (p_{мх} + p_{мг})/2\pi n = p_x/2\pi n, \quad (4.18)$$

где  $p_x = p_{мх} + p_{мг}$  – потери холостого хода генератора;  $n$  – частота вращения якоря генератора.

Момент холостого хода генератора  $M_x$ , также как и электромагнитный момент генератора  $M_{эм}$ , действует навстречу моменту приводного двигателя, то есть является тормозным.

#### 4.8.2. Уравнение равновесия моментов генератора

При постоянной скорости вращения якоря  $n = \text{const}$  момент приводного двигателя всегда *уравновешивается* суммой моментов генератора, то есть:

$$M_{п.д} = -(M_x + M_{эм}) = -M_{г}, \quad (4.19)$$

где  $M_{г}$  – момент генератора. Знак “минус” в правой части (4.19) свидетельствует о действии момента генератора навстречу моменту приводного двигателя.

Уравнение (4.19) и есть уравнение равновесия моментов генератора (см. рис. 4.17,а на с. 70).

#### 4.9. Уравнение равновесия напряжений обмотки якоря генератора

При установившемся режиме работы генератора уравнение равновесия напряжений обмотки якоря записывается в виде:

$$U = E_a - I_a R_a = c_e n \Phi - I_a R_a, \quad (4.20)$$

где  $U$  – напряжение на щётках;  $E_a$  – ЭДС параллельной ветви обмотки якоря,

см. формулу (4.11);  $I_a$  – ток в параллельной ветви обмотки якоря;  $R_a$  – внутреннее сопротивление генератора, включающее все последовательные сопротивления в цепи обмотки якоря. К ним относятся сопротивления: обмотки якоря, последовательной обмотки возбуждения, обмотки добавочных полюсов, компенсационной обмотки, а также сопротивление щеточных контактов. Сопротивление щеточных контактов считается постоянным.

При холостом ходе генератора  $U = E_a = U_x$ , то есть напряжение на щётках определяется величиной ЭДС параллельной ветви обмотки якоря. При нагрузке генератора  $U < E_a$ , причем

$$U = I_{\text{нг}} R_{\text{нг}}, \quad (4.21)$$

где  $I_{\text{нг}}$  – ток в нагрузке, подключенной к щёткам;  $R_{\text{нг}}$  – сопротивление нагрузки.

При нагрузке ток в параллельной ветви обмотки якоря рассчитывается по формуле:

$$I_a = (E_a - U) / R_a. \quad (4.22)$$

## 4.10. Двигатели постоянного тока. Классификация

*Двигатели постоянного тока* благодаря наличию механического преобразователя частоты – коллектора *обладают* по сравнению с двигателями переменного тока важным *достоинством* – *плавным и экономичным регулированием частоты вращения*. Поэтому двигатели постоянного тока находят широкое применение в промышленных, транспортных и других установках, где требуется широкое и плавное регулирование частоты вращения (прокатные станы, мощные металлорежущие станки, электрическая тяга на транспорте и т. д.).

В режиме двигателя коллектор (термин 17, с. 19) преобразует потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток в обмотке якоря и работает, таким образом, в качестве *механического инвертора* тока.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяются аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (рис. 4.15)

С независимым возбуждением от отдельного источника тока обычно выполняются мощные двигатели с целью более удобного и экономичного регулирования тока возбуждения. По своим свойствам двигатели независимого и параллельного возбуждения почти одинаковы (термины 32...39, с. 20, 21).

## 4.11. Энергетическая диаграмма двигателя

На рис. 4.16 изображена энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения, которая иллюстрирует процесс преобразования электрической мощности  $P_1$ , подводимой к двигателю из сети, в полезную механическую мощность  $P_2$  на валу.

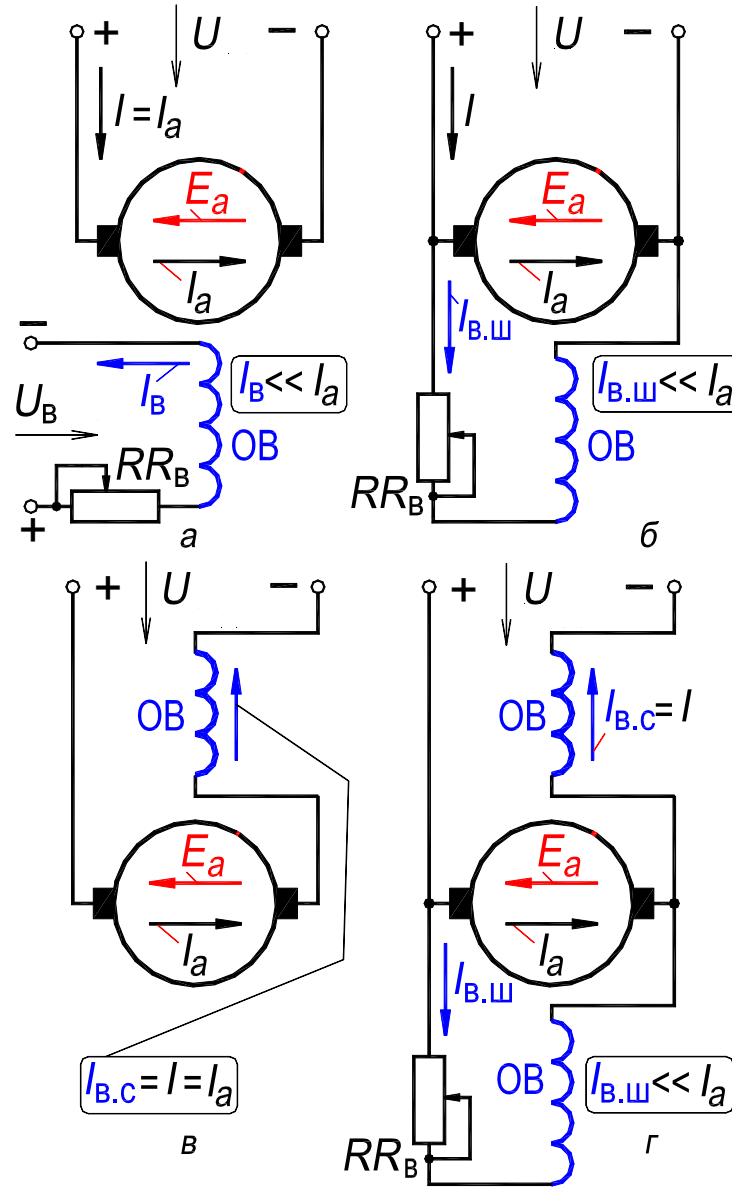
$$P_1 = P_2 + \sum p, \quad (4.23)$$

где  $\sum p$  – сумма потерь мощности, которые в двигателе преобразуются в тепло.

Сумма потерь

$$\sum p = p_{\text{в}} + p_{\text{эл}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{д}}, \quad (4.24)$$

где  $p_{\text{в}}$  – электрические потери в обмотке возбуждения;  $p_{\text{эл}}$  – электрические потери в обмотке якоря, компенсационной обмотке, обмотке добавочных полюсов и др., а также электрические потери под щёткой;  $p_{\text{мг}}$  – магнитные потери в сердечнике якоря;  $p_{\text{мх}}$  – механические потери на трение;  $p_{\text{д}}$  – добавочные потери (термины 90...96, с. 27, 28).



**Рис. 4.15. Схемы двигателей при различном возбуждении:**  
*а* – независимое; *б* – параллельное; *в* – последовательное;  
*г* – смешанное возбуждение (см. рис. 4.13. с. 61)

Электромагнитная мощность  $P_{эм}$  – мощность в воздушном зазоре, которая превращается в механическую мощность  $P_{мх}$ :

$$P_{эм} = P_{мх} = P_1 - p_v - p_{эл}. \quad (4.25)$$

Полезная механическая мощность на валу

$$P_2 = P_{мх} - p_{мг} - p_{мх} - p_d. \quad (4.26)$$

## 4.12. Уравнение равновесия вращающих моментов двигателя

Как и в генераторе электромагнитный момент двигателя обусловлен взаимодействием поля возбуждения  $\Phi$  машины с током якоря  $I_a$  [см. формулу (4.17) на с. 64]

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}}/2\pi n = P_{\text{мх}}/2\pi n = c_M I_a \Phi. \quad (4.27)$$

Отличие состоит в том, что в генераторе этот момент является тормозным, то есть он действует навстречу моменту приводного двигателя. В двигателе же электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$  является вращающим, то есть он приводит во вращение якорь и производственный механизм, подсоединённый к валу двигателя. В дальнейшем изложении индекс “эм” будем опускать.

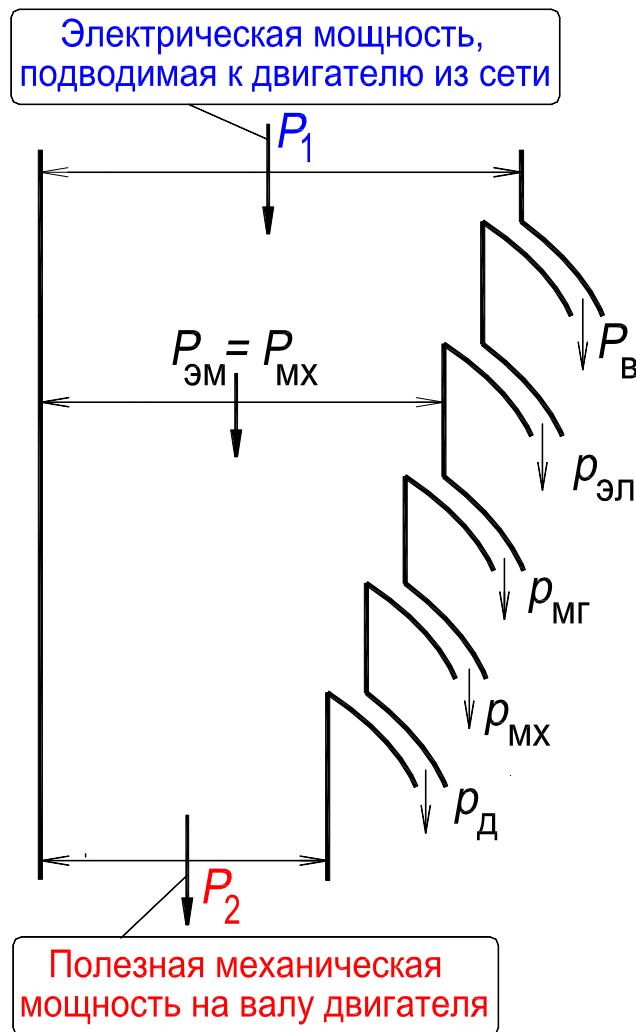


Рис. 4.16. Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения

Как следует из формулы (4.27), если в двигателе направление тока  $I_a$  в обмотке якоря и полярность полюсов возбуждения такие же как в генераторе (рис. 4.17), то электромагнитный момент и в генераторе ( $M_{\Gamma}$ ) и в двигателе ( $M_{\text{Д}}$ ) будет действовать в одном и том же направлении. Однако якорь двигателя и якорь генератора будут вращаться в этом случае в противоположных направлениях.

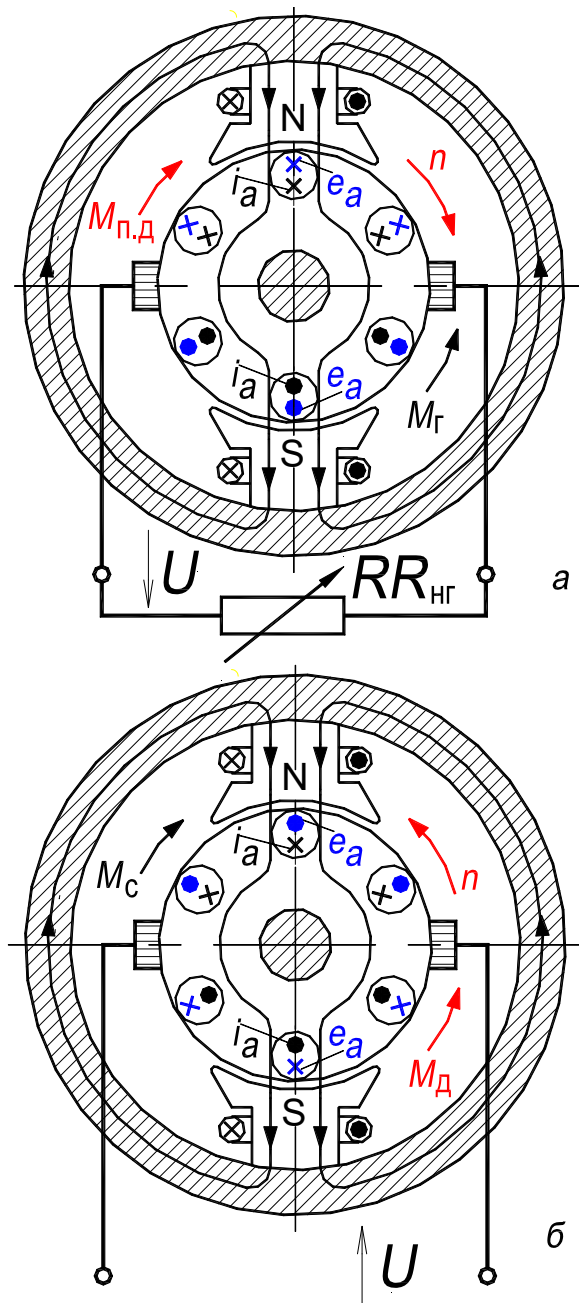


Рис. 4.17. Иллюстрация к принципу действия:  
 а – генератора; б – двигателя

При отсутствии нагрузки на валу двигателя (холостой ход,  $P_2 = 0$  и механическая мощность  $P_{\text{мх}} = p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{д}}$ ) уравнение моментов представляется в виде

$$M = M_{\text{х}}, \quad (4.28)$$

где  $M_{\text{х}} = c_{\text{м}} I_{\text{а.х}} \Phi$  – момент холостого хода, который обуславливает вращение якоря двигателя при отсутствии нагрузки на валу. Ток холостого хода  $I_{\text{а.х}}$  якоря мал и обычно составляет 0,03...0,08 от номинального тока якоря  $I_{\text{а.ном}}$ . Моменту  $M_{\text{х}}$  соответствует мощность потерь  $p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{д}}$ , он является внутренним тормозным моментом и почти не зависит от нагрузки на валу двигателя.

При постоянной частоте вращения двигателя,  $n = \text{const}$ , и наличии нагрузки на валу уравнение моментов записывается так

$$M = M_{\text{х}} + M_{\text{нг}} = M_{\text{с}}, \quad (4.29)$$

где  $M_{\text{нг}}$  – момент нагрузки на валу, создаваемый производственным механизмом;  $M_{\text{с}}$  – статический момент сопротивления на валу двигателя.

На рис. 4.17,б показано направление действия моментов двигателя при неизменной частоте вращения,  $n = \text{const}$ .

При изменяющейся частоте вращения,  $n = \text{var}$ , в уравнении моментов появляется третье слагаемое, то есть

$$M = M_{\text{х}} + M_{\text{нг}} + M_{\text{д}} = M_{\text{с}} + M_{\text{д}}, \quad (4.30)$$

где  $M_{\text{д}}$  – динамический момент.

$$M_{\text{д}} = 2J\pi dn/dt = Jd\Omega/dt, \quad (4.31)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся частей двигателя и производственного механизма. Если частота вращения  $n$  увеличивается, то момент  $M_{\text{д}}$  действует против движения, то есть навстречу моменту двигателя  $M$ . При торможении двигателя динамический момент  $M_{\text{д}}$  изменяет свой знак и поддерживает движение. В обоих случаях динамический момент препятствует процессу изменения скорости вращения якоря, то есть замедляет этот процесс.

Таким образом в общем виде уравнение равновесия вращающихся моментов двигателя записывается так

$$M = M_{\text{с}} + 2J\pi dn/dt = M_{\text{с}} + Jd\Omega/dt. \quad (4.32)$$



Отметим, что если мощность  $P$  выразить в ваттах, а частоту вращения  $n$  в оборотах в секунду, то момент  $M$  измеряется в ньютон-метрах (Н·м) и между этими величинами будет существовать зависимость

$$M = P/2\pi n = P/\Omega,$$

где  $\Omega = 2\pi n$  – угловая скорость якоря, радиан в секунду.

### 4.13. Уравнение равновесия напряжений двигателя

В двигателе постоянного тока, в отличие от генератора (рис. 4.17,а), электродвижущая сила  $E_a$ , индуцируемая в обмотке якоря полем возбуждения направлена навстречу току якоря  $I_a$  и поэтому называется противо-ЭДС. Это иллюстрирует рис. 4.17,б на котором показана схема машины постоянного тока соответствующая режиму двигателя, а именно: 1) к цепи якоря подводится напряжение постоянного тока  $U$ ; 2) поле возбуждения  $\Phi$  и ток якоря  $I_a$  взаимодействуют и создается электромагнитный момент  $M_d$  направление действия которого определяется *по правилу левой руки*; 3) якорь вращается в поле возбуждения со скоростью  $n$  в том же направлении; 4) в обмотке якоря индуцируется противо-ЭДС  $E_a$ , её направление *определяется правилом правой руки* (рис. 4.1,а, с. 38).

Уравнение равновесия напряжений двигателя для цепи якоря записывается так [см. уравнение (4.20), с. 65]

$$U = E_a + I_a R_a = c_e n \Phi + I_a R_a, \quad (4.33)$$

откуда ток якоря

$$I_a = (U - E_a)/R_a = (U - c_e n \Phi)/R_a. \quad (4.34)$$

В режиме двигателя всегда выполняется неравенство  $U > E_a$ , а в режиме генератора –  $U \leq E_a$ .

Из анализа равенства (4.34) следует, что *при запуске двигателя ток в обмотке якоря будет иметь максимальное значение, так как противо-ЭДС равна нулю ( $n = 0$ )*. Ток якоря определяемый равенством

$$I_{a.п} = U/R_a \quad (4.35)$$

называется пусковым. По мере разгона двигателя противо-ЭДС возрастает и ток  $I_a$  уменьшается. Таким образом ЭДС  $E_a$  в двигателе постоянного тока является своеобразным регулятором тока якоря.

## 5. Номинальные величины исследуемых электрических машин

### 5.1. Генератор постоянного тока

(Работа №1)

Таблица 5.1.1. Номинальные величины исследуемого генератора

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$P_{\text{ном}}$	2	кВт
Напряжение	$U_{\text{ном}}$	115	В
Ток обмотки якоря	$I_{a.\text{ном}}$	17,4	А
Частота вращения якоря	$n$	1430	об/мин

Таблица 5.1.2. Номинальные величины приводного двигателя

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$P_{\text{ном}}$	2,5	кВт
Напряжение	$U_{\text{ном}}$	110	В
Ток обмотки якоря	$I_{a.\text{ном}}$	29	А
Частота вращения якоря	$n$	1500	об/мин

### 5.2. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением

(Работа №2)

Таблица 5.2.1. Номинальные величины исследуемого двигателя \*

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$P_{\text{ном}}$	1	кВт
Напряжение	$U_{\text{ном}}$	110	В
Ток обмотки якоря	$I_{a.\text{ном}}$	12,2	А
Частота вращения якоря	$n$	1420	об/мин

\* *Примечание:* омическое сопротивление обмотки *якоря*  $R_a = 1,1$  Ом; омическое сопротивление *параллельной* обмотки *возбуждения*  $R_{в.п} = 210$  Ом

**Таблица 5.2.2. Номинальные величины двигателя,  
работающего в режиме электромагнитного тормоза**

<b>Наименование</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Численное значение</b>	<b>Единица измерения</b>
<b>Мощность</b>	$P_{\text{ном}}$	1,5	кВт
<b>Напряжение</b>	$U_{\text{ном}}$	220	В
<b>Ток обмотки якоря</b>	$I_{a.\text{ном}}$	8,6	А
<b>Частота вращения якоря</b>	$n$	1500	об/мин

### **5.3. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением (Работа №3)**

**Таблица 5.3.1. Номинальные величины исследуемого двигателя \*\***

<b>Наименование</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Численное значение</b>	<b>Единица измерения</b>
<b>Мощность</b>	$P_{\text{ном}}$	1,1	кВт
<b>Напряжение</b>	$U_{\text{ном}}$	110	В
<b>Ток обмотки якоря</b>	$I_{a.\text{ном}}$	12,8	А
<b>Частота вращения якоря</b>	$n$	1250	об/мин

\*\* Примечание: омическое сопротивление обмотки *якоря*  $R_a = 1$  Ом;  
омическое сопротивление *последовательной* обмотки *возбуждения*  $R_{в.с} = 0,35$  Ом

**Таблица 5.3.2. Номинальные величины нагрузочного  
генератора постоянного тока**

<b>Наименование</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Численное значение</b>	<b>Единица измерения</b>
<b>Мощность</b>	$P_{\text{ном}}$	1,5	кВт
<b>Напряжение</b>	$U_{\text{ном}}$	220	В
<b>Ток обмотки якоря</b>	$I_{a.\text{ном}}$	8,6	А
<b>Частота вращения якоря</b>	$n$	1500	об/мин

## 5.4. Электромашинный усилитель

(Работа №4)

Таблица 5.4.1. Номинальные величины исследуемого электромашинного усилителя

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$P_{\text{ном}}$	1,2	кВт
Напряжение	$U_{\text{ном}}$	115	В
Ток обмотки якоря	$I_{a.\text{ном}}$	10,4	А
Частота вращения якоря	$n$	1440	об/мин

Таблица 5.4.2. Номинальные величины приводного асинхронного двигателя

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$P_{\text{ном}}$	1,7	кВт
Напряжение	$U_{\text{л.ном}}$	380	В
Ток обмотки статора	$I_{\text{л.ном}}$	3,8	А
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,82	–
Коэффициент полезного действия	$\eta$	81,5	%
Частота	$f$	50	Гц
Частота вращения	$n$	1420	об/мин

## 6. РАБОТА № 1

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

### Оглавление

1. Цель работы .....	81
2. Программа работы .....	81
3. Основы теории .....	82
<b>3.1. Реакция якоря генератора постоянного тока .....</b>	<b>82</b>
3.1.1. Магнитное поле при нагрузке .....	82
3.1.2. Продольная и поперечная реакция якоря .....	85
3.1.2.1. Поперечная реакция .....	87
3.1.2.2. Продольная реакция. Щётки сдвинуты с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря .....	88
3.1.2.3. Продольная реакция. Щётки сдвинуты с геометрической нейтрали против направления вращения якоря .....	89
<b>3.2. Коммутация в генераторе постоянного тока .....</b>	<b>90</b>
3.2.1. Период коммутации .....	90
3.2.2. Процесс перехода секции обмотки якоря .....	92
3.2.3. Уравнение коммутационного процесса .....	96
3.2.4. ЭДС, индуцируемые в коммутируемой секции .....	97
3.2.5. Виды коммутации .....	99
3.2.5.1. Прямолинейная коммутация .....	99
3.2.5.2. Коммутация с учетом ЭДС в коммутируемой секции .....	100
3.2.6. Основные причины искрения .....	102

3.2.7. Способы уменьшения искрения .....	103
3.2.8. Оценка степени искрения .....	105
3.2.9. Экспериментальная проверка и настройка коммутации .....	106
3.2.9.1. Метод подпитки добавочных полюсов .....	106
3.2.9.2. Снятие потенциальных кривых под щётками	108
<b>3.3. Характеристики генераторов постоянного тока .....</b>	<b>110</b>
3.3.1. Классификация характеристик генераторов .....	110
3.3.2. Характеристики генератора независимого возбуждения .....	110
3.3.3. Характеристики генератора параллельного возбуждения .....	114
3.3.4. Характеристики генератора последовательного возбуждения .....	118
3.3.5. Характеристики генератора смешанного возбуждения .....	119
<b>4. Экспериментальное исследование .....</b>	<b>120</b>
4.1. Пуск двигателя постоянного тока .....	120
4.2. Характеристики генератора с параллельным возбуждением .....	120
4.2.1. Характеристика холостого хода .....	120
4.2.2. Внешняя характеристика .....	123
4.2.3. Регулировочная характеристика .....	123
4.3. Характеристики генератора со смешанным возбуждением .....	124
4.3.1. Внешняя характеристика .....	124
4.3.2. Регулировочная характеристика .....	125
4.4. Характеристики генератора с независимым возбуждением .....	125

4.4.1. Внешняя характеристика .....	125
<b>5. Содержание и оформление отчета .....</b>	<b>127</b>
<b>6. Контрольные вопросы .....</b>	<b>128</b>
<b>Приложение 6</b>	
<b>П6.1. Тахогенератор постоянного тока .....</b>	<b>129</b>
<b>Перечень рисунков в 6-м разделе .....</b>	<b>79</b>
<b>Перечень таблиц в 6-м разделе .....</b>	<b>80</b>

## Перечень рисунков в 6-м разделе

Рис. 6.1. Картина магнитного поля: <i>a</i> – обмотки возбуждения; <i>b</i> – обмотки якоря; <i>в</i> – результирующего, в режиме генератора .....	83
Рис. 6.2. Распределение в пространстве магнитного поля: <i>1</i> – обмотки возбуждения; <i>3</i> – в режиме генератора при ненасыщенном магнитопроводе; <i>5</i> – при насыщенном магнитопроводе .....	84
Рис. 6.3. Действие реакции якоря в генераторе постоянного тока: <i>a</i> – щётки расположены по линии геометрической нейтрали (г. н.); <i>b</i> – щётки смещены с г. н. по направлению вращения якоря; <i>в</i> – щётки смещены с г. н. против направлению вращения якоря .....	86
Рис. 6.4. Изменение тока в секции обмотки якоря: <i>a</i> – в процессе вращения якоря; <i>b</i> – за период коммутации (без учета ЭДС в коммутируемой секции) .....	91
Рис. 6.5, лист 1. Процесс перехода секции <i>1</i> простой петлевой обмотки из одной параллельной ветви (обозначена синим цветом) в другую (обозначена красным цветом) /развернутая схема обмотки/ ...	93
Рис. 6.5, лист 2. Процесс перехода секции <i>1</i> простой петлевой обмотки из одной параллельной ветви (обозначена синим цветом) в другую (обозначена красным цветом); одновременно с секцией <i>1</i> коммутирует секция <i>4</i> /радиальная схема обмотки/ .....	94
Рис. 6.6. Иллюстрация к вопросу об ЭДС, индуцируемых в коммутируемой секции .....	98
Рис. 6.7. Иллюстрация изменения тока в коммутируемой секции: <i>a</i> и <i>b</i> – замедленная коммутация; <i>в</i> и <i>г</i> – ускоренная коммутация .....	101
Рис. 6.8. Схема для снятия кривых подпитки добавочных полюсов .....	107
Рис. 6.9. Кривые подпитки добавочных полюсов: <i>a</i> – нормально действующих; <i>b</i> – слабо действующих; <i>в</i> – сильно действующих; <i>г</i> – насыщенных .....	108
Рис. 6.10. Потенциальные щеточные кривые .....	109
Рис. 6.11. Ёмкостный фильтр с двумя конденсаторами для защиты от помех .....	109
Рис. 6.12. Характеристики ГПТ независимого возбуждения: <i>a</i> – холостого хода; <i>b</i> – нагрузочная; <i>в</i> – внешняя; <i>г</i> – регулировочная; <i>д</i> – короткого замыкания ...	111
Рис. 6.13. Иллюстрация процесса самовозбуждения ГПТ: <i>a</i> – параллельного возбуждения. Внешние характеристики ГПТ: <i>b</i> – параллельного возбуждения (кривая 2); <i>в</i> – последовательного возбуждения; <i>г</i> – смешанного возбуждения (кривые 1, 3, 4) ...	116
Рис. 6.14. Схема включения ДПТ параллельного возбуждения .....	121
Рис. 6.15. Схема лабораторной установки для исследования ГПТ параллельного и смешанного возбуждения .....	122
Рис. 6.16. Схема лабораторной установки для исследования ГПТ независимого возбуждения .....	126
Рис. Пб.1. Характеристика тахогенератора .....	130
Рис. Пб.2. Влияние насыщения на изменение магнитного потока .....	130
Рис. Пб.3. Схема лабораторной установки для исследования тахогенератора постоянного тока .....	131



### **Перечень таблиц в 6-м разделе**

Табл. 6.1. Оценка степени искрения на коллекторе .....	105
Табл. 6.2. Характеристики генераторов постоянного тока .....	110
Табл. 6.3. Измерение характеристики холостого хода .....	122
Табл. 6.4. Измерение внешней характеристики .....	123
Табл. 6.5. Измерение регулировочной характеристики .....	124

## 1. Цель работы

Ознакомиться с устройством и теорией генератора постоянного тока (ГПТ). Освоить практические методы проведения опытов холостого хода (в режиме самовозбуждения), под нагрузкой (внешние и регулировочные характеристики). Выяснить влияние схемы соединения обмоток возбуждения на основные характеристики ГПТ.

## 2. Программа работы

2.1. Ознакомиться с устройством исследуемого генератора и записать его паспортные данные.

2.2. Снять и построить характеристики ГПТ с **параллельным** возбуждением:

а) характеристика *холостого хода*  $U_x = f(I_B)$  при  $n = \text{const}$  (режим **самовозбуждения**),

б) *внешняя* характеристика  $U = f(I_{\text{нГ}})$  при  $R_B = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ,

в) *регулировочная* характеристика  $I_B = f(I_{\text{нГ}})$  при  $U = U_{\text{ном}}$ ,  $n = \text{const}$ .

2.3. Снять и построить характеристики ГПТ со **смешанным** возбуждением:

а) *внешняя* характеристика  $U = f(I_{\text{нГ}})$  при  $R_B = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ,

б) *регулировочная* характеристика  $I_B = f(I_{\text{нГ}})$  при  $U = U_{\text{ном}}$ ,  $n = \text{const}$ .

2.4. Снять и построить характеристику ГПТ с **независимым** возбуждением:

а) *внешняя* характеристика  $U = f(I_a)$  при  $I_B = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ .

### 3. Основы теории

Генераторы постоянного тока используются в различных промышленных, транспортных и других установках (для питания электроприводов с широким регулированием скорости вращения, в электролизной промышленности, на судах, тепловозах и т. д.). Генераторы постоянного тока приводятся во вращение электродвигателями переменного тока, паровыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания. См. разд. 4.1...4.9, с. 37, сл.

#### 3.1. Реакция якоря генератора постоянного тока

Определение. *Реакцией якоря называется воздействие МДС обмотки якоря на магнитное поле обмотки возбуждения* (термин 53, с. 23). Реакция якоря оказывает существенное влияние на характеристики машин постоянного тока.

Наряду с реальными щётками, расположенными на коллекторе (рис. 4.9, в и 4.10, с. 56), в теории электрических машин постоянного тока рассматривают (для удобства анализа) воображаемые *условные щётки* (рис. 6.1 и 6.3), *которые располагают на поверхности сердечника якоря*. Линия (ось) условных щеток смещена относительно линии (оси) реальных щеток на  $90^\circ$ . Реальные щётки могут быть сдвинуты с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря или против этого направления. Сдвиг щеток необходим для влияния на реакцию якоря (см. наст. разд.) или на коммутацию (см. разд. 3.2.7, с. 103, сл.). При сдвиге реальных щеток по коллектору на некоторый угол на такой же угол смещаются и условные щётки по якорю.

*Удобство использования (при теоретическом анализе) условных щеток состоит в следующем:*

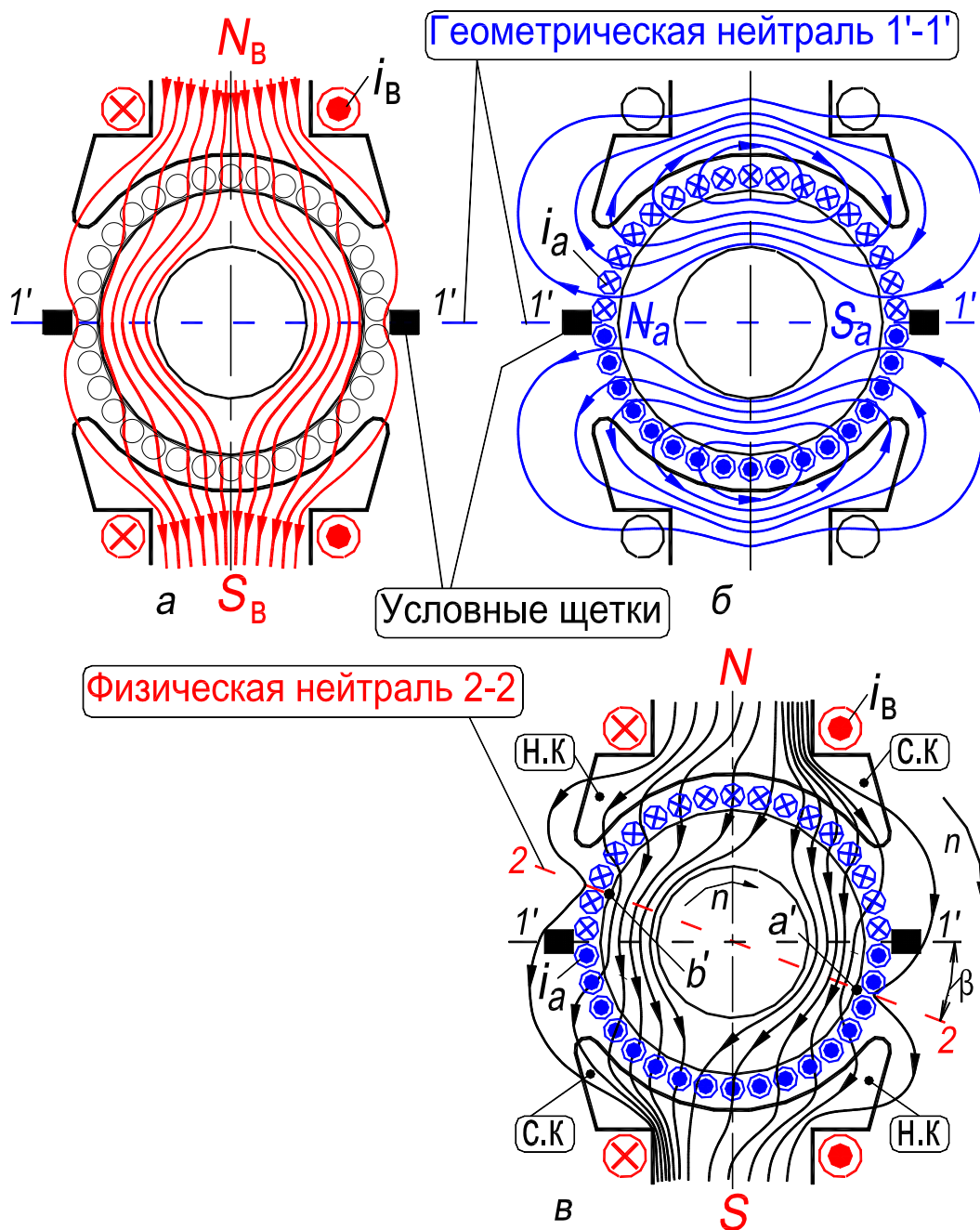
1) выше линии условных щеток электрический ток в проводниках обмотки якоря имеет одно и тоже направление, ниже этой линии ток имеет противоположное направление (см. рис. 6.3). Поэтому *поле якоря (вектор поля) всегда направлено по линии условных щеток;*

2) если условные щётки смещаются вдоль окружности якоря по направлению его вращения (или в противоположном направлении), то на такой же угол смещается и вектор поля якоря.

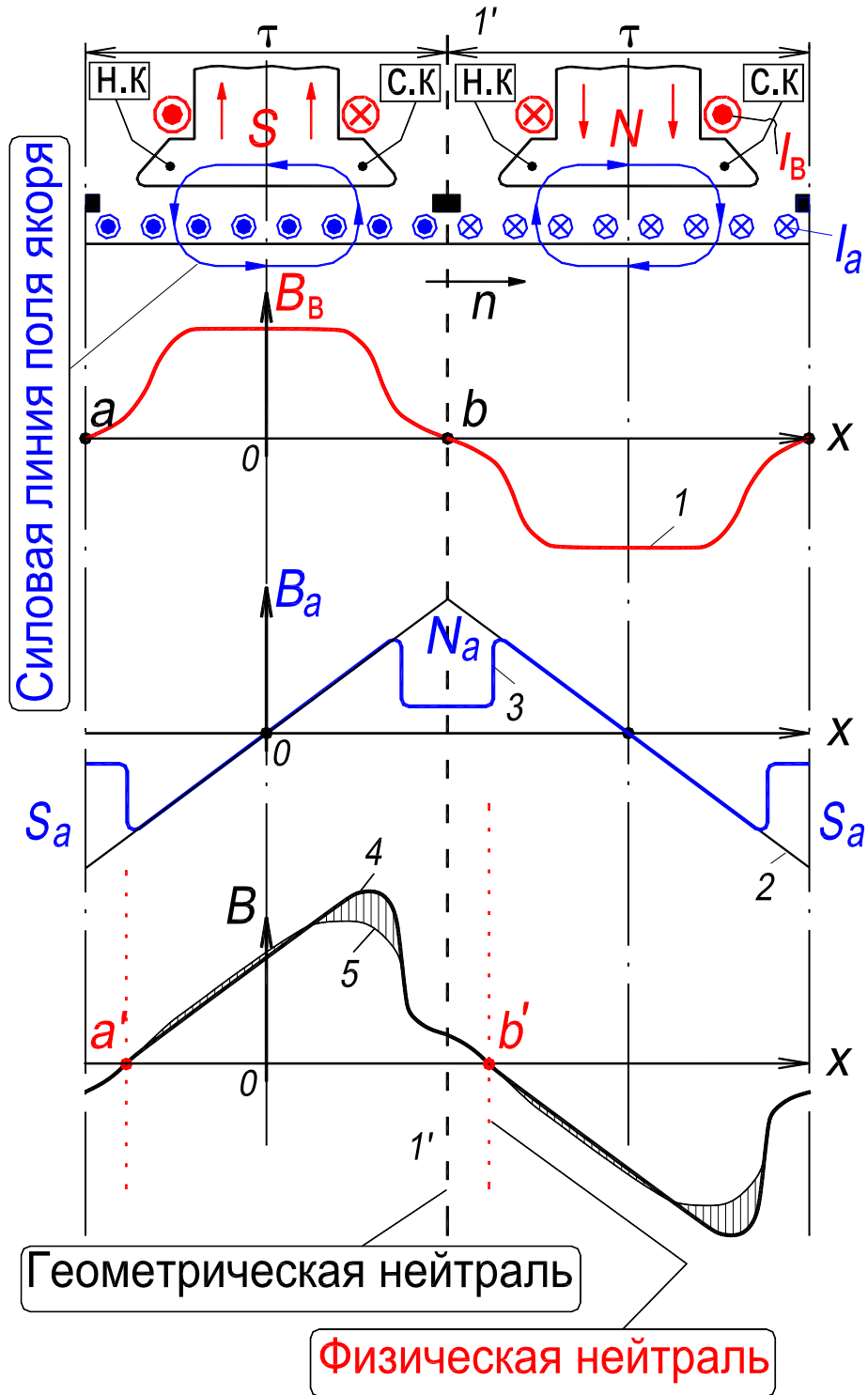
##### 3.1.1. Магнитное поле при нагрузке

При работе генератора постоянного тока вхолостую, без нагрузки, в нём существует только *магнитное поле главных полюсов*, которое создается при протекании по обмотке возбуждения постоянного тока. При нагрузке

к щёткам подключены потребители и по обмотке якоря протекает электрический ток, который создает *магнитное поле якоря*. Поэтому при нагрузке в генераторе устанавливается *результатирующее магнитное поле*, которое обусловлено совместным действием магнитодвижущих сил обмотки возбуждения и обмотки якоря, а также состоянием (насыщением) магнитной системы.



**Рис. 6.1. Картина магнитного поля:**  
 $a$  – обмотки возбуждения;  $б$  – обмотки якоря;  
 $в$  – результирующего, в режиме генератора



**Рис. 6.2. Распределение в пространстве магнитного поля:**  
 1 – обмотки возбуждения; 3 – обмотки якоря (2 – МДС обмотки якоря);  
 4 – результирующего поля машины в режиме генератора  
 при ненасыщенном магнитопроводе; 5 – при насыщенном магнитопроводе

На рис. 6.1,*а,б,в* приведены соответственно картины поля возбуждения, поля якоря и результирующего поля генератора постоянного тока. На рис. 6.2 показано, при развернутом в плоскость якоря, распределение вдоль полюсных делений  $\tau$ : поля возбуждения (кривая 1), МДС и поля якоря (кривые 2 и 3) и результирующего поля (кривая 4, она соответствует ненасыщенной магнитной системе; кривая 5 – насыщенной). На рис. 6.1 и 6.2 показаны условные щётки, расположенные на линии геометрической нейтрали.

Как видно из рис. 6.2 поле возбуждения (кривая 1) распределяется вдоль полюсного деления примерно по трапецеидальному закону, причем в точках *a* и *b* поле возбуждения проходит через нуль. На рис. 6.2 показано, что распределение поля якоря (кривая 3) вдоль полюсных делений имеет седлообразный характер. Уменьшение индукции поля якоря между полюсами обусловлено увеличением магнитного сопротивления на этих участках. Как следует из сопоставления рис. 6.1,*а* и 6.1,*б*, а также из сопоставления кривых 1 и 3 рис. 6.2, поле возбуждения и поле якоря сдвинуты в пространстве на  $90^\circ$ . Результирующее поле определено алгебраическим суммированием соответствующих ординат поля возбуждения и поля якоря (рис. 6.2, кривая 4). При этом предполагалось, что магнитная система не насыщена. Как следует из рис. 6.2 результирующее поле, в отличие от поля возбуждения, проходит через нуль в точках *a'* и *b'*, причем эти точки смещены с линии геометрической нейтрали по направлению вращения якоря генератора постоянного тока.

*Воображаемая прямая линия проходящая через точки  $a'$  и  $b'$ , в которых результирующее поле равно нулю, называется физической нейтралью.*

Таким образом, *общий вывод: физическая нейтраль смещается в генераторе постоянного тока по направлению вращения якоря (рис. 6.1,*в* и 6.2).*

Очевидно, что при изменении величины нагрузки (то есть при изменении тока обмотки якоря и соответственно поля якоря) положение физической нейтрали, а также положение точек *a'* и *b'* в которых результирующее поле равно нулю, будет изменяться.

### **3.1.2. Продольная и поперечная реакция якоря**

Как отмечено выше, влияние поля якоря на поле возбуждения называется реакцией якоря (термины 53, 54 и 55, с. 23). *Влияние поля якоря,*

то есть реакция якоря, в машине постоянного тока зависит от положения щеток на коллекторе (напомним, что в синхронной машине реакция якоря зависит от характера нагрузки, подключенной к обмотке якоря [5, с. 67, сл.]).

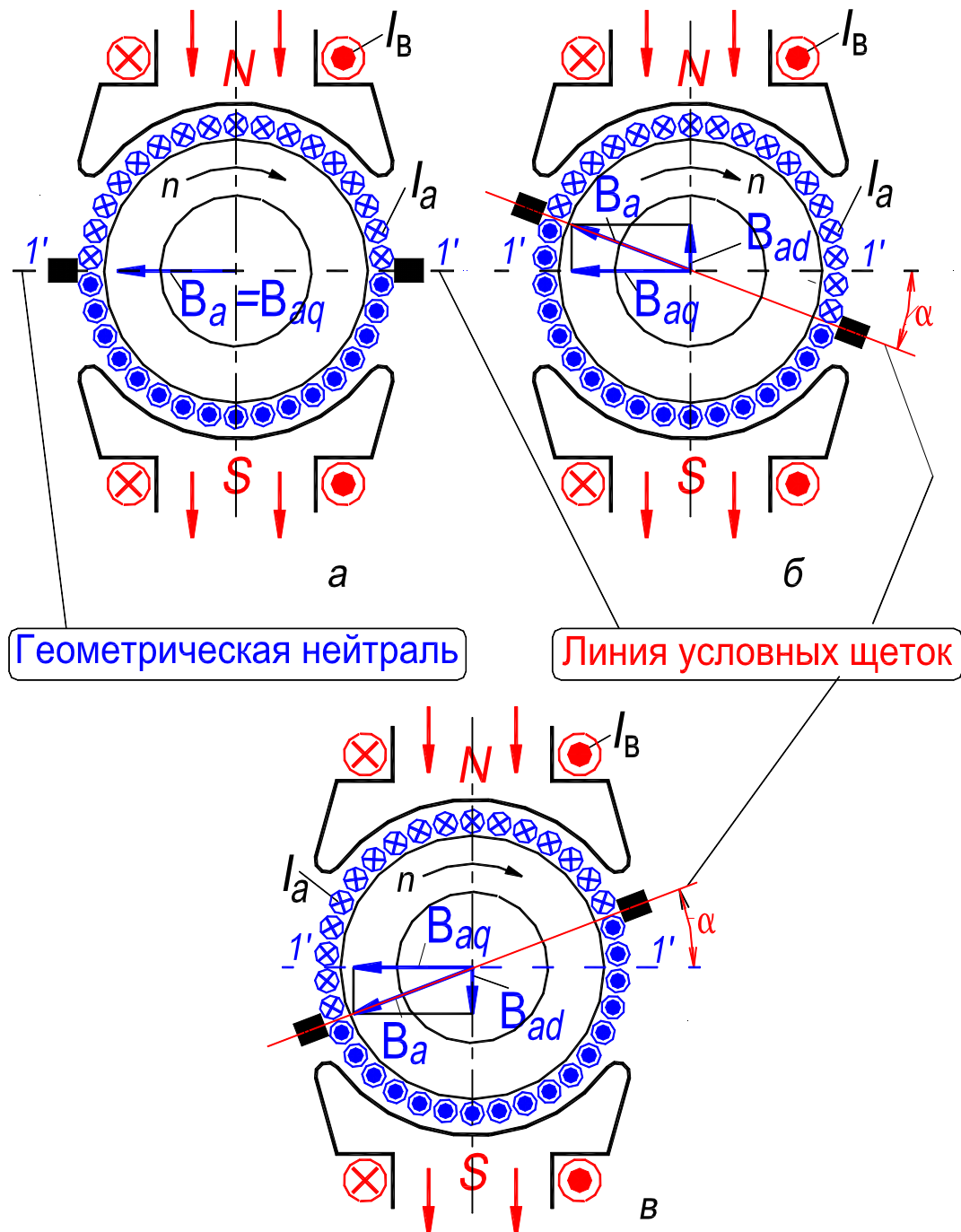


Рис. 6.3. Действие реакции якоря в генераторе постоянного тока:

*a* – щётки расположены по линии геометрической нейтрали (г. н.);

*б* – щётки смещены с г. н. по направлению вращения якоря;

*в* – щётки смещены с г. н. против направлению вращения якоря

Различают три положения щеток на коллекторе:

- 1) щётки находятся на линии геометрической нейтрали (рис. 6.3,а),
- 2) щётки сдвинуты с геометрической нейтрали *по* направлению вращения якоря (рис. 6.3,б),
- 3) щётки сдвинуты с геометрической нейтрали *против* направления вращения якоря (рис. 6.3,в).

Если *щётки расположены на линии геометрической нейтрали, то реакция якоря является поперечной*, то есть поле якоря действует поперек оси главных полюсов, по линии геометрической нейтрали (векторы поля якоря  $B_a = B_{aq}$  на рис. 6.3,а). При этом, если магнитная система не насыщена, то результирующее магнитное поле не изменяется по величине, но искажается форма распределения поля на полюсных делениях (см. рис. 6.2, кривая 4). Если же магнитная система насыщена, то *результирующее магнитное поле несколько уменьшается* и искажается форма распределения поля на полюсных делениях, то есть в этом случае поперечная реакция якоря оказывает размагничивающее действие (рис. 6.2, кривая 5; см. разд. 3.1.2.1).

Если *щётки смещены с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря, то реакция якоря в генераторе является продольной и размагничивающей* (рис. 6.3,б), то есть поле якоря действует вдоль оси главных полюсов навстречу полю возбуждения. Результирующее поле генератора уменьшается (см. разд. 3.1.2.2, с. 88).

Если щётки сдвинуты с геометрической нейтрали *против направления вращения якоря, то реакция якоря в генераторе является продольной и намагничивающей* (рис. 6.3,в), то есть поле якоря действует вдоль оси главных полюсов в том же направлении, что и поле возбуждения. Результирующее поле генератора увеличивается (см. разд. 3.1.2.3, с. 89).

### **3.1.2.1. Поперечная реакция**

Щётки расположены на геометрической нейтрали (рис. 6.3,а).

На рис. 6.1 и 6.2 аббревиатурами “с. к.” и “н. к.” обозначены соответственно “сбегающий край” полюса и “набегающий край” полюса. Так эти части полюса названы в связи со следующим: если представить, что на якоре расположился неподвижный относительно якоря наблюдатель, то на наблюдателя, при вращении якоря, будет набегать край полюса обозначенный “н. к.” и удаляться край полюса обозначенный “с. к.”.



Из анализа рис. 6.1 и 6.2 следует что на сбегающем краю полюса поле возбуждения и поле якоря действуют согласно, а набегающем краю полюса они действуют встречно, то есть часть полюса обозначенная “с. к.” намагничивается, а часть полюса обозначенная “н. к.” размагничивается за счет действия реакции якоря.

Если магнитная система не насыщена, то намагничивающий и размагничивающий эффекты взаимно компенсируются и результирующее поле не изменяется по величине, но искажается по форме (см. рис. 6.1,в и 6.2, кривая 4).

Если же магнитная система насыщена, то намагничивающий и размагничивающий эффекты не компенсируются, причем сбегающий край полюса (“с. к.”) будет насыщен больше, чем набегающий край полюса (“н. к.”). Магнитное сопротивление насыщенных участков (край полюса “с. к.”) больше, чем сопротивление ненасыщенных участков (край полюса “н. к.”) магнитной цепи. Поэтому результирующее поле под сбегающим краем уменьшается в большей степени, чем оно увеличивается под набегающим краем, то есть результирующее поле уменьшается. В соответствии с изложенным, при расположении щеток на линии геометрической нейтрали и *насыщенной магнитной цепи* реакция якоря не только искажает результирующее поле, но и уменьшает его, то есть *оказывает размагничивающее действие* (см. рис. 6.2, кривая 5).

### **3.1.2.2. Продольная реакция якоря. Щётки сдвинуты с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря**

Как отмечалось выше (см. 2 и 3-й абзацы раздела 3.1, с. 82) поле якоря *всегда* направлено по линии условных щеток, которые располагаются на якоре. Такая ориентация поля якоря обусловлена тем, что с одной стороны воображаемой линии на которой находятся *условные* щётки ток в проводниках обмотки якоря *всегда* имеет одно направление, а с другой стороны этой линии – противоположное. Поэтому, если щётки поворачиваются на некоторый угол, то на такой же угол поворачивается и вектор поля якоря.

На рис. 6.3,б показан схематически генератор постоянного тока, причем условные щётки сдвинуты с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря, которое обозначено стрелкой с символом *n*. В проводниках обмотки якоря показано направление тока (знаки креста “*x*” и точки “*•*”), который обусловлен ЭДС, индуцируемой в обмотке полем возбуждения.

Направление вектора поля якоря  $\mathbf{B}_a$ , которое создано током якоря, определено по правилу буравчика.

Вектор поля якоря  $\mathbf{B}_a$  раскладывают на две составляющие: 1) продольная составляющая  $\mathbf{B}_{ad}$  – она направлена по продольной оси  $d$ , которая совпадает с осью главных полюсов; 2) поперечная составляющая  $\mathbf{B}_{aq}$  – она направлена по поперечной оси  $q$ , которая смещена относительно оси  $d$  на  $90^\circ$ . Как видно на рис. 6.3,б продольная составляющая  $\mathbf{B}_{ad}$  поля якоря действует навстречу полю возбуждения и таким образом уменьшает результирующее магнитное поле. Действие поперечной составляющей  $\mathbf{B}_{aq}$  описано в разд. 3.1.2.1, с. 87.

*Таким образом, в генераторе постоянного тока при сдвиге щеток с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря реакция якоря оказывает размагничивающее воздействие на результирующее поле и искажает его форму.*

### **3.1.2.3. Продольная реакция якоря. Щётки сдвинуты с геометрической нейтрали против направления вращения якоря**

На рис. 6.3,в показан схематически генератор постоянного тока, причем условные щётки сдвинуты с геометрической нейтрали против направления вращения якоря, которое обозначено стрелкой с символом  $n$ . В проводниках обмотки якоря показано направление тока (знаки крестика “ $\times$ ” и точки “ $\bullet$ ”), который обусловлен ЭДС, индуцируемой в обмотке полем возбуждения. Направление вектора поля якоря  $\mathbf{B}_a$ , которое создано током якоря, определено по правилу буравчика.

Вектор поля якоря  $\mathbf{B}_a$  раскладывается на две составляющие: 1) продольная составляющая  $\mathbf{B}_{ad}$  – она направлена по продольной оси  $d$ , которая совпадает с осью главных полюсов; 2) поперечная составляющая  $\mathbf{B}_{aq}$  – она направлена по поперечной оси  $q$ , которая смещена относительно оси  $d$  на  $90^\circ$ . Как видно на рис. 6.3,в продольная составляющая  $\mathbf{B}_{ad}$  поля якоря действует согласно с полем возбуждения и таким образом увеличивает результирующее магнитное поле. Действие поперечной составляющей  $\mathbf{B}_{aq}$  описано в разд. 3.1.2.1, с. 87.

*Таким образом, в генераторе постоянного тока при сдвиге щеток с геометрической нейтрали против направления вращения якоря реакция якоря оказывает намагничивающее воздействие на результирующее поле и искажает его форму.*

## 3.2. Коммутация в генераторе постоянного тока

Определение. *Процесс перехода (переключения) секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и явления ему сопутствующие называется коммутацией* (термин 57, с. 23). Переходящая секция называется *коммутируемой секцией*. Процесс переключения секций сопровождается *искрением под щётками*, что влияет на надежность работы генератора.

Как отмечалось в разд. 4.4, с. 51, сл. в процессе вращения якоря секции обмотки якоря переходят из одной параллельной ветви в другую. В этих секциях изменяется направление ЭДС и тока на противоположное, так как секции переходят из-под главного полюса одной полярности под главный полюс другой полярности. Переходящие секции в период перехода замыкаются щётками накоротко.

### 3.2.1. Период коммутации

При коммутации ток в секции изменяет свое направление от  $+I_a$  до  $-I_a$ , где  $I_a$  – ток в параллельной ветви обмотки якоря. Время в течение которого ток изменяет свое направление и соответственно секция переходит из одной параллельной ветви в другую называется *периодом коммутации*  $T_K$  (термин 63, с. 24; рис. 6.4,а).

Так как в период коммутации коммутируемая секция замкнута накоротко щёткой, то этот период можно определить как время перемещения коллектора на ширину щётки  $b_{щ}$ :

$$T_K = b_{щ}/v_K, \quad (6.1)$$

где  $v_K$  – окружная скорость коллектора:

$$v_K = \pi D_K n = b_K K n, \quad (6.2)$$

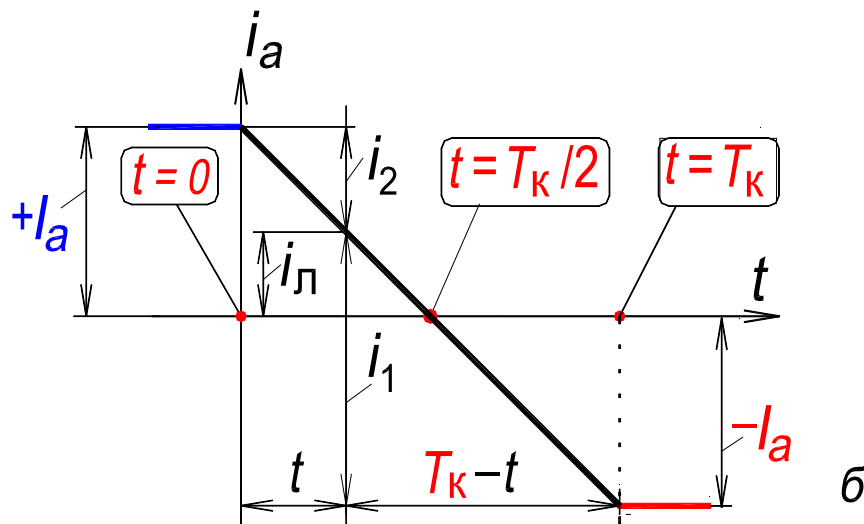
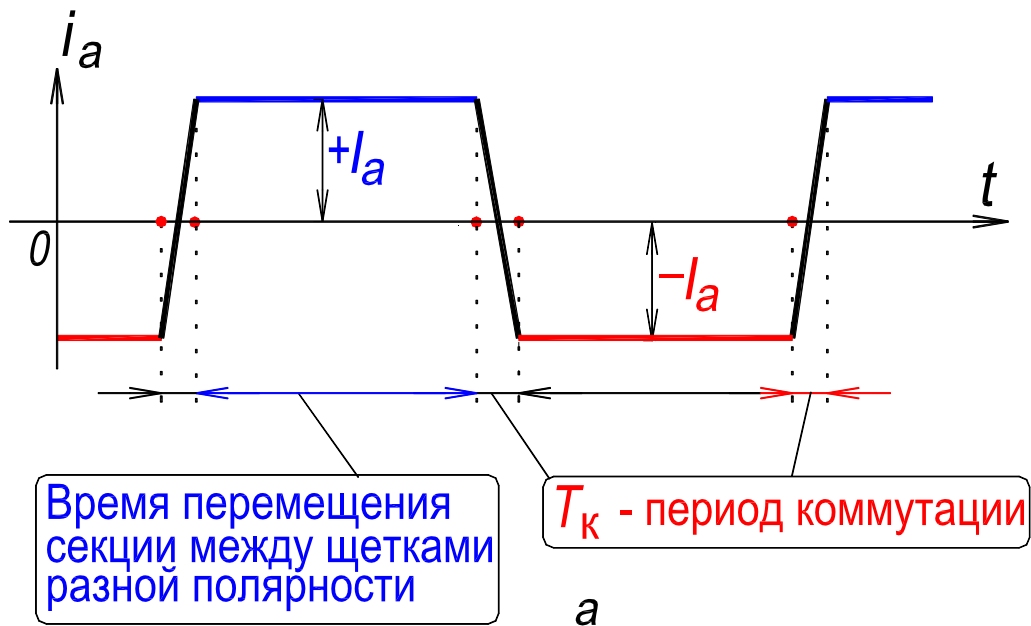
здесь  $D_K$  – диаметр коллектора,  $b_K$  – ширина коллекторной пластины,  $K$  – число коллекторных пластин.

Тогда

$$T_K = b_{щ}/b_K K n = \beta_K / K n, \quad (6.3)$$

где  $\beta_K = b_{щ}/b_K$  – коэффициент щеточного перекрытия (для машин общепромышленного исполнения  $\beta_K = 2 \dots 4$ , а при сложных петлевых обмотках  $\beta_K$  достигает 7).

При  $K = 100$ ,  $n = 1500$  об/мин = 25 об/с и  $\beta_K = 2,5$  в машине с простой петлевой обмоткой якоря  $T_K = 0,001$  с. Таким образом, частота изменения тока в коммутируемой секции  $f_K = 1/T_K$  и соответственно частота всех коммутационных процессов находится в пределах 1000...3000 Гц. Заметим, что частота изменения ЭДС и тока в параллельной ветви существенно меньше и определяется по формуле (4.4), с. 41.



**Рис. 6.4. Изменение тока в секции обмотки якоря:**  
 а – в процессе вращения якоря; б – за период коммутации  
 (без учета ЭДС в коммутируемой секции)

### 3.2.2. Процесс перехода секции обмотки якоря

На рис. 6.5, лист 1 и 2 показан процесс перехода секции  $l$  простой петлевой обмотки из одной параллельной ветви в другую. На рис. 6.5, лист 1 зафиксировано пять следующих друг за другом положений якоря и показано распределение токов при коммутации этой секции. Для упрощения анализа рассматривается коммутационный процесс при ширине щётки  $b_{щ}$  равной ширине коллекторной пластины  $b_k$ . Именно в этом случае будет коммутировать только одна секция.

На рис. 6.5 обозначены набегающий край щётки – “н. к.” и сбегающий край щётки – “с. к.” Набегающий край щётки это та её часть, которая замыкает коммутируемую секцию в момент начала коммутационного процесса и соответственно набегаёт на пластину 2. Сбегающий край щётки это та её часть, которая сходит с коллекторной пластины 1 и размыкает в момент схода замкнутый коммутируемый контур (секция  $l$ ).

На рис. 6.5, лист 1 приняты обозначения:  $2I_a$  – ток в нагрузке (этот ток протекает через щётку и он равен сумме токов двух параллельных ветвей);  $+I_a, -I_a$  – токи двух параллельных ветвей;  $i_1, i_2$  – токи, протекающие в щеточном контакте под сбегающим и набегающим краями щётки и в соответствующих коллекторных пластинах;  $i_k = i_{л}$  – ток коммутации в замкнутой коммутируемой секции, который накладывается на токи  $I_a$  параллельных ветвей.

Обозначим сопротивление переходного контакта между набегающим краем щётки и частью второй коллекторной пластины  $r_{щ2}$ , а сопротивление переходного контакта между сбегающим краем щётки и частью первой коллекторной пластины  $r_{щ1}$ . Будем считать, что эти сопротивления зависят только от величины площади перекрытия  $S_{щ1}$  и  $S_{щ2}$  коллекторной пластины соответственно сбегающим и набегающим краем щётки. При этом предполагаем, что токи  $i_1$  и  $i_2$  распределяются равномерно и пропорционально площадям  $S_{щ1}$  и  $S_{щ2}$ . Сопротивление переходного контакта между всей щёткой и данной коллекторной пластиной обозначим  $r_{щ}$ .

В соответствии с рис. 6.5 проанализируем, как происходит изменение указанных выше токов в период коммутации коммутируемой секции  $l$ .

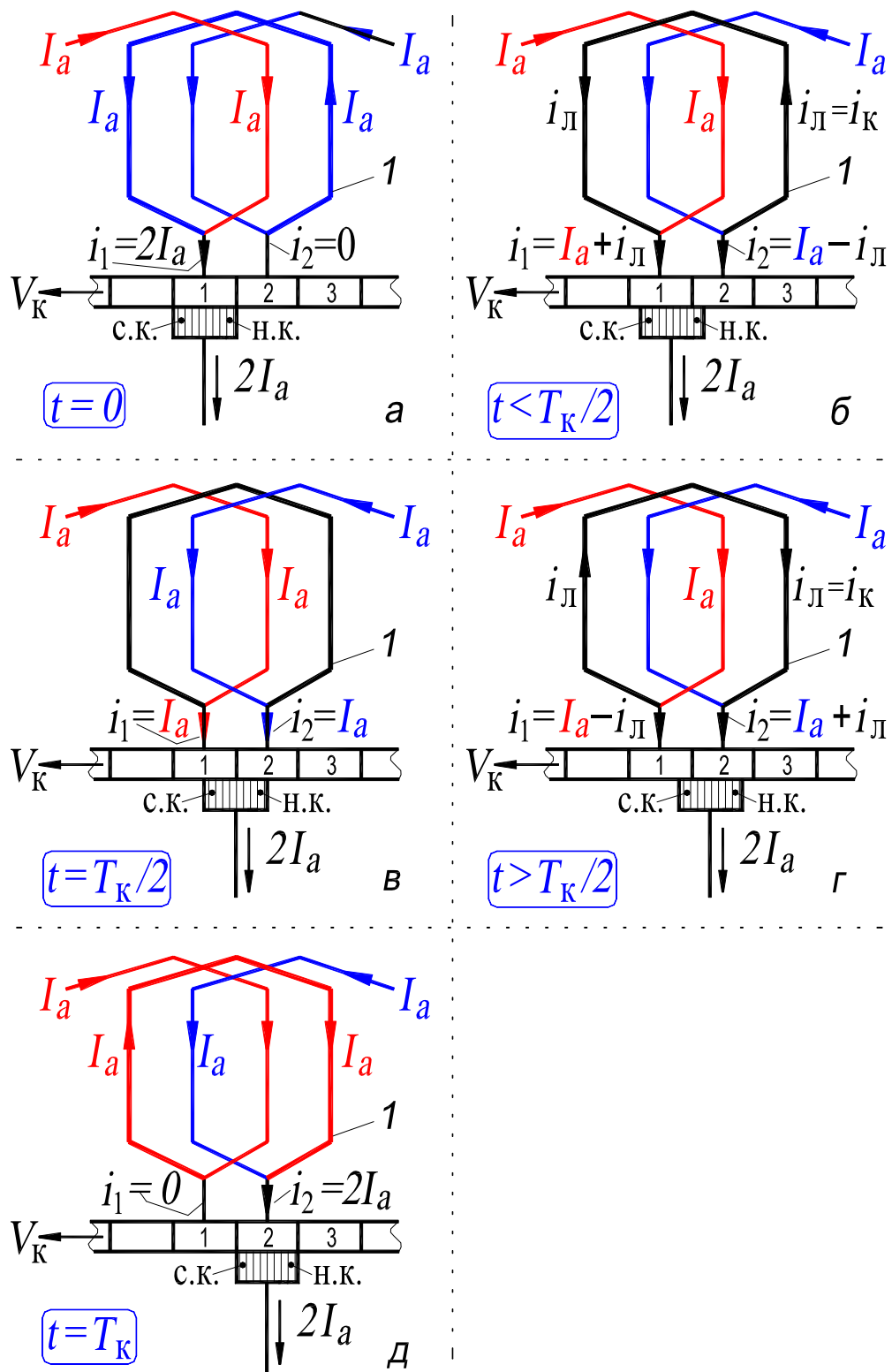
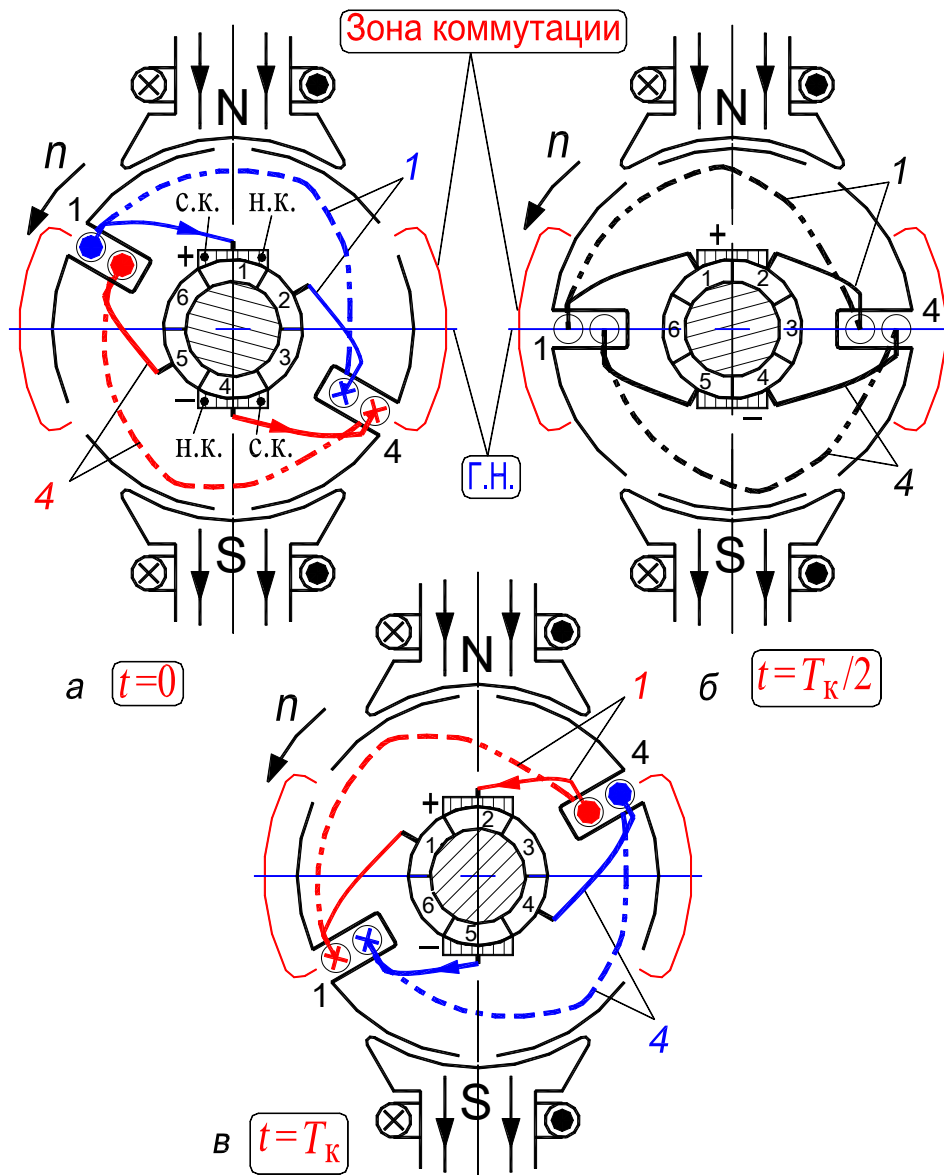


Рис. 6.5, лист 1. Процесс перехода секции 1 простой петлевой обмотки из одной параллельной ветви (обозначена синим цветом) в другую (обозначена красным цветом) /развернутая схема обмотки/



**Рис. 6.5, лист 2. Процесс перехода секции 1 простой петлевой обмотки из одной параллельной ветви (обозначена синим цветом) в другую (обозначена красным цветом); одновременно с секцией 1 коммутирует секция 4 /радиальная схема обмотки/**

**Рис. 6.5, лист 1, а и 2, а** соответствует моменту начала коммутации секции 1,  $t = 0$ . При этом секция 1 еще входит в “правую” параллельную ветвь обмотки якоря (эта ветвь показана синим цветом) и в ней протекает ток  $+I_a$ . Через коллекторную пластину 1 и щётку протекает ток нагрузки  $2I_a$ , который равен току  $i_1$ . В щеточном контакте этому току оказывается сопротивление  $r_{щ}$ . Через коллекторную пластину 2 ток не протекает,  $i_2 = 0$ .

**Рис. 6.5**, лист 1,*б* соответствует текущему времени  $0 < t < T_k/2$  ( $T_k$  – период коммутации, он равен отрезку времени за который щётка перейдет с коллекторной пластины 1 на пластину 2, а секция 1 перейдет из одной параллельной ветви в другую). При этом сопротивление щеточного контакта  $r_{щ2}$  больше чем сопротивление щеточного контакта  $r_{щ1}$ ,  $r_{щ2} > r_{щ1}$ . В связи с таким соотношением между сопротивлениями, токи в щеточных контактах определяются формулами:

$$i_1 = I_a + i_k, \quad i_2 = I_a - i_k,$$

где  $i_k = i_l$  – ток в коммутируемой секции. Очевидно, что через щётку и в нагрузке протекает ток  $2I_a = i_1 + i_2$ .

**Рис. 6.5**, лист 1,*в* и 2,*б* соответствует моменту времени  $t = T_k/2$  (середина периода коммутации). При этом сопротивление щеточного контакта  $r_{щ2}$  равно сопротивлению щеточного контакта  $r_{щ1}$ ,  $r_{щ2} = r_{щ1}$ . В связи с таким соотношением между сопротивлениями, токи в щеточных контактах определяются формулами:

$$i_1 = I_a, \quad i_2 = I_a.$$

Очевидно, что в этот момент времени ток в коммутируемой секции равен нулю,  $i_k = i_l = 0$ , а через щётку и в нагрузке протекает ток  $2I_a = i_1 + i_2$ .

**Рис. 6.5**, лист 1,*г* соответствует текущему времени  $T_k > t > T_k/2$ . При этом сопротивление щеточного контакта  $r_{щ2}$  меньше, чем сопротивление щеточного контакта  $r_{щ1}$ ,  $r_{щ2} < r_{щ1}$ . В связи с таким соотношением между сопротивлениями, токи в щеточных контактах определяются формулами:

$$i_1 = I_a - i_k, \quad i_2 = I_a + i_k,$$

где  $i_k = i_l$  – ток в коммутируемой секции. Замечаем, что *направление тока в коммутируемой секции изменилось на противоположное*. Очевидно, что величина тока, протекающего через щётку и в нагрузке не изменилась, то есть  $2I_a = i_1 + i_2$ .

**Рис. 6.5**, лист 1,*д* и 2,*в* соответствует моменту окончания коммутации секции 1,  $t = T_k$ . При этом секция 1 уже входит в “левую” параллельную ветвь обмотки якоря (эта ветвь показана красным цветом) и в ней протекает ток  $-I_a$ . Через коллекторную пластину 2 и щётку протекает ток нагрузки  $2I_a$ , который равен току  $i_2$ . В щеточном контакте этому току оказывается сопротивление  $r_{щ}$ . Через коллекторную пластину 1 ток не протекает,  $i_1 = 0$ . Как видно из рис. 6.5,



в диапазоне времени  $0 < t < T_k$  коммутируемая секция  $l$  замкнута, при этом она не участвует в создании ЭДС параллельной ветви.

На этом процесс коммутации секции  $l$  закончился (одновременно с секцией  $l$  коммутировала секция  $4$ ; рис. 6.5, лист 2), в результате:

- 1) эта секция перешла из под главного полюса одной полярности под главный полюс другой полярности;
- 2) секция переключилась из одной параллельной ветви в другую;
- 3) направление тока в ней изменилось на противоположное.

Затем начинает коммутировать 2 и 5-я секции, затем 3 и 6-я, затем опять 1 и 2-я, и т. д. (рис. 6.5, лист 2).

Очевидно, что при принятом выше допущении – *переходные сопротивления щеточных контактов  $r_{щ1}$  и  $r_{щ2}$  зависят только от величины площади перекрытия (сечения) коллекторной пластины соответствующим краем щётки* – ток  $i_k = i_{п} = i_{л}$  в коммутируемой секции будет изменяться во времени по линейному закону, где  $i_{п} = i_{л}$  – переходный ток (рис. 6.4,б и рис. 6.5, лист 1). При таком допущении также плотность тока  $i_1$  под сбегющим краем щётки и плотность тока  $i_2$  под набегающим краем щётки будут равны,  $j_{щ1} = j_{щ2}$ . Последнее равенство обусловлено тем, что ток в щеточном контакте и площадь сечения этого контакта, при принятом допущении, будут изменяться одинаково.

### 3.2.3. Уравнение коммутационного процесса

Это уравнение представляет собой зависимость изменения тока в коммутируемой секции от времени,  $i_k = f(t)$ . Оно выводится на основе второго закона Кирхгофа, согласно которому уравнение напряжений по замкнутому контуру коммутируемой секции записывается в виде:

$$\sum_i e_i = \sum_j i_j r_j, \quad (6.4)$$

где  $e_i$  – одна из ЭДС, индуцируемых в коммутируемой секции;  $i_j$  и  $r_j$  – ток и сопротивление на  $j$ -м участке контура.

Будем учитывать только переходные сопротивления щеточных контактов  $r_{щ1}$  и  $r_{щ2}$  и падения напряжения в них. В этом случае, после ряда преобразований, уравнение коммутационного процесса записывается в виде:

$$i_{\text{к}} = \frac{\sum e_i}{r_{\text{щ}} T_{\text{к}}^2} (T_{\text{к}} - t)t + i_a \left( 1 - 2 \frac{t}{T_{\text{к}}} \right) = i_{\text{д}} + i_{\text{п}}, \quad (6.5)$$

где  $t$  – это текущее время в процессе перехода секции из одной параллельной ветви в другую,  $0 \leq t \leq T_{\text{к}}$ ;  $i_{\text{п}} = i_{\text{л}}$  – переходный ток в коммутируемой секции. Процесс изменения тока  $i_{\text{л}}$  рассмотрен в разд. 3.2.2, с. 92, сл. и представлен на рис. 6.5;  $i_{\text{д}}$  – добавочный ток в замкнутой коммутируемой секции, который обусловлен действием ЭДС, индуцируемых в ней.

### 3.2.4. Электродвижущие силы, индуцируемые в коммутируемой секции

В замкнутой коммутируемой секции могут индуцироваться следующие ЭДС: 1) ЭДС самоиндукции, 2) ЭДС взаимной индукции, 3) ЭДС вращения (рис. 6.6).

ЭДС самоиндукции  $e_l$  индуцируется потоком самоиндукции коммутируемой секции, который обусловлен током  $i_{\text{п}} = i_{\text{л}}$ . В соответствии с правилом Э.Х. Ленца эта ЭДС препятствует изменению тока в коммутируемой секции, то есть замедляет коммутацию.

ЭДС взаимной индукции  $e_m$  индуцируется магнитным потоком взаимной индукции, который обусловлен токами, протекающими в нескольких одновременно переключаемых секциях из одной ветви в другую, что имеет место при ширине щётки  $b_{\text{щ}}$  большей ширины коллекторной пластины  $b_{\text{к}}$ . Очевидно, что и эта ЭДС препятствует изменению тока в переключаемых секциях, то есть замедляет коммутацию.

Сумма ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции обозначается  $e_p$  и называется *реактивной ЭДС* (термин 83, с. 27).

ЭДС вращения  $e_{\text{вр}}$  (термин 85, с. 27) индуцируется неподвижным в пространстве внешним магнитным полем, которое ориентируется вдоль поперечной оси в *зоне коммутации*, где происходит изменение тока в коммутируемой секции (рис. 6.5, лист 2). Это поле (см. рис. 6.2, кривая 3) создается током обмотки якоря, а также рядом обмоток, которые действуют по поперечной оси. Одной из них является обмотка добавочных полюсов (рис. 4.4, позиции 7 и 9; с. 46 и 47). *Знак ЭДС вращения можно изменять сдвигая щётки с геометрической нейтрали по направлению (или против направления) вращения якоря, а также изменяя полярность добавочных полюсов.* Следовательно, ЭДС вращения может быть направлена навстречу реактивной ЭДС и компенсировать её.

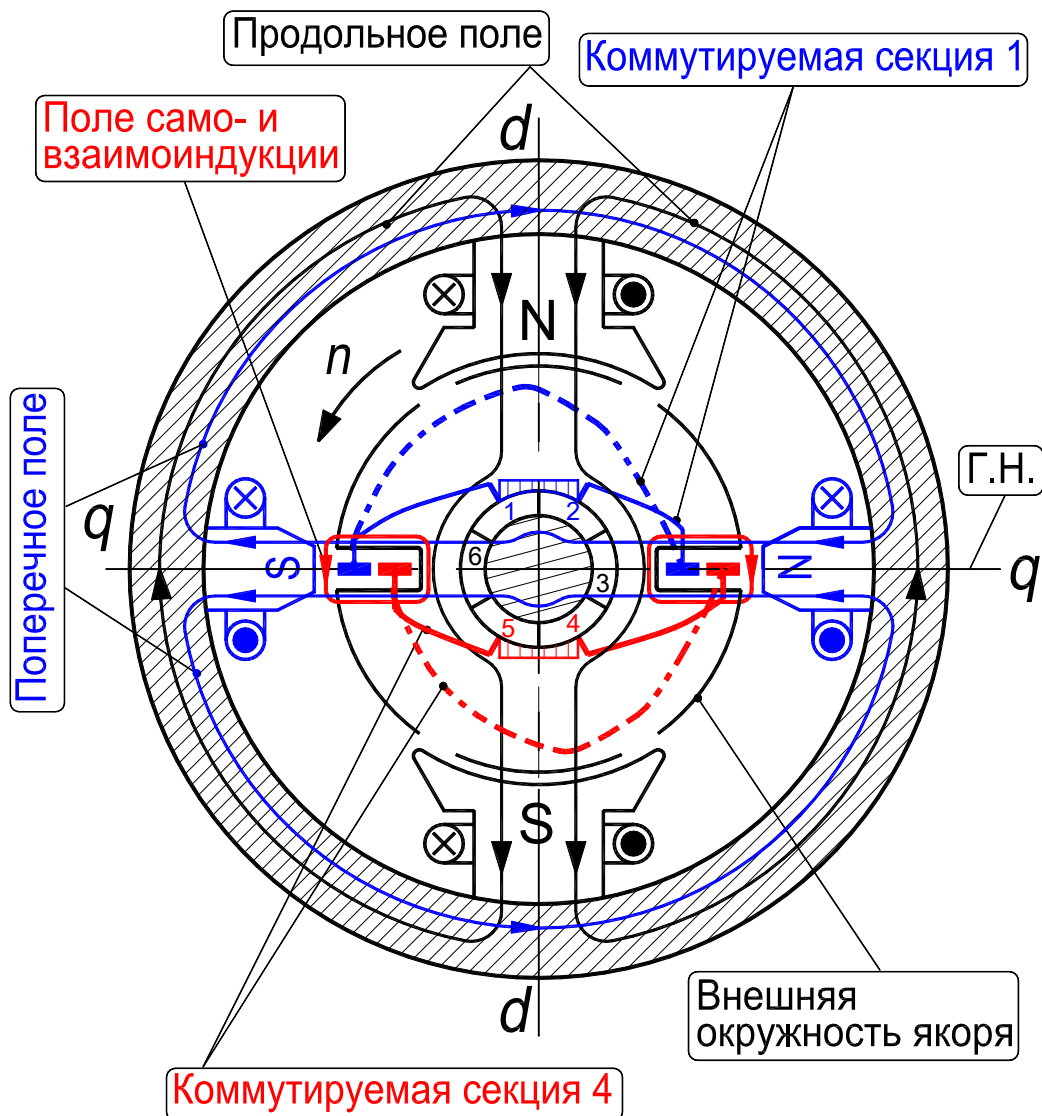


Рис. 6.6. Иллюстрация к вопросу об ЭДС, индуцируемых в коммутируемой секции

*Зоной коммутации* называется дуга окружности якоря, в пределах которой перемещаются стороны коммутируемой секции в период коммутации (термин 82, с. 26; рис. 6.5, лист 2). Длина этой дуги должна быть не больше 50...60 % расстояния между полюсными наконечниками соседних главных полюсов. В противном случае коммутируемые секции попадают в область сильного поля главных полюсов и условия коммутации резко ухудшаются.

Кроме перечисленных, в коммутируемой секции могут индуцироваться ЭДС за счет изменения тока возбуждения в переходном режиме или за счет возможных пульсаций его (термин 84, с. 27). Эти ЭДС, при дальнейшем анализе процесса коммутации, приниматься во внимание не будут.

Таким образом, сумма ЭДС, индуцируемых в замкнутой коммутируемой секции и обуславливающих протекание в ней добавочного тока коммутации  $i_d$  (см. уравнение (6.5)), записывается в виде:

$$\sum e_i = (e_l + e_m) \pm e_{вр} = e_p \pm e_{вр}. \quad (6.6)$$

Реактивная ЭДС и ЭДС вращения могут складываться или вычитаться, при этом  $e_p$  может быть больше или меньше  $e_{вр}$ . Это влияет на характер коммутации машины и на искрение под щётками.

### 3.2.5. Виды коммутации

#### 3.2.5.1. Прямолинейная коммутация

Если предположить, что в коммутируемой секции не индуцируются ЭДС,  $\sum e_i = 0$ , то ток в секции определяется из уравнения (6.5) линейной зависимостью (термин 58, с. 23):

$$i_k = i_a \left( 1 - 2 \frac{t}{T_k} \right) = i_{п} = i_{л}. \quad (6.7)$$

Значение тока  $i_k = i_{п} = i_{л}$  определяется только переходными сопротивлениями щеточных контактов  $r_{щ1}$  и  $r_{щ2}$ . Характер изменения тока коммутации  $i_k = i_{п}$  во времени представлен на рис. 6.4,а,б (на этом рисунке ток коммутации  $i_k = i_{п}$  обозначен  $i_{л}$ , что подчеркивает линейный характер изменения его во времени). В течение первой половины периода коммутации он имеет одно направление, а в течение второй половины периода коммутации – противоположное. Как следует из рисунка, в процессе коммутации ток  $i_2$  под набегающим краем щётки увеличивается от нуля до  $2I_a$ , а ток  $i_1$  под сбегающим краем щётки уменьшается от  $2I_a$  до нуля. Причем, ток  $i_2$  с течением времени возрастает настолько, насколько увеличивается часть сечения щётки  $S_{щ2}$  через которую он протекает, а ток  $i_1$  с течением времени уменьшается настолько, насколько уменьшается другая часть сечения щётки  $S_{щ1}$  через которую этот ток протекает. По этой причине при прямолинейной коммутации плотности тока  $i_1$  и  $i_2$  под сбегающим и набегающим краями щётки взаимно равны и не изменяются в процессе коммутации:

$$j_{щ1} = i_1 / S_{щ1} = j_{щ2} = i_2 / S_{щ2} = \text{const}. \quad (6.8)$$

### 3.2.5.2. Коммутация с учетом ЭДС в коммутируемой секции

Ограничимся рассмотрением процесса при ширине щётки  $b_{щ}$  равной ширине коллекторной пластины  $b_k$ . Это означает, что ЭДС взаимоиндукции отсутствует,  $e_m = 0$ , а сумма ЭДС, индуцируемых в коммутируемом контуре, определяется значениями ЭДС самоиндукции  $e_l$  и ЭДС вращения  $e_{вр}$ ,  $\sum e_i = e_l \pm e_{вр}$ .

При учете ЭДС, на переходный ток коммутации  $i_{п} = i_l$  накладывается добавочный ток коммутации  $i_d$  /см. уравнение (6.5)/

$$i_d = \sum e_i / \sum r_k = (e_l \pm e_{вр}) / \sum r_k, \quad (6.9)$$

где  $\sum r_k$  – сумма сопротивлений цепи коммутируемой секции.

По правилу Э.Х. Ленца ЭДС самоиндукции  $e_l$  всегда препятствует изменению тока в коммутируемой секции и, следовательно, замедляет процесс изменения тока в этой секции, то есть замедляет коммутацию (по сравнению с прямолинейной коммутацией). ЭДС вращения  $e_{вр}$  может быть направлена согласно или встречно по отношению к  $e_l$  (это учитывается в формуле (6.9) знаками “+” и “-”). В первом случае (знак “+”) коммутация еще более замедляется, что нежелательно. Во втором (знак “-”) – коммутация ускоряется по сравнению с прямолинейной.

При *замедленной коммутации*  $\sum e_i > 0$  (термин 60, с. 24), то есть ЭДС вращения не компенсирует реактивную ЭДС. Наихудший случай, если ЭДС вращения и реактивная ЭДС складываются. Это имеет место, когда щётки установлены на геометрической нейтрали, добавочных полюсов нет, а поток поперечной реакции якоря наводит ЭДС одного знака с реактивной ЭДС. При *замедленной коммутации* добавочный ток коммутации  $i_d$  направлен против увеличивающегося тока  $i_2$  и уменьшающегося тока  $i_1$  (рис. 6.7,а и б). При этом ток в коммутируемой секции изменяется медленнее, чем при прямолинейной коммутации (ей соответствует на рис. 6.7,б пунктирная линия). За счет направления тока  $i_d$  плотность тока при *замедленной коммутации* под сбегающим краем щётки будет на протяжении периода коммутации  $T_k$  больше, а под набегающим краем щётки меньше, чем плотность тока при прямолинейной коммутации.

Сбегающий край щётки размыкает замкнутый коммутируемый контур, что эквивалентно разрыву активно-индуктивной цепи тока при помощи рубильника. Поэтому под сбегающим краем щётки возникает искрение. Этому способствует и увеличение плотности тока под сбегающим краем щётки.

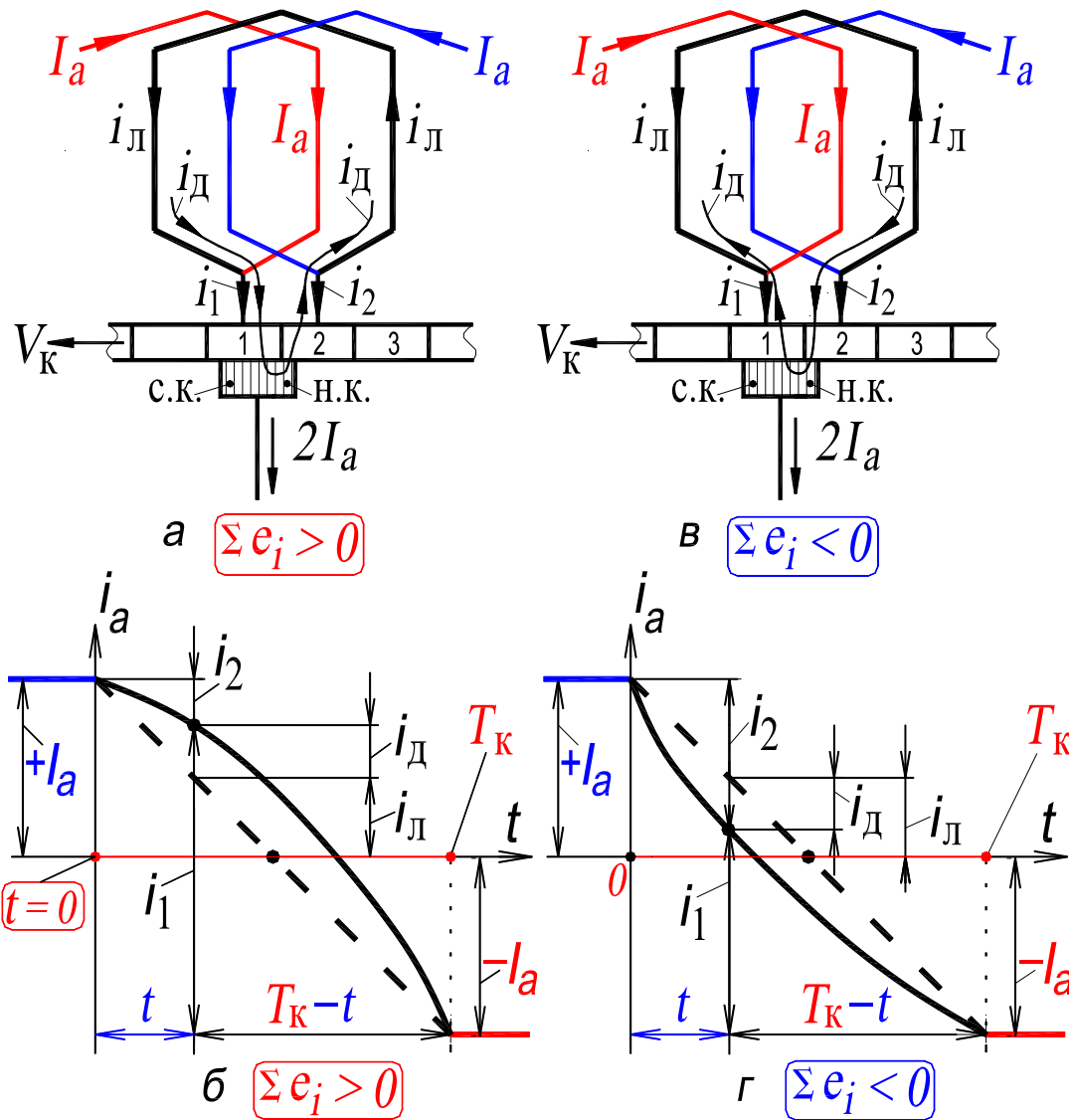


Рис. 6.7. Иллюстрация изменения тока в коммутируемой секции:  
 а и б – замедленная коммутация; в и г – ускоренная коммутация

При ускоренной коммутации  $\sum e_i < 0$  (термин 59, с. 23), то есть ЭДС вращения компенсирует реактивную ЭДС. При ускоренной коммутации добавочный ток коммутации  $i_{Д}$  меняет свой знак (рис. 6.7, в и г) и ток в коммутируемой секции изменяется быстрее, чем при прямолинейной коммутации

(ей соответствует на рис. 6.7,г пунктирная линия). Плотность тока при *ускоренной коммутации* под набегающим краем щётки уже в начале периода *ускоренной* коммутации становится больше, чем плотность тока при *прямолинейной* коммутации.

Вместе с тем, сильного искрения под набегающим краем щётки не наблюдается, так как процесс замыкания активно-индуктивной цепи тока всегда легче, чем её разрыв. К концу процесса коммутации плотность тока под сбегающим краем щётки невелика и размыкание замкнутой коммутируемой секции сбегающим краем щётки происходит в благоприятных условиях.

Таким образом, замедленная коммутация является неблагоприятной и нежелательной. Наоборот, *слегка ускоренная коммутация благоприятна*, и на практике стремятся достичь именно такой коммутации.

### **3.2.6. Основные причины искрения**

Если считать коллектор в механическом отношении совершенным (отсутствие эллиптичности формы коллектора; отдельные коллекторные пластины не выступают над поверхностью цилиндра и др.), то различают две основные причины искрения под щётками: 1) причина искрения электромагнитного характера; 2) причина искрения потенциального характера.

Считают, что *основной причиной искрения электромагнитного характера является запас электромагнитной энергии  $L_k i_d^2 / 2$* , где  $L_k$  – индуктивность коммутируемого контура;  $i_d$  – добавочный ток коммутации. Разряд электромагнитной энергии соответствующий этому току и является одной из причин искрения на *сбегающем* краю щётки, который разрывает замкнутый коммутируемый контур.

*Причина искрения потенциального характера заключается в увеличении напряжения между соседними коллекторными пластинами до недопустимых значений.* Если это напряжение составляет 30...50 В и коллектор загрязнен графитной пылью вследствие срабатывания щеток, то могут возникнуть на коллекторе устойчивые дуговые разряды из-за пробоя изоляционных промежутков между отдельными пластинами. Эти разряды могут перейти в “круговой огонь по коллектору” – это электрическая дуга, которая замыкает щётки разной полярности (термин 61, с. 24). Под действием дуги коллектор оплавляется и машина выходит из строя. При расчёте машин постоянного тока число коллекторных пластин выбирают из условия, чтобы среднее напряжение между коллекторными пластинами не превышало 15...20 В.

При нагрузке напряжение между пластинами может возрасти из-за влияния поперечной реакции якоря, которая приводит в искажению картины результирующего магнитного поля на полюсных делениях (см. рис. 6.2). Для устранения искажающего влияния поперечной реакции якоря выполняется компенсационная обмотка (термин 21, с. 19; рис. 4.4, лист 1,б). В результате распределение напряжения между коллекторными пластинами сохраняется при нагрузке таким же, как и при холостом ходе машины.

Отметим, что условия эксплуатации машины постоянного тока – загрязнение коллектора, влажность, атмосферное давление, наличие в окружающем воздухе химических веществ – также значительно влияют на коммутацию.

### 3.2.7. Способы уменьшения искрения

Чтобы коммутация сопровождалась допустимым искрением (такая коммутация считается удовлетворительной), необходимо уменьшить добавочный ток коммутации:

$$i_d = \sum e_i / \sum r_k, \quad (6.10)$$

где  $\sum e_i$  – сумма ЭДС в коммутируемой секции;  $\sum r_k$  – сумма сопротивлений цепи коммутируемой секции.

Способы уменьшения добавочного тока коммутации сводятся к следующему: 1) создание ЭДС вращения  $e_{вр}$  с помощью добавочных полюсов или сдвига щеток с геометрической нейтрали; 2) уменьшение реактивной ЭДС  $e_p = e_l + e_m$ ; 3) увеличение сопротивления  $r_k$  цепи коммутируемой секции

Для улучшения коммутации желательно выбрать щётки с повышенным активным сопротивлением, но увеличение их сопротивления приводит и к увеличению потерь и к нагреву щеток, что может ухудшить коммутацию. При проектировании машины щётки выбираются согласно ГОСТ Р 52157-2003 [16].

Для уменьшения реактивной ЭДС  $e_p = e_l + e_m$ , которая всегда замедляет коммутацию и приводит к усилению искрения, стремятся к минимальному числу витков в секции, а также выполнить паз якоря открытым, так как при этом уменьшается индуктивность секции  $L_k$  и соответствующий запас электромагнитной энергии  $L_k i_d^2 / 2$  секции. Максимальное значение реактивной ЭДС для машин небольшой мощности допускается 2,5...3 В.



В крупных машинах с компенсационной обмоткой максимальная реактивная ЭДС может достигать 12 В.

Важное значение имеет ток в параллельной ветви обмотки якоря, который для обеспечения удовлетворительной коммутации выбирается в пределах 250...350 А.

*Главным средством уменьшения искрения, то есть улучшения коммутации, является установка в машине добавочных полюсов (термин 23, с. 19). Они устанавливаются посередине между главными полюсами (рис. 4.4, лист 1,а, поз. 7 и 9, с. 46). При вращении якоря в поле добавочных полюсов в коммутируемой секции индуцируется ЭДС вращения  $e_{вр}$ . Для того, чтобы эта ЭДС действовала навстречу реактивной ЭДС  $e_p$  и компенсировала её (это необходимо для удовлетворительной коммутации) добавочные полюсы должны иметь определенный порядок следования по отношению к главным полюсам. В генераторе постоянного тока за главным полюсом данной полярности по направлению вращения якоря должен следовать добавочный полюс *противоположной* полярности (рис. 6.6).*

Все машины постоянного тока *мощностью выше 1 кВт* для обеспечения удовлетворительной коммутации выпускаются с дополнительными полюсами. При наличии этих полюсов щётки устанавливаются на геометрической нейтрали.

В машинах небольшой мощности (*менее 1 кВт*) ЭДС вращения  $e_{вр}$ , компенсирующую реактивную ЭДС  $e_l$ , создают сдвигая щётки с геометрической нейтрали. Причем направление и угол сдвига щеток *небезразличны*. В генераторном режиме щётки смещаются *на одну-две коллекторные пластины по направлению вращения* якоря. Объясняется это следующим образом. *Поперечная реакция* якоря искажает результирующее поле в машине, и в зоне коммутации, *на геометрической нейтрали по якорю*, появляется поле (рис. 6.2, кривые 3, 4 и 5; рис. 6.6). Если щётки оставить на геометрической нейтрали, то ЭДС вращения, наводимая от этого поля, будет совпадать с реактивной ЭДС (эти ЭДС складываются) и коммутация будет замедленной с неблагоприятными условиями. Для того чтобы эти ЭДС вычитались и коммутация была удовлетворительной *в генераторе постоянного тока необходимо щётки сдвинуть по направлению вращения якоря за физи-*

ческую нейтраль (рис. 6.2), где результирующее поле изменяет свою полярность. Этот способ улучшения коммутации имеет недостаток, связанный с тем, что реактивная ЭДС компенсируется только при некоторой одной нагрузке. Автоматической настройки коммутации при изменении нагрузки, которая есть в машине с добавочными полюсами, при сдвиге щеток с геометрической нейтрали нет. Это обусловлено тем, что при изменении нагрузки меняется величина тока в обмотке якоря и поле якоря, а следовательно изменяется положение физической нейтрали (изменяется положение точек  $a'$  и  $b'$  на рис. 6.2).

### 3.2.8. Оценка степени искрения

Искрение на коллекторе должно оцениваться по степени искрения под *сбегающим краем щётки*, то есть под тем краем, который *разрывает* замкнутый контур коммутируемой секции [1,13]. Различают пять степеней искрения, их характеристика приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Оценка степени искрения на коллекторе

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствует искрение	Отсутствие почернения на коллекторе и следов нагара на щётках
$1\frac{1}{4}$	Слабое искрение под небольшой частью края щётки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щётках, легко <i>устраняемых</i> протиранием поверхности коллектора бензином
$1\frac{1}{2}$	Слабое искрение под большей частью края щётки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щётках, <i>не устраняемых</i> протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щётки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щётках, <i>не устраняемых</i> протиранием поверхности коллектора бензином

3	Значительное искрение под всем краем щётки с появлением крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щётки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, <i>не устраняемое</i> протиранием поверхности коллектора бензином, а также <i>подгар и частичное разрушение щеток</i>
---	--	--

Как следует из табл. 6.1 степень искрения определяется визуально. Если степень искрения коллекторных машин постоянного тока не оговорена в стандартах или технических условиях на конкретные виды машин, то она при номинальном режиме работы должна быть не выше  $1\frac{1}{2}$ .

### 3.2.9. Экспериментальная проверка и настройка коммутации

В разд. 3.2.1...3.2.7 (с. 90...105) кратко рассмотрена *классическая* теория коммутации, которая предполагает, что сопротивление щеточного контакта равномерно по всей длине щётки и  $r_{щ1}$  и  $r_{щ2}$  пропорциональны площадям щётки  $S_{щ1}$  и  $S_{щ1}$  под сбегаящим и набегающим краями щётки. При этом предполагаем, что токи  $i_1$  и  $i_2$  распределяются равномерно и пропорционально площадям  $S_{щ1}$  и  $S_{щ1}$  (см. разд. 3.2.2 и 3.2.5.1) [1]. Однако эти предположения являются значительным отклонением от реальности, поэтому *классическая* теория коммутации дает правильную лишь *качественную оценку коммутации*. На практике выполняется экспериментальная проверка и настройка коммутации опытных образцов серийных машин с целью определения области безыскровой зоны работы машин с добавочными полюсами (термин 62, с. 24) [17].

#### 3.2.9.1. Метод подпитки добавочных полюсов

По ГОСТ 10159-79 определение области безыскровой зоны машин с добавочными полюсами следует производить методом изменения МДС обмотки добавочных полюсов [17]. Это метод также называется *методом подпитки добавочных полюсов*. Испытание производят при номинальной

частоте вращения по схеме рис. 6.8. На рисунке  $M$  – якорь двигателя, в котором осуществляется настройка коммутации,  $LB$  – добавочные полюсы,  $G$  – якорь вспомогательного генератора, обеспечивающего подпитку добавочных полюсов,  $LM$  – обмотка возбуждения исследуемого двигателя,  $LG$  – обмотка возбуждения вспомогательного генератора.

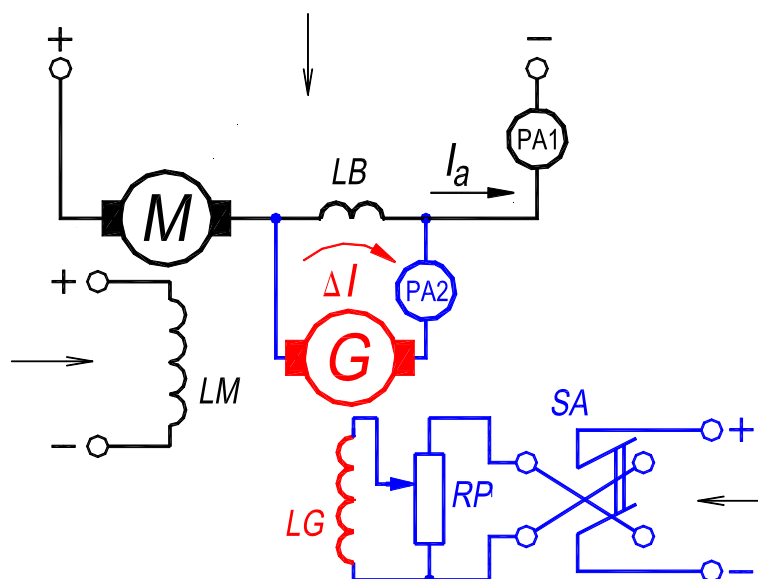
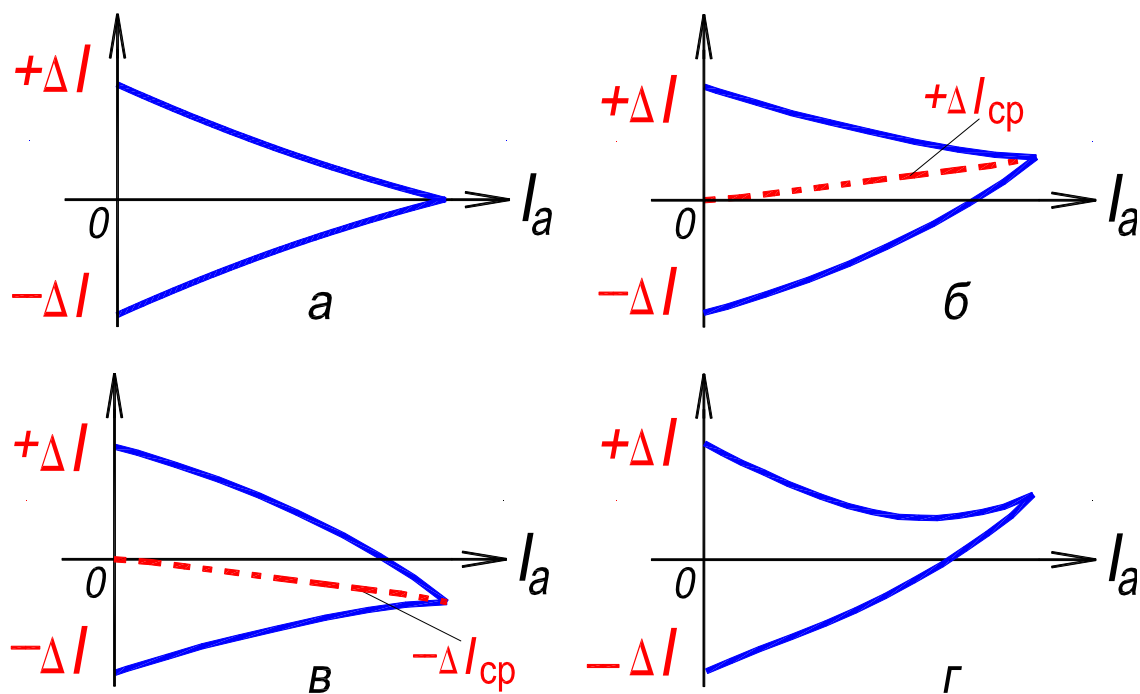


Рис. 6.8. Схема для снятия кривых подпитки добавочных полюсов

При подпитке через обмотку добавочных полюсов проходит дополнительный ток подпитки  $\Delta I$ , который вычитается или складывается с током якоря  $I_a$ . Изменяя ток подпитки  $\Delta I$ , добиваются при разных нагрузках степени искрения  $1$  и  $1\frac{1}{4}$ .

Кривые, характеризующие степень подпитки (рис. 6.9), позволяют установить необходимую степень усиления или ослабления действия добавочных полюсов [1,17]. Действие добавочных полюсов можно регулировать путём изменения числа витков или воздушного зазора, размеры которого можно изменять при помощи ферромагнитных прокладок, вставляемых между станиной и добавочным полюсом. Последний способ применяется чаще, так как обычно число витков добавочных полюсов небольшое и изменение их числа дает резкое изменение МДС обмотки добавочных полюсов.

Кривые, характеризующие степень подпитки, снимаются после устранения механических причин искрения, при хорошей приработке щеток в течение нескольких часов работы под нагрузкой.



**Рис. 6.9. Кривые подпитки добавочных полюсов:**  
*a* – нормально действующих; *б* – слабо действующих;  
*в* – сильно действующих; *г* – насыщенных

### 3.2.9.2. Снятие потенциальных кривых под щётками

Другим методом настройки коммутации является *снятие потенциальных кривых под щётками* [17]. При снятии потенциальных кривых под щёткой измеряется падение напряжения  $\Delta U_{щ}$  между щёткой и коллектором (рис. 6.10). При этом один зажим вольтметра постоянного тока присоединяют к щётке, а другой с помощью скользящего контакта передвигают по окружности вращающегося коллектора вдоль щётки. Кривая 2 свидетельствует о прямолинейной коммутации. Если коммутация *прямолинейная*, то плотность тока под щётками всюду одинакова и падение напряжения вдоль щётки также остается практически неизменным. При *замедленной* коммутации плотность тока больше под *сбегающим* краем щётки, а следовательно и падение напряжения под этим краем, кривая 1. При *ускоренной* коммутации плотность тока больше под *набегающим* краем щётки, а следовательно и падение напряжения под этим краем, кривая 3. Определив характер коммутации по потенциальным кривым щеток, можно провести настройку коммутации, меняя МДС дополнительных полюсов.

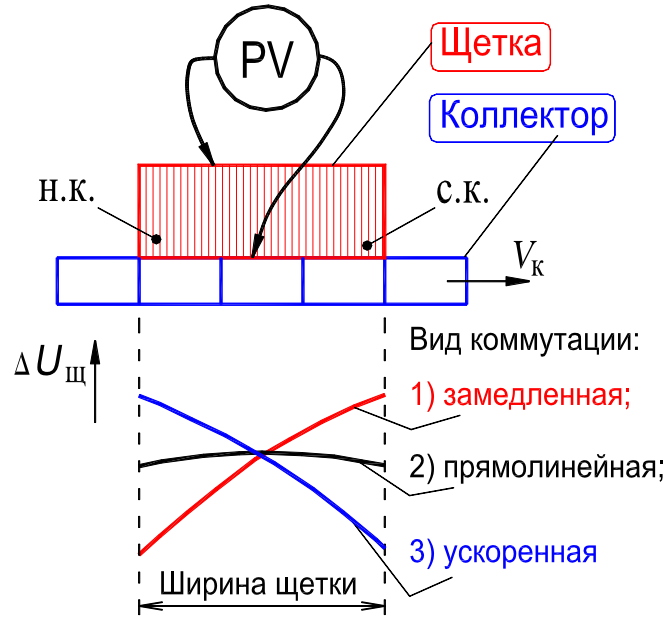


Рис. 6.10. Потенциальные щеточные кривые

При настройке коммутации следует стремиться к *несколько ускоренной коммутации*, так как при вращении коллектора возникают механические усилия, приподнимающие сбегающий край щётки и прижимающие набегающий. Поэтому целесообразно немного разгрузить сбегающий край щётки и уйти от прямолинейной коммутации.

Коммутация создает электромагнитные колебания высокой частоты 1...3 кГц (см. разд. 3.2.1, с. 90, сл.), в результате чего возникают радиопомехи. Для их устранения, что особенно необходимо при плохой коммутации, в цепь якоря машины постоянного тока включаются фильтры (рис. 6.11). При этом используются индуктивности машины, а конденсаторы помещают в коробке выводов.

Геометрия машины постоянного тока, надежность и области применения во многом определяются коммутацией. Поэтому развитие теории коммутации, совершенствование коллекторного узла (рис. 4.4, лист 2 и рис. 4.5, с. 49) имеет важное значение для расширения применения машин постоянного тока.

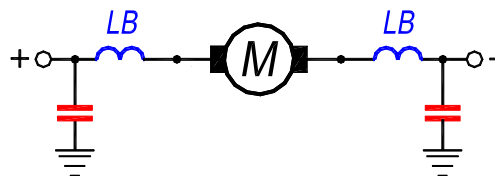


Рис. 6.11. Ёмкостный фильтр с двумя конденсаторами для защиты от помех

### 3.3. Характеристики генераторов постоянного тока

#### 3.3.1. Классификация характеристик генераторов

Свойства генераторов анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают зависимости между основными величинами, определяющими работу генераторов. Такими величинами являются: 1) напряжение на щётках  $U$ , 2) ток возбуждения  $I_B$ , 3) ток якоря  $I_a$  или ток нагрузки  $I_{НГ}$ , 4) частота вращения якоря  $n$ .

Генераторы работают при постоянной частоте вращения якоря, поэтому характеристики генераторов определяются при  $n = n_{ном} = \text{const}$ .

Существует пять характеристик генераторов: 1) холостого хода, 2) нагрузочная, 3) внешняя, 4) регулировочная, 5) короткого замыкания, см. табл. 6.2.

Таблица 6.2. Характеристики генераторов постоянного тока

Наименование характеристики	Обозначение характеристики	Параметр
Характеристика холостого хода (х. х. х.)	$U_x = f(I_B)$	$I_a = 0$
Нагрузочная характеристика	$U = f(I_B)$	$I_{НГ} = \text{const}$
Внешняя характеристика	$U = f(I_{НГ})$	$I_B = \text{const}^*$ или $R_B = \text{const}$
Регулировочная характеристика	$I_B = f(I_a)$	$U = \text{const}$
Характеристика короткого замыкания (х. к. з.)	$I_k = f(I_B)$	$U = 0$

\* Примечание: параметр  $I_B = \text{const}$  принимается при снятии внешней характеристики генератора *независимого* возбуждения; параметр  $R_B = \text{const}$  – при снятии внешней характеристики генератора *параллельного* возбуждения.

ГОСТ 10159-79 определяет порядок снятия трёх характеристик: 1) холостого хода, 2) внешней, 3) регулировочной. Характеристики короткого замыкания и нагрузочная являются вспомогательными [17].

#### 3.3.2. Характеристики генератора независимого возбуждения

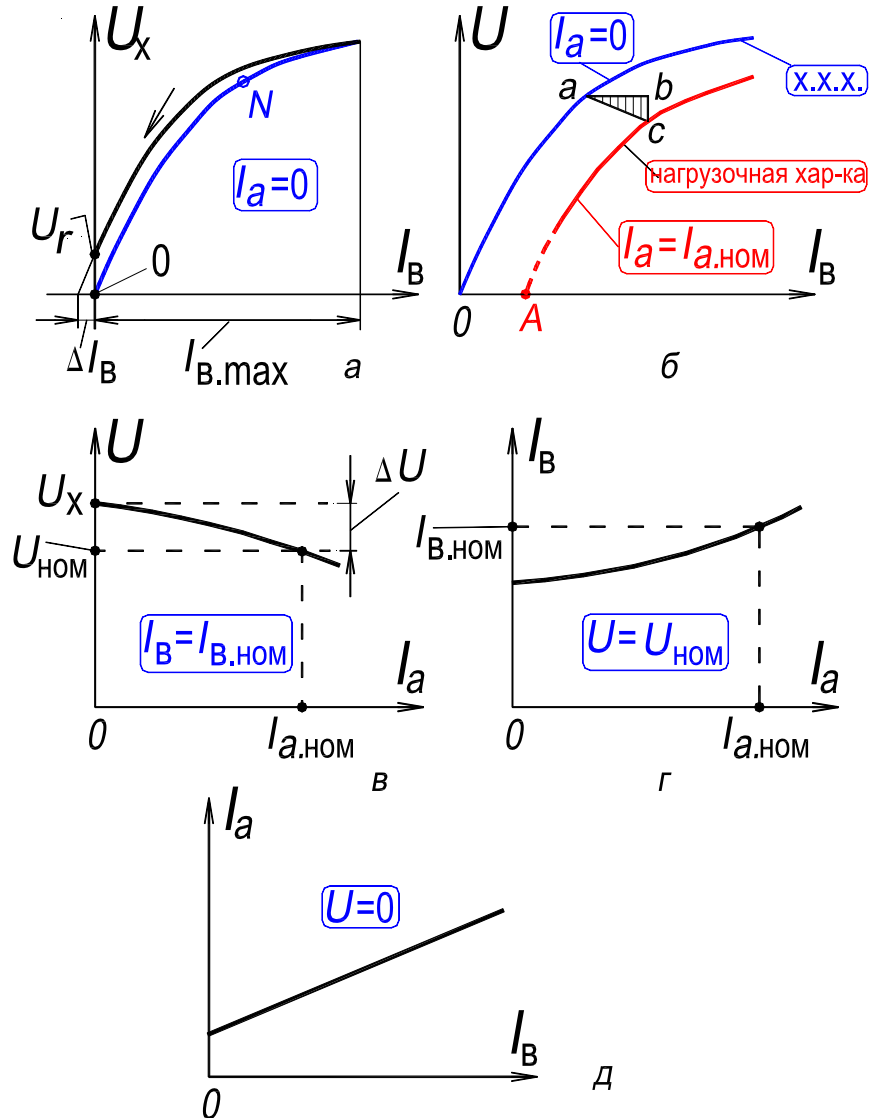
При независимом возбуждении обмотка возбуждения подключается к стороннему источнику постоянного тока (см. рис. 4.13,а на с. 61). Ток возбуждения  $I_B$  регулируется резистором  $R_B$ , который включается в цепь возбуждения.

1) *Характеристика холостого хода* (рис. 6.12,а)

Уравнение характеристики получается на основе формулы (4.20), с. 65, если принять ток якоря  $I_a = 0$ :

$$U_x = E_a = c_e n \Phi = f(I_B). \quad (6.11)$$

Магнитный поток возбуждения  $\Phi$  является функцией тока возбуждения  $I_B$  и зависит от насыщения магнитной цепи. Таким образом характеристика холостого хода повторяет в некотором масштабе характеристику намагничивания генератора  $\Phi = f(I_B)$ .



**Рис. 6.12. Характеристики ГПТ независимого возбуждения:**  
 а – холостого хода; б – нагрузочная; в – внешняя; г – регулировочная;  
 д – короткого замыкания

Характеристика снимается следующим образом: ток возбуждения, начиная с наибольшего значения  $I_{B,max}$ , которое соответствует напряжению  $U_x = (1,15...1,25)U_{ном}$ , плавно и *только в одном направлении* уменьшают до нуля и на этом заканчивают испытание. Для получения характеристики



холостого хода, проходящей через начало координат, снятую характеристику необходимо *сместить по оси абсцисс* на величину  $\Delta I_B$ , полученную путём экстраполяции этой характеристики до пересечения с осью абсцисс.

Если в генераторе предусмотрены специальные меры для увеличения остаточного намагничивания, то зависимость  $U_x = f(I_B)$  снимают в виде петли гистерезиса.

Характеристика холостого хода позволяет судить о насыщении магнитной цепи генератора при номинальном напряжении, проверять соответствие расчётных данных экспериментальным и составляет основу для исследования эксплуатационных свойств генератора. Генератор проектируется таким образом, чтобы рабочий участок характеристики совпадал с “коленом” кривой. При работе на прямолинейной части характеристики (до “колена”) напряжение генератора неустойчиво, а при работе на насыщенной части (после “колена”) ограничиваются возможности регулирования напряжения.

## 2) *Характеристика нагрузочная* (рис. 6.12,б)

Обычно характеристику снимают при номинальном токе нагрузки  $I_{нг} = I_{нг.ном}$ . Ток возбуждения регулируется резистором, включенным в цепь возбуждения. Ток нагрузки поддерживается неизменным за счет изменения величины сопротивления нагрузки  $R_{нг}$ .

Нагрузочная характеристика проходит ниже и правее характеристики холостого хода вследствие двух причин: 1) падения напряжения  $I_a R_a$  в цепи якоря, 2) влияния реакции якоря (см. разд. 3.1.2, с.86,сл.). Точка *A* на рис. 6.12,б соответствует короткому замыканию генератора. В этой точке напряжение равно нулю,  $U = 0$ .

При сдвиге щеток с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря реакция якоря в генераторе продольная и размагничивающая. При сдвиге щеток с геометрической нейтрали против направления вращения якоря реакция якоря в генераторе продольная и намагничивающая. Если в генераторе не установлены дополнительные полюсы, то для улучшения коммутации (уменьшения искрения под щётками) щётки смещают с геометрической нейтрали *по направлению* вращения на ширину одной-двух коллекторных пластин (см. разд. 3.2.7, с. 103,сл.). При щётках расположенных на геометрической нейтрали реакция якоря поперечная и, если магнитная система насыщена, то результирующее поле генератора уменьшается.

Нагрузочная характеристика и характеристика холостого хода позволяют построить характеристический (реактивный) треугольник  $abc$  (рис. 6.12,б). Катет  $bc$  соответствует падению напряжения, а катет  $ab$  – реакции якоря. Это треугольник может быть использован для построения внешней и регулировочной характеристик [1].

### 3) Внешняя характеристика (рис. 6.12,в)

Характеристика снимается при номинальном токе возбуждения  $I_B = I_{B,ном} = \text{const}$ . Ток нагрузки регулируется изменением сопротивления нагрузки  $R_{нг}$ . Внешнюю характеристику снимают при различных токах нагрузки, начиная со 150 % от номинального тока нагрузки ( $I_{нг} = 1,5I_{нг,ном}$ ) до холостого хода ( $I_{нг} = 0$ ).

При увеличении тока нагрузки напряжение несколько уменьшается по двум причинам: 1) вследствие падения напряжения в якорной цепи  $I_a R_a$ ; 2) из-за уменьшения ЭДС  $E_a$  ввиду уменьшения магнитного потока под воздействием поперечной реакции якоря (при щётках на геометрической нейтрали).

По внешней характеристике определяется изменение напряжения  $\Delta U$  генератора: повышение напряжения при снятии нагрузки и понижение при увеличении нагрузки. Номинальным изменением напряжения  $\Delta U_{ном}$  генератора называется разность напряжения при холостом ходе  $U_x = E_a$  и напряжения при номинальной нагрузке  $U_{ном}$ . Изменение напряжения выражают в процентах от номинального напряжения генератора

$$\Delta U = 100(U_x - U_{ном})/U_{ном} = 100\Delta U_{ном}/U_{ном}. \quad (6.12)$$

В генераторах независимого возбуждения  $\Delta U = 5 \dots 15 \%$ .

### 4) Регулировочная характеристика (рис. 6.12,г)

Характеристика снимается при номинальном напряжении  $U = U_{ном} = \text{const}$ . Регулировочная характеристика показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора не менялось. Характеристику снимают при различных токах нагрузки, начиная со 150 % от номинального тока нагрузки ( $I_{нг} = 1,5I_{нг,ном}$ ) до холостого хода ( $I_{нг} = 0$ ).

С увеличением тока нагрузки  $I_{нг}$  ток возбуждения  $I_B$  необходимо несколько увеличивать, чтобы компенсировать влияние падения напряжения  $I_a R_a$  в якорной цепи и реакции якоря. При переходе от холостого хода

с  $U = U_{\text{ном}}$  к номинальной нагрузке  $I_{\text{нг}} = I_{\text{нг.ном}}$  увеличение тока возбуждения составляет 15...25 %.

#### 5) Характеристика короткого замыкания (рис. 6.12,д)

Характеристика снимается при напряжении  $U = 0$  и замкнутой коротко обмотке якоря. Характеристика короткого замыкания линейна, так как генератор при её снятии не насыщен. Ток короткого замыкания  $I_{\text{к}}$  не должен превышать  $(1,2 \dots 1,25)I_{\text{нг.ном}}$ . Поле остаточного магнетизма определяет ток короткого замыкания при  $I_{\text{в}} = 0$ . Чтобы начальное значение тока короткого замыкания не было слишком большим, перед снятием характеристики машина может быть размагничена. Для этого обмотку возбуждения на небольшое время подключают к переменному напряжению.

С помощью характеристик холостого хода и короткого замыкания может быть построен реактивный треугольник  $abc$  (см. рис. 6.12,б). Внешняя и регулировочная характеристики могут быть построены с помощью этого треугольника и характеристики холостого хода [1].

Генераторы независимого возбуждения обеспечивают достаточное для практики постоянство напряжения без регулирования его при изменении нагрузки и устойчивую работу при изменении напряжения от нуля до номинального значения.

Недостатком генераторов независимого возбуждения является необходимость постороннего источника постоянного тока для возбуждения. Однако в некоторых случаях независимость напряжения цепи возбуждения от напряжения генератора используется для регулирования напряжения генератора в большом диапазоне.

### **3.3.3. Характеристики генератора параллельного возбуждения**

При параллельном возбуждении обмотка возбуждения подключается к зажимам обмотки якоря (см. рис. 4.13,б на с. 61), то есть питается от напряжения генератора. Ток возбуждения  $R_{\text{в}}$  регулируется резистором, который включается в цепь возбуждения. Необходимо заметить, что при независимом возбуждении ток возбуждения не зависит от напряжения генератора, а при параллельном возбуждении эта зависимость значительна и влияет на характеристики генератора.

*Процесс самовозбуждения генератора параллельного возбуждения*

Напряжение генератора  $U$  создается в процессе самовозбуждения, который

основан на использовании существующего в машине небольшого остаточного магнитного потока  $\Phi_r$  основных полюсов. Он может составлять 1...5 % от номинального потока возбуждения. Остаточный поток такого значения практически всегда имеется в уже работавшем генераторе. Вновь изготовленный генератор или генератор, который по каким-либо причинам размагнитился, необходимо намагнитить, пропуская через обмотку возбуждения ток от постороннего источника.

Условия самовозбуждения генератора следующие: 1) наличие потока остаточного магнетизма  $\Phi_r$ ; 2) поток остаточного магнетизма должен действовать согласно с потоком возбуждения  $\Phi_B$  главных полюсов, созданным током возбуждения; 3) сопротивление цепи возбуждения  $R_B$  должно быть *меньше* некоторого критического значения при данной частоте вращения якоря  $n = \text{const}$ .

Рассмотрим процесс самовозбуждения генератора на холостом ходу и *определим предел до которого идет этот процесс*. Уравнение равновесия напряжений в дифференциальной форме для цепи возбуждения записывается в виде:

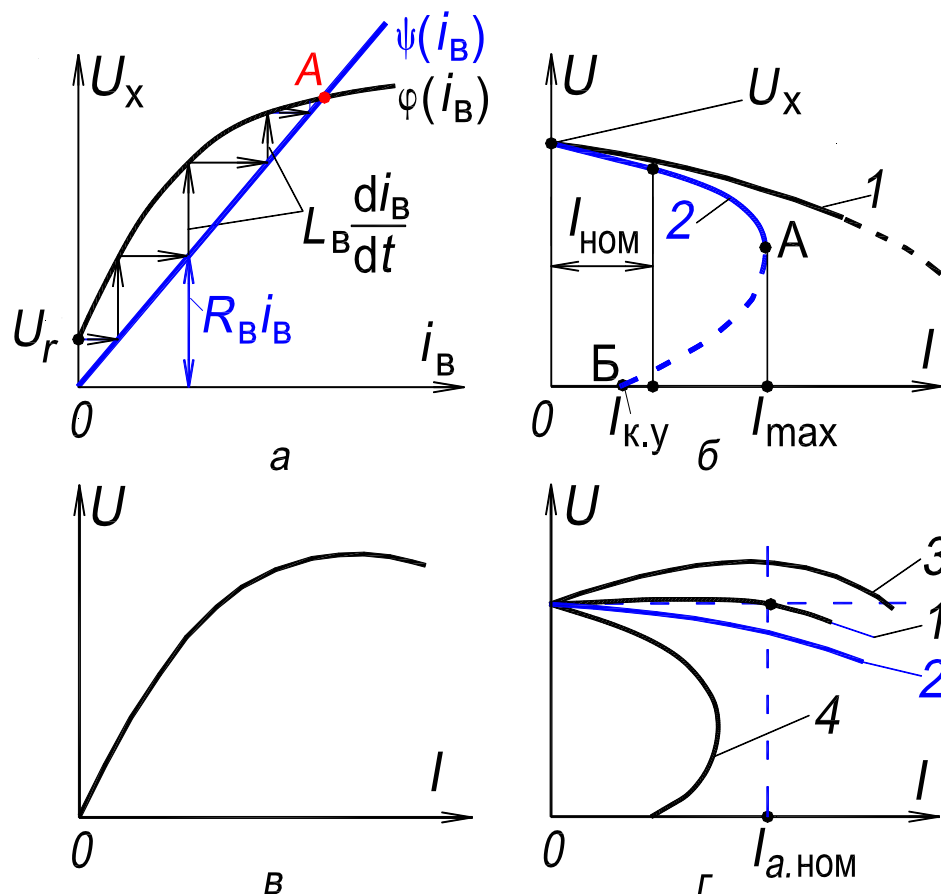
$$u_B = u_x = \varphi(i_B) = R_B i_B + L_B di_B/dt, \quad (6.13)$$

где  $u_B = u_x$  – напряжение, приложенное к обмотке возбуждения;  $L_B$  – индуктивность цепи возбуждения;  $i_B$  – ток в цепи возбуждения.

На рис. 6.13,а, иллюстрирующем процесс самовозбуждения, показана характеристика холостого хода генератора  $U_x = \varphi(i_B)$  при частоте вращения якоря  $n = \text{const}$  и характеристика  $R_B i_B = \psi(i_B)$ . Отрезки ординат между этими характеристиками численно равны значениям  $L_B di_B/dt$  и служат мерой интенсивности процесса самовозбуждения. В точке А производная  $di_B/dt$  равна нулю и, следовательно  $i_B = \text{const}$ , а процесс самовозбуждения закончен.

При вращении якоря приводным двигателем с частотой  $n = \text{const}$  поток  $\Phi_r$  индуцирует в обмотке якоря ЭДС  $E_r$ , которая обуславливает протекание тока в цепи возбуждения. Этот ток усиливает поток основных полюсов. В результате индуцируемая в обмотке якоря ЭДС возрастет, что вызовет увеличение тока в обмотке возбуждения и т. д., пока в процессе лавинообразного самовозбуждения ЭДС генератора не достигнет значения соответствующего точке А. На рис. 6.13,а этот процесс *условно* показан ступенчатой линией. В действительности, так как обмотка возбуждения обладает

индуктивностью, процесс нарастания ЭДС обмотки якоря и тока возбуждения идет не ступенями, а плавно.



**Рис. 6.13. Иллюстрация процесса самовозбуждения ГПТ:**

*a* – параллельного возбуждения.

**Внешние характеристики ГПТ:**

*б* – параллельного возбуждения (кривая 2); *в* – последовательного возбуждения;

*г* – смешанного возбуждения (кривые 1, 3, 4)

Если вольт-амперная характеристика  $R_B i_B = \psi(i_B)$  касательна к характеристике холостого хода  $U_x = \varphi(i_B)$ , то самовозбуждение практически не происходит. Сопротивление цепи возбуждения соответствующее касательной и есть критическое сопротивление  $R_{B,кр}$ .

Если поток возбуждения  $\Phi_B$ , создаваемый током  $i_B$ , будет направлен навстречу остаточному потоку  $\Phi_r$ , то самовозбуждение невозможно. Для того чтобы самовозбуждение происходило необходимо поменять местами концы обмотки возбуждения (см. рис. 4.13,б на с. 61)

### 1) Характеристика холостого хода

Эту характеристику при параллельном возбуждении снимают *только* в одной четверти так же, как описано в разд. 3.3.2, пункт 1), с. 110, путём регулирования тока возбуждения с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения (рис. 4.13,б). Так как ток возбуждения мал (он обычно не превышает 1...3 % от номинального тока генератора), то характеристика холостого хода, снятая при параллельном возбуждении, практически совпадает с характеристикой, снятой при независимом возбуждении (рис. 6.12,а).

### 2) Характеристика нагрузочная

Эту характеристику при параллельном возбуждении снимают так же, как при независимом возбуждении (см. разд. 3.3.2, пункт 2, с. 112). Нагрузочная характеристика, снятая при параллельном возбуждении, практически совпадает с характеристикой, снятой при независимом возбуждении (рис. 6.12,б).

### 3) Внешняя характеристика (рис. 6.13,б, кривая 2)

Эту характеристику при параллельном возбуждении снимают при нерегулируемом сопротивлении цепи возбуждения  $R_B = \text{const}$ , соответствующем номинальному режиму.

При отсутствии регулирования цепи возбуждения ток возбуждения *не остается постоянным* вследствие изменения напряжения на зажимах генератора, так как при параллельном возбуждении  $I_B = U/R_B \equiv U$ . Поэтому к двум причинам падения напряжения, указанным для генератора независимого возбуждения (см. разд. 3.3.2, пункт 3, с. 113), добавляется третья – уменьшение тока возбуждения  $I_B$  при уменьшении напряжения  $U$ . В результате внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (рис. 6.13,б, кривая 2) падает круче, чем у генератора независимого возбуждения (кривая 1), а номинальное изменение напряжения у генератора параллельного возбуждения больше и составляет  $\Delta U = 10...20\%$ .

Характерной особенностью внешней характеристики генератора параллельного возбуждения является то, что при некотором максимальном значении тока нагрузки  $I_{нг} = I_{\text{max}}$  (точка А) она делает петлю и приходит в точку Б на оси абсцисс, которая соответствует установившемуся току короткого замыкания. Ток  $I_{к.у}$  относительно мал и определяется остаточным магнитным потоком, так как в точке Б напряжение  $U = 0$ , а поэтому ток воз-

буждения также равен нулю. Верхняя часть характеристики (сплошная линия) соответствует устойчивой работе генератора с малым изменением напряжения. Нижняя часть характеристики (пунктирная линия) соответствует неустойчивой работе генератора.

Генераторы параллельного возбуждения проектируются таким образом, чтобы максимальный ток нагрузки  $I_{\max}$  (точка А) не превышал номинальный ток более чем в 2...2,5 раза.

#### 4) Регулировочная характеристика (рис. 6.12,з)

Так как эта характеристика снимается при постоянном напряжении  $U = \text{const}$  на зажимах генератора параллельного возбуждения, то она практически совпадает с регулировочной характеристикой генератора независимого возбуждения (см. разд. 3.3.2, пункт 4, с. 113). Теоретически регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения будет расположена несколько выше характеристики генератора независимого возбуждения в связи с небольшим падением напряжения от тока возбуждения в якорной цепи.

#### 5) Характеристика короткого замыкания

Эта характеристика при параллельном возбуждении *не может быть снята*, так как в режиме короткого замыкания напряжение  $U = 0$  и ток возбуждения  $I_{\text{в}} = U/R_{\text{в}} = 0$ . Значение тока в цепи якоря определяется полем остаточного магнетизма (см. рис. 6.12,д).

Генераторы параллельного возбуждения обеспечивают достаточное для практики постоянство напряжения без регулирования его при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения.

Достоинством генераторов параллельного возбуждения является отсутствие постороннего источника постоянного тока для возбуждения и малый ток короткого замыкания. Недостатком является неустойчивая работа при пониженном напряжении. Генераторы параллельного возбуждения находят широкое применение в установках, где не требуется регулирование напряжения в широких пределах

### 3.3.4. Характеристики генератора последовательного возбуждения

Обмотка возбуждения генератора включена последовательно с нагрузкой (см. рис. 4.13,в на с. 61). Ток возбуждения равен току нагрузки,  $I_{\text{в}} = I_{\text{н}}$ . Поэтому при  $n = \text{const}$  имеются только две независимые переменные: напряжение  $U$  и ток  $I_{\text{н}}$ .

Вследствие этого генератор последовательного возбуждения имеет только одну характеристику, а именно внешнюю  $U = f(I_{HT})$  (см. рис. 6.13,в). При увеличении тока нагрузки растет поток возбуждения  $\Phi_B$  и ЭДС  $E_a$ . В начальной части характеристики напряжение  $U$  растет почти пропорционально току нагрузки, при достижении насыщения магнитной цепи рост напряжения замедляется. При больших токах нагрузки напряжение может уменьшаться под влиянием падения напряжения и реакции якоря.

Так как напряжение генератора последовательного возбуждения сильно изменяется с изменением нагрузки, то он не пригоден для питания большинства потребителей.

### 3.3.5. Характеристики генератора смешанного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную (рис. 4.13,г на с. 61). Обычно МДС параллельной обмотки значительно больше. Характеристики генератора зависят от способа включения обмоток: *встречное* или *согласное*. При согласном включении МДС обмоток суммируются и результирующая МДС возбуждения генератора возрастает. При встречном включении МДС обмоток вычитаются.

Уравнение равновесия напряжений обмотки якоря генератора смешанного возбуждения записывается в виде, см. уравнение (4.20), с. 65:

$$U = c_e n (\Phi_{ш} \pm \Phi_c) - I_a R_a, \quad (6.14)$$

где  $\Phi_{ш}$  – магнитный поток, созданный МДС параллельной обмотки возбуждения;  $\Phi_c$  – магнитный поток, созданный МДС последовательной обмотки; знак “+” соответствует согласному включению обмоток; знак “–” – их встречному включению. Уравнение (6.14) записано в предположении, что магнитная система не насыщена (линейна).

*Согласное включение двух обмоток позволяет получить: 1) приблизительно постоянное напряжение генератора при изменении нагрузки (см. внешнюю характеристику на рис. 6.13,г, кривая 1); 2) увеличение напряжения генератора при возрастании нагрузки (кривая 3). Для сравнения показана внешняя характеристика генератора независимого возбуждения, кривая 2.*

*При встречном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения внешняя характеристика получается крутопадающей (кривая 4). Такая характеристика необходима в сварочных генераторах постоянного тока и в других специальных машинах, где требуется ограничить ток короткого замыкания.*



## 4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке в состав которой входят: исследуемый генератор постоянного тока (ГПТ) и приводной двигатель – двигатель постоянного тока (ДПТ) параллельного возбуждения (см. фотографии установки на рис. В1,..., В3, с. 15, 16).

Значения номинальных данных ГПТ и ДПТ – см. разд. 5.1, с. 73.

Собрать схему включения двигателя постоянного тока  $M$  параллельного возбуждения (обмотка возбуждения  $LM$ ) (рис. 6.14).

Собрать схему для испытания генератора постоянного тока  $G$  при параллельном и смешанном возбуждении (обмотки возбуждения  $LG1$  и  $LG2$ ) (рис. 6.15).

### 4.1. Пуск двигателя постоянного тока

1. Установить пусковой реостат  $RR_{п.д}$  в положение “Пуск” (*введен*);
2. Установить реостат  $RR_{в.д}$  в цепи возбуждения в положение “*выведен*”;
3. Включить автомат  $QF1$  (на схему подано напряжение 110 В);
4. В процессе разгона двигателя *плавно и медленно* перевести пусковой реостат  $RR_{п.д}$  в положение “Работа” (*выведен*);
5. Реостатом  $RR_{в.д}$  установить частоту вращения  $n_d = n_{д.ном} = 1500$  об/мин (см. показание тахогенератора);

**Внимание.** *Перед отключением* двигателя от сети (после выполнения каждого из разделов 4.2, 4.3 и 4.4) необходимо пусковой реостат  $RR_{п.д}$  *устанавливать* в положение “Пуск”.

### 4.2. Характеристики генератора с параллельным возбуждением

(см. разд. 3.3.3, с. 114, сл.)

Опыты (разд. 4.2.1, 4.2.2 и 4.2.3) проводить в соответствии со схемой рис. 6.15, обмотку последовательного возбуждения  $LG2$  из схемы исключить.

#### 4.2.1. Характеристика холостого хода

Снятие характеристики х. х.  $U_x = f(I_{в.г})$  при  $n_g = n_{г.ном} = 1430$  об/мин осуществить следующим образом.

1. Исключить из схемы сопротивление нагрузки  $RR_{нг}$ ;
2. Запустить приводной двигатель  $M$  (см. выше разд. 4.1). Скорость  $n_g$  поддерживать номинальной реостатом  $RR_{в.д}$  (рис. 6.14);

3. Реостатом  $RR_{в.г}$  установить напряжение, вырабатываемое генератором при холостом ходе  $U_x = 140$  В. Если генератор не возбуждается, необходимо изменить направление тока, протекающего в обмотке параллельного возбуждения  $LG1$  генератора. Для этого следует поменять местами штекеры двух проводников, подключающих обмотку возбуждения к гнездам  $A1$  и  $A2$ ;

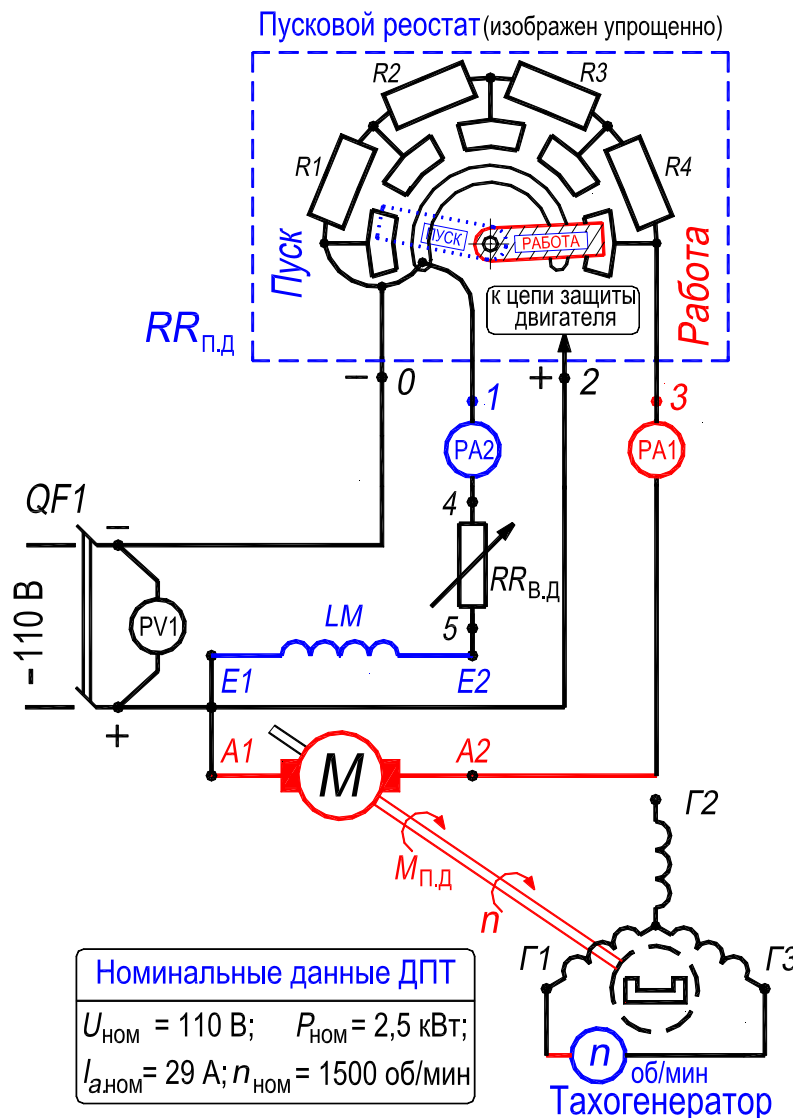


Рис. 6.14. Схема включения ДПТ параллельного возбуждения

4. Регулировать ток  $I_B$  ( $PA4$ ) реостатом  $RR_{в.г}$  в диапазоне изменения напряжения  $U_x$  от 140 В до  $U_{ост}$  с шагом  $\Delta U \approx 20$  В ( $PV2$ ) (напряжение остаточного магнетизма  $U_{ост}$  соответствует току возбуждения  $I_{в.г} = 0$ );

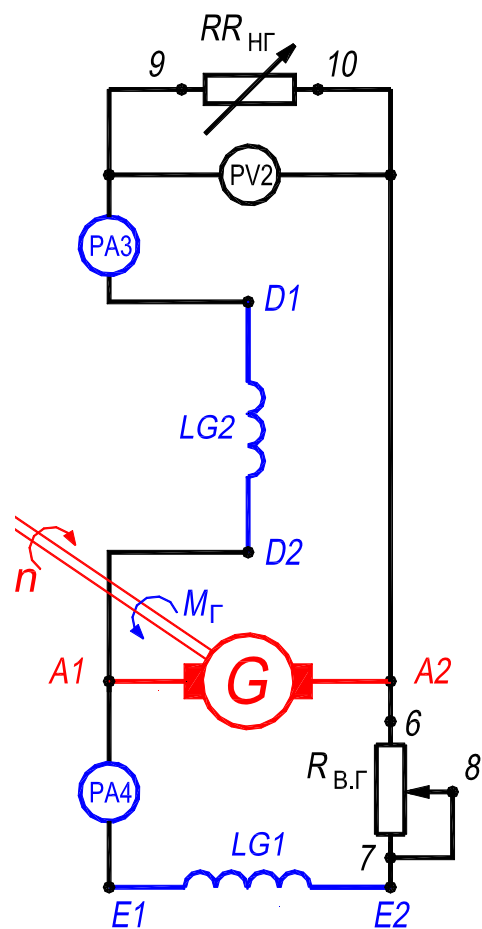
5. Записать в табл. 6.3 показания приборов  $PV2$  ( $U_x$ ) и  $PA4$  ( $I_B$ ) при каждом дискретном значении напряжения холостого хода  $U_x$ ;

6. По данным опыта построить зависимость  $U_x = f(I_{в.г})$  и определить на ней значение тока возбуждения  $I_{в0}$  генератора, соответствующее номинальному напряжению генератора  $U_{ном} = 115$  В.

Характеристика холостого хода генератора позволяет судить о магнитных свойствах машины.

Таблица 6.3. Измерение характеристики холостого хода

$U_x$	В	140							
$I_{в.г}$	А								0



<b>Номинальные данные ГПТ</b>	
$U_{ном} = 115$ В;	$P_{ном} = 2$ кВт;
$I_{а.ном} = 17,4$ А;	$n_{ном} = 1430$ об/мин

Рис. 6.15. Схема лабораторной установки для исследования ГПТ параллельного и смешанного возбуждения

### 4.2.2. Внешняя характеристика

Снятие внешней характеристики  $U = f(I_{\text{нг}})$  при  $R_{\text{в.г}} = \text{const}$ ,  $n_{\text{г}} = n_{\text{г.ном}}$  осуществить следующим образом.

1. Включить в схему сопротивление нагрузки  $RR_{\text{нг}}$ ;
2. Реостатом  $RR_{\text{в.д}}$  установить частоту вращения генератора  $n_{\text{г}} = n_{\text{г.ном}}$  и в процессе опыта поддерживать её неизменной;
3. Реостатом  $RR_{\text{в.г}}$  установить напряжение  $U_{\text{х}} = 130 \text{ В}$  ( $PV2$ ) и в процессе опыта не изменять сопротивление этого реостата;
4. Изменять ступенями сопротивление нагрузки  $RR_{\text{нг}}$  и записать значения тока  $I_{\text{нг}}$  ( $PA3$ ) и напряжения  $U$  ( $PV2$ ) в табл. 6.4 (выполнить 5-6 измерений).
5. По данным опыта построить зависимость  $U = f(I_{\text{нг}})$ .

Таблица 6.4. Измерение внешней характеристики

Возбуждение	параллельное	$U$	В	130						
		$I_{\text{нг}}$	А	0						
	смешанное согласное	$U$	В	130						
		$I_{\text{нг}}$	А	0						
	независимое	$U$	В	130						
		$I_{\text{нг}} = I_a$	А	0						

### 4.2.3. Регулировочная характеристика

Снятие регулировочной характеристики  $I_{\text{в.г}} = f(I_{\text{нг}})$  при  $U = U_{\text{ном}}$ ,  $n_{\text{г}} = n_{\text{г.ном}}$  осуществить следующим образом.

1. Реостатом  $RR_{\text{в.д}}$  (см. рис. 6.14) установить частоту вращения генератора  $n_{\text{г}} = n_{\text{г.ном}}$  и в процессе опыта поддерживать её неизменной;
2. Реостатом  $RR_{\text{в.г}}$ , при холостом ходе генератора, установить напряжение  $U = 115 \text{ В}$  ( $PV2$ ) и в процессе опыта поддерживать его неизменным;
3. Изменять ступенями сопротивление нагрузки  $RR_{\text{нг}}$  и записать значения тока  $I_{\text{нг}}$  ( $PA3$ ) и тока  $I_{\text{в.г}}$  ( $PA4$ ) в табл. 6.5 (выполнить 5-6 измерений);
4. По данным опыта построить зависимость  $I_{\text{в.г}} = f(I_{\text{нг}})$ .

Регулировочная характеристика  $I_{в.г} = f(I_{нг})$ , снимаемая при  $U = U_{ном}$ ,  $n = n_{ном}$ , показывает как следует регулировать ток возбуждения, чтобы поддержать постоянным по величине напряжение генератора при изменении нагрузки.

**Таблица 6.5. Измерение регулировочной характеристики**

Возбуждение	параллельное	$I_{нг}$	А	0						
		$I_{в.г}$	А							
	смешанное согласное	$I_{нг}$	А	0						
		$I_{в.г}$	А							

Установить реостат  $RR_{п.д}$  в положение “Пуск” (введен) и автоматом  $QF1$  отключить двигатель  $M$  (рис. 6.14).

### 4.3. Характеристики генератора со смешанным возбуждением

(см. разд. 3.3.5. с. 119)

Опыты (разд. 4.3.1 и 4.3.2) проводить в соответствии со схемой рис. 6.15, обмотку последовательного возбуждения  $LG2$  включить в схему согласно с обмоткой параллельного возбуждения  $LG1$ .

Если в процессе проведения опыта снятия внешней характеристики (разд. 4.3.1), при увеличении тока нагрузки  $I_{нг}$  напряжение  $U$  быстро и значительно уменьшается, то обмотки  $LG1$  и  $LG2$  включены встречно (так эти обмотки включают в сварочном генераторе постоянного тока). Для согласного действия обмоток, необходимо изменить направление тока, протекающего в обмотке  $LG2$ . С этой целью следует поменять местами штекеры, вставленные в гнезда  $D1$  и  $D2$  (предварительно отключить сопротивление нагрузки  $RR_{нг}$ ).

#### 4.3.1. Внешняя характеристика

Снятие внешней характеристики  $U = f(I_{нг})$  при  $R_{в.г} = \text{const}$ ,  $n_{г} = n_{г.ном}$  осуществить следующим образом (см. разд. 4.2.2).

1. Запустить приводной двигатель  $M$  (см. рис. 6.14 и разд. 4.1);
2. Реостатом  $RR_{в.д}$  установить частоту вращения генератора  $n_{г} = n_{г.ном}$  и в процессе опыта поддерживать её неизменной;

3. Реостатом  $RR_{в.г}$  установить напряжение  $U_x = 130$  В ( $PV2$ ) и в процессе опыта не изменять сопротивление этого реостата;

4. Изменять ступенями сопротивление нагрузки  $RR_{нг}$  и записать значения тока  $I_{нг}$  ( $PA3$ ) и напряжения  $U$  ( $PV2$ ) в табл. 6.4 (выполнить 5-6 измерений).

5. По данным опыта построить зависимость  $U = f(I_{нг})$ .

### 4.3.2. Регулировочная характеристика

Снятие регулировочной характеристики  $I_{в.г} = f(I_{нг})$  при  $U = U_{ном}$ ,  $n_{г} = n_{г.ном}$  осуществить следующим образом (см. разд. 4.2.3).

1. Реостатом  $RR_{в.д}$  установить частоту вращения генератора  $n_{г} = n_{г.ном}$  и в процессе опыта поддерживать её неизменной;

2. Реостатом  $RR_{в.г}$ , при холостом ходе генератора, установить напряжение  $U = 115$  В ( $PV2$ ) и в процессе опыта поддерживать его неизменным;

3. Изменять ступенями сопротивление нагрузки  $RR_{нг}$  и записать значения тока  $I_{нг}$  ( $PA3$ ) и тока  $I_{в.г}$  ( $PA4$ ) в табл. 6.5 (выполнить 5-6 измерений);

4. По данным опыта построить зависимость  $I_{в.г} = f(I_{нг})$ .

Установить реостат  $RR_{п.д}$  в положение “Пуск” (*введен*) и автоматом  $QF1$  отключить двигатель  $M$  (рис. 6.14).

## 4.4. Характеристики генератора с независимым возбуждением

(см. разд. 3.3.2. с. 110, сл.)

Собрать схему для испытания генератора постоянного тока  $G$  при независимом возбуждении (рис. 6.16).

### 4.4.1. Внешняя характеристика

Снятие внешней характеристики  $U = f(I_{нг})$  при  $I_{в.г} = \text{const}$ ,  $n_{г} = n_{г.ном}$  осуществить следующим образом (см. разд. 4.2.2 и 4.3.1).

1. Запустить приводной двигатель  $M$  (см. рис. 6.14 и разд. 4.1, с. 120);

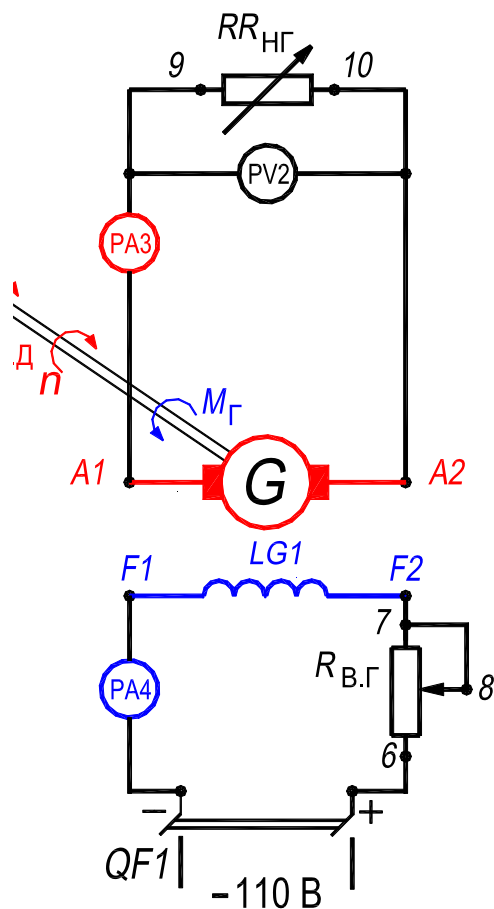
2. Реостатом  $RR_{в.д}$  установить частоту вращения генератора  $n_{г} = n_{г.ном}$  и в процессе опыта поддерживать её неизменной;

3. Реостатом  $RR_{в.г}$  установить напряжение  $U_x = 130$  В ( $PV2$ ). Ток  $I_{в.г}$ , соответствующий этому значению напряжения, в процессе опыта поддерживать неизменным;

4. Изменять ступенями сопротивление нагрузки  $RR_{НГ}$  и записать значения тока  $I_{НГ}$  (PA3) и напряжения  $U$  (PV2) в табл. 6.4 (выполнить 5-6 измерений).

5. По данным опыта построить зависимость  $U = f(I_{НГ})$ .

Установить реостат  $RR_{п.д}$  в положение “Пуск” (введен) и автоматом QF1 отключить двигатель  $M$  и обмотку независимого возбуждения LG1 генератора  $G$  от сети (рис. 6.14 и 6.16).



Номинальные данные ГПТ	
$U_{НОМ} = 115 \text{ В};$	$P_{НОМ} = 2 \text{ кВт};$
$I_{а.НОМ} = 17,4 \text{ А};$	$n_{НОМ} = 1430 \text{ об/мин}$

Рис. 6.16. Схема лабораторной установки для исследования ГПТ независимого возбуждения

## 5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 81).
4. Номинальные данные исследованного ГПТ (разд. 5.1, с. 73).
5. Номинальные данные приводного ДПТ (там же).
6. Схемы испытаний, рис. 6.14, 6.15 и 6.16.
7. Результаты опытов, представленные в таблицах 6.3, 6.4 и 6.5.
8. Экспериментальные графические зависимости:
  - 8.1. Характеристику холостого хода в осях координат  $U_x$  и  $I_{в.г}$ ;
  - 8.2. Три внешние характеристики, представленные *на одном графике* в осях координат  $U$  и  $I_{нг}$ ;
  - 8.3. Две регулировочные характеристики представленные *на одном графике* в осях координат  $I_{в.г}$  и  $I_{нг}$ .

Каждый график расположить с соответствующей таблицей 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 Машины постоянного тока подшить в *одну* общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.



## 6. Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение, устройство и принцип действия генератора постоянного тока.
2. Что такое реакция якоря?
3. Как зависит характер реакции якоря от положения щеток относительно геометрической нейтрали?
4. Что такое геометрическая и физическая нейтрали генератора?
5. Перечислить условия самовозбуждения генератора параллельного возбуждения.
6. Объяснить процесс самовозбуждения генератора параллельного возбуждения.
7. Что такое согласное включение обмоток возбуждения.
8. Объяснить форму характеристики холостого хода генератора.
9. Объяснить вид внешних характеристик генератора при различных способах возбуждения.
10. Объяснить вид регулировочных характеристик при различных способах возбуждения.
11. Объяснить назначение дополнительных полюсов.

### П6.1. Тахогенератор постоянного тока

Тахогенератор предназначен для выработки электрических сигналов  $U$ , пропорциональных частоте вращения  $n$  производственных механизмов,  $U \sim n$  (термины 103, 104 и 107, с. 29, 30). Наряду с тахогенераторами постоянного тока используются асинхронные [4, с. 253, сл.] и синхронные тахогенераторы [5, с. 107].

Тахогенераторы представляют собой маломощные электрические генераторы (обычно до  $P_{\text{ном}} = 10 \dots 50$  Вт), которые используются в системах автоматики и для измерения скорости вращения. Необходимо, чтобы между  $U$  и  $n$  сохранялась линейная зависимость с точностью до  $0,2 \dots 0,5$  %, а иногда с точностью до  $0,01$  %. В маломощных тахогенераторах при  $n = 1000$  об/мин напряжение  $U = 3 \dots 5$  В, в более мощных тахогенераторах обычного применения при такой же скорости вращения  $U = 50 \dots 100$  В.

Согласно формуле (П6.1), при постоянстве магнитного потока возбуждения  $\Phi$

$$E_a = c_e n \Phi = c_e' n, \quad (\text{П6.1})$$

где  $c_e' = c_e \Phi \approx \text{const}$ .

Большинство тахогенераторов имеет обычную конструкцию машин постоянного тока. Чтобы выполнить условие  $\Phi \approx \text{const}$ , применяется возбуждение тахогенераторов постоянными магнитами (рис. П6.3) или от независимого источника электроэнергии при  $I_B = \text{const}$  (рис. 4.13,а на с. 61).

Как следует из (4.20), с. 65, ЭДС тахогенератора

$$E_a = U + I_a R_a = U(1 + R_a/R_{\text{нг}}), \quad (\text{П6.2})$$

где ток якоря тахогенератора  $I_a = U/R_{\text{нг}}$ ,  $R_{\text{нг}}$  – сопротивление внешней цепи на которую включен тахогенератор.

На основе полученного уравнения имеем

$$U = E_a/(1 + R_a/R_{\text{нг}}) = c_e' n/(1 + R_a/R_{\text{нг}}), \quad (\text{П6.3})$$

то есть при постоянстве сопротивления нагрузки  $R_{\text{нг}}$  и цепи якоря  $R_a$  сохраняется пропорциональность между напряжением  $U$  тахогенератора и скоростью вращения  $n$  его якоря.

Характеристики тахогенератора  $U = f(n)$  приведены на рис. Пб.1 для нескольких значений  $R_{\text{НГ}}$ . По мере увеличения тока  $I_a$  якоря начинает проявляться размагничивающее действие реакции якоря, величина магнитного потока уменьшается, и характеристика тахогенератора отклоняется от прямой линии. В том же направлении действует нагревание обмотки якоря. Для уменьшения этого влияния необходимо выбирать сопротивление  $R_{\text{НГ}}$  возможно большим.

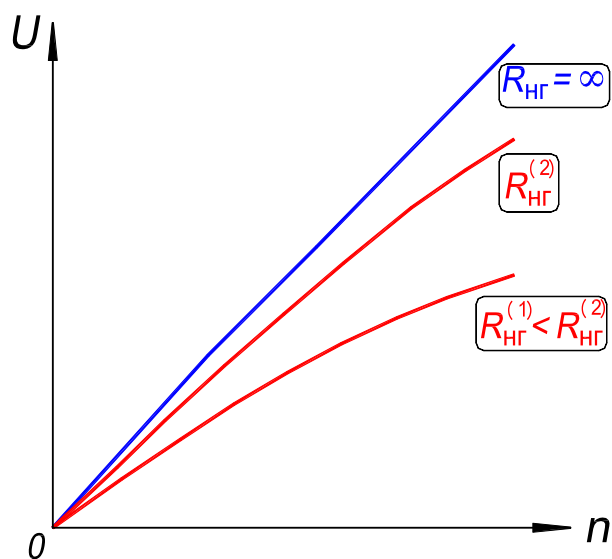


Рис. Пб.1. Характеристика тахогенератора

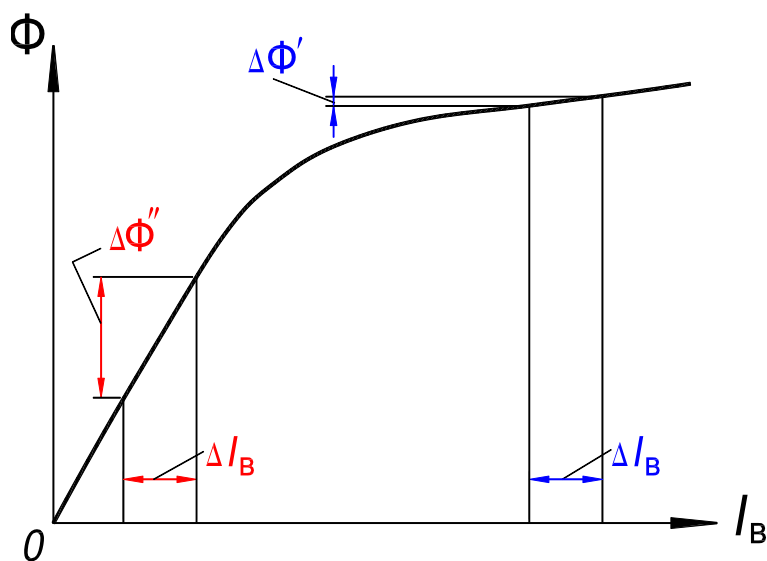


Рис. Пб.2. Влияние насыщения на изменение магнитного потока

В начальной части характеристики заметно сказывается непостоянство сопротивления скользящего контакта, поэтому в тахогенераторах целесообразно применять щётки с малым переходным сопротивлением.

Существенное влияние на работу тахогенератора может оказать изменение тока возбуждения под влиянием нагревания обмотки или колебания напряжения источника независимого возбуждения. На рис. Пб.2 показано изменение магнитного потока, обусловленное одинаковым приращением тока  $\Delta I_B$  в насыщенной ( $\Delta\Phi'$ ) и ненасыщенной ( $\Delta\Phi''$ ) части характеристики намагничивания. Для уменьшения влияния изменения тока возбуждения на величину магнитного потока магнитную цепь тахогенератора следует делать насыщенной. Если же по условиям работы требуется сохранить пропорциональность между напряжением тахогенератора и током возбуждения, магнитную цепь делают ненасыщенной.

На рис. Пб.3 приведена схема лабораторной установки для исследования тахогенератора постоянного тока. На рис. В3 (с. 16) – фотография передней (приборной) панели стэнда “Генератор постоянного тока”.

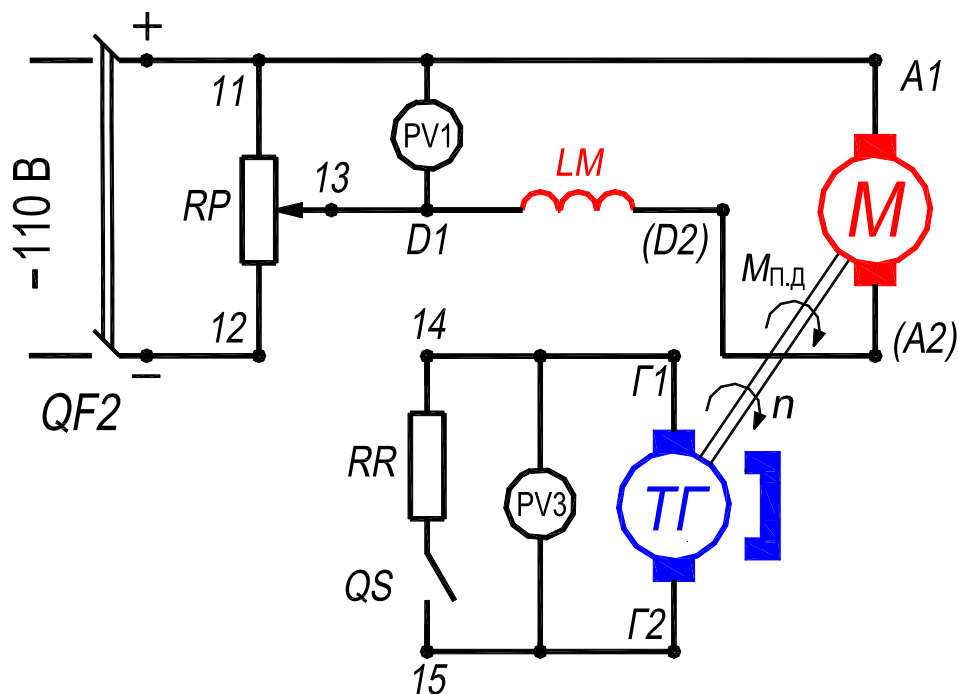


Рис. Пб.3. Схема лабораторной установки для исследования тахогенератора постоянного тока

Существенным преимуществом тахогенераторов с постоянными магнитами является отсутствие источника энергии для возбуждения. Современные материалы для постоянных магнитов – сплавы типа альнико, магнико и др. – обладают стабильными магнитными свойствами и обеспечивают надежную работу тахогенераторов в течение продолжительного времени.

## 7. РАБОТА № 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

### Оглавление

<b>1. Цель работы .....</b>	<b>135</b>
<b>2. Программа работы .....</b>	<b>135</b>
<b>3. Основы теории .....</b>	<b>136</b>
3.1 Реакция якоря и способы улучшения коммутации в двигателе постоянного тока .....	136
3.2. Скоростная и механическая характеристики .....	137
3.3. Пуск двигателей постоянного тока .....	137
3.4. Устойчивость работы двигателя .....	142
3.5. Изменение режима работы .....	145
3.6. Способы регулирования частоты вращения двигателя .....	148
3.7. Характеристики двигателей параллельного возбуждения	149
3.7.1. Естественные скоростная и механическая характеристики .....	149
3.7.2. Регулирование скорости двигателей параллельного возбуждения .....	151
3.7.2.1. Регулирование скорости ослаблением магнитного потока .....	151
3.7.2.2. Регулирование скорости сопротивлением в цепи якоря, искусственные механическая и скоростная характеристики .....	152
3.7.2.3. Регулирование скорости изменением напряжения якоря .....	152
3.7.3. Рабочие характеристики двигателя .....	155
3.8. Характеристики двигателей последовательного возбуждения .....	156

3.8.1. Естественные скоростная и механическая характеристики. Область применения .....	156
3.8.2. Регулирование скорости двигателей последовательного возбуждения .....	158
3.9. Характеристики двигателей смешанного возбуждения ....	159
3.10. Отключение двигателя от сети и торможение .....	160
<b>4. Экспериментальное исследование .....</b>	<b>163</b>
4.1. Пуск и реверс исследуемого двигателя <i>MI</i> .....	165
4.2. Рабочие характеристики двигателя .....	165
4.3. Скоростная (электромеханическая) характеристика .....	167
4.4. Регулировочная характеристика (частота вращения $n = \text{const}$ ) .....	168
4.5. Регулировочная характеристика (момент $M = \text{const}$ ) .....	169
4.6. Определение КПД двигателя по методу отдельных потерь	170
<b>5. Содержание отчета и оформление отчета .....</b>	<b>172</b>
<b>6. Контрольные вопросы .....</b>	<b>173</b>
<b>Приложение 7</b>	
<b>П7.1. Управляемые двигатели постоянного тока .....</b>	<b>174</b>
<b>Перечень рисунков в 7-м разделе.....</b>	<b>134</b>
<b>Перечень таблиц в 7-м разделе .....</b>	<b>134</b>

### Перечень рисунков в 7-м разделе

Рис. 7.1. Пуск двигателя с помощью пускового реостата: <i>a</i> – схема пуска; <i>b</i> – зависимости тока якоря $I_a$ , момента $M$ и скорости $n$ от времени $t$ .....	139
Рис. 7.2. Механические характеристики двигателя и производственного механизма: <i>a</i> – устойчивая работа; <i>b</i> – неустойчивая работа .....	144
Рис. 7.3. Переход двигателя к новому режиму работы: <i>a</i> – при увеличении момента нагрузки; <i>b</i> – при уменьшении потока возбуждения .....	147
Рис. 7.4. Зависимости скорости $n$ и момента $M$ двигателя от тока якоря $I_a$ : <i>a</i> – при параллельном возбуждении; <i>b</i> – при последовательном возбуждении ...	150
Рис. 7.5. Скоростная и механическая характеристики при ослаблении потока .....	151
Рис. 7.6. Наглядное изображение: <i>a</i> – схема регулирования скорости сопротивлением в цепи якоря; <i>b</i> – скоростная и механическая характеристики .....	153
Рис. 7.7. Наглядное изображение: <i>a</i> – схема Г – Д; <i>b</i> – скоростная и механическая характеристики .....	154
Рис. 7.8. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения .....	155
Рис. 7.9. Схемы для регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения: <i>a</i> – посредством ослабления поля; <i>b</i> – посредством шунтирования якоря; <i>в</i> – включением сопротивления в цепь якоря .....	158
Рис. 7.10. Механические характеристики двигателя: <i>1</i> – с параллельным возбуждением; <i>2</i> – со смешанным возбуждением при согласном включении обмоток возбуждения; <i>3</i> – с последовательным возбуждением .....	160
Рис. 7.11. Схемы отключения двигателя от сети: <i>a</i> – динамическое торможение; <i>b</i> – торможение противовключением (направление тока $I$ соответствует положению 2 выключателя П) .....	161
Рис. 7.12. Схема лабораторной установки для исследования двигателя с параллельным возбуждением .....	163
Рис. 7.13. Передняя (приборная) панель стенда “Двигатель постоянного тока” .....	164
Рис. 7.14. Общий вид стенда “Двигатель постоянного тока” с исследуемыми агрегатами: слева расположен агрегат с ДПТ параллельного возбуждения (Работа № 2); справа – агрегат с ДПТ последовательного возбуждения (Работа № 3) .....	164
Рис. П7.1. Схемы включения управляемого двигателя: <i>a</i> – с якорным управлением; <i>b</i> – с полюсным управлением; <i>в</i> – с возбуждением от постоянных магнитов ...	176
Рис. П7.2. Характеристики двигателя с якорным управлением: <i>a</i> – механические; <i>b</i> – регулировочные .....	178
Рис. П7.3. Характеристики двигателя с полюсным управлением: <i>a</i> – механическая; <i>b</i> – регулировочная .....	180

### Перечень таблиц в 7-м разделе

Табл. 7.1. Измерение и расчёт рабочих характеристик .....	167
Табл. 7.2. Измерение скоростных характеристик .....	168
Табл. 7.3. Измерение и расчёт регулировочной характеристики (частота вращения $n = \text{const}$ ) ...	169
Табл. 7.4. Измерение и расчёт регулировочной характеристики (момент $M = \text{const}$ ) .....	170
Табл. 7.5. Расчёт коэффициента полезного действия .....	171

## 1. Цель работы

Изучить устройство и принцип действия двигателя с параллельным возбуждением, научиться осуществлять пуск двигателя и изменять направление его вращения, оценить влияние нагрузки на характеристики двигателя, познакомиться со способами регулирования частоты вращения и структурой потерь мощности.

## 2. Программа работы

2.1. Изучить устройство двигателя постоянного тока (ДПТ).

2.2. Собрать на лабораторном стенде схему для испытаний двигателя, осуществить пуск двигателя, изменить направление вращения.

2.3. Определить опытным путём номинальный ток возбуждения  $I_{В.НОМ}$  двигателя, снять и построить *рабочие* характеристики двигателя

$$P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2) \text{ при } U = U_{НОМ} \text{ и } I_B = I_{В.НОМ}.$$

2.4. Снять и построить *скоростную* (электромеханическую) характеристику двигателя  $n = f(I_a)$ :

а) при  $I_B = I_{В.НОМ}$  и  $U = U_{НОМ}$ ,

б) при  $I_B = 0,5I_{В.НОМ}$  и  $U = U_{НОМ}$ .

2.5. Снять и построить *регулировочную* характеристику двигателя при постоянной частоте вращения

$$I_B = f(M) \text{ при } n = \text{const} \text{ и } U = U_{НОМ}.$$

2.6. Снять и построить *регулировочную* характеристику двигателя при постоянном моменте на валу

$$n = f(U) \text{ при } M_c = \text{const} \text{ и } I_B = I_{В.НОМ}.$$

2.7. Рассчитать коэффициент полезного действия двигателя для заданного значения тока якоря.



### 3. Основы теории

*ДПТ широко применяются в качестве тяговых на электровозах, тепловозах, в пригородных электропоездах, метрополитене, трамвае, троллейбусе, электрокарах, морских и речных судах. См. разд. 4.10...4.13, с. 67,сл.*

#### 3.1. Реакция якоря и способы улучшения коммутации в двигателе

В двигателе постоянного тока (ДПТ), как и в генераторе (см. разд. 3.1, с. 82, сл.), *реакция якоря зависит от положения щеток на коллекторе.*

Как отмечалось в разделе 4.12 (с. 69, сл.), если в двигателе направление тока  $I_a$  в обмотке якоря и полярность полюсов возбуждения такие же, как в генераторе (рис. 4.17), то электромагнитный момент и в генераторе ( $M_T$ ) и в двигателе ( $M_D$ ) будет действовать в одном и том же направлении. Однако якорь двигателя будет вращаться в этом случае в направлении противоположном направлению вращения якоря генератора. С учетом этого обстоятельства делаются выводы о действии реакции якоря в двигателе. Эти выводы основаны на анализе влияния реакции якоря в генераторе (см. в Работе №1 разд. 3.1, с. 82, сл.).

В двигателе реакция якоря оказывает следующее воздействие на результирующее поле.

**Щётки расположены на геометрической нейтрали.** Если магнитная система не насыщена, то результирующее поле не изменяется по величине, но *искажается по форме.*

Если же магнитная система насыщена, реакция якоря не только искажает результирующее поле, но и уменьшает его, то есть *оказывает размагничивающее действие* (см. там же разд. 3.1.2.1, с. 87, сл.).

**Щётки сдвинуты с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря.** Реакция якоря оказывает *намагничивающее* воздействие на результирующее поле и искажает его форму (см. там же разд. 3.1.2.3, с. 89).

**Щётки сдвинуты с геометрической нейтрали против направления вращения якоря.** Реакция якоря оказывает *размагничивающее* воздействие на результирующее поле и искажает его форму (см. там же разд. 3.1.2.2, с. 88,сл.).

**Физическая нейтраль** смещается в двигателе постоянного тока *против направления* вращения якоря (см. там же разд. 3.1.1, с. 82,сл.).

В двигателе способы улучшения коммутации такие же, как и в генераторе

(см. там же разд. 3.2.7, с. 103, сл.). Главным средством уменьшения искрения, то есть улучшения коммутации, является установка добавочных полюсов (термин 23, с. 19). В двигателе за главным полюсом данной полярности по направлению вращения якоря должен следовать добавочный полюс той же полярности. В двигателях небольшой мощности (менее 1 кВт) улучшение коммутации достигается сдвигом щеток с геометрической нейтрали на одну-две коллекторные пластины против направления вращения якоря.

### 3.2. Скоростная и механическая характеристики

Скоростная характеристика двигателя – зависимость частоты вращения  $n$  от тока якоря  $I_a$ ;  $n = \varphi(I_a)$ , при заданных условиях (термин 72, с. 25).

Механическая характеристика двигателя – зависимость вращающего электромагнитного момента  $M$  от частоты вращения  $n$ ;  $M = \psi(n)$ , при заданных условиях (термин 71, с. 25). Механическую характеристику представляют также в виде  $n = \psi(M)$ .

Уравнение скоростной характеристики находим на основе выражения (4.33), с. 72

$$n = (U - I_a R_a) / c_e \Phi = U / c_e \Phi - I_a R_a / c_e \Phi = \varphi(I_a). \quad (7.1)$$

Заданным условием является постоянство напряжения  $U = \text{const}$ . На форму скоростной характеристики влияют: величина падения напряжения  $I_a R_a$ ; реакция якоря; способ возбуждения.

Уравнение механической характеристики находим на основе выражений (4.27) и (4.33). Определив из (4.27), с. 69

$$I_a = M / c_m \Phi \quad (7.2)$$

и подставляя (7.2) в (7.1) получаем

$$n = U / c_e \Phi - M R_a / c_e c_m \Phi^2 = \psi(M). \quad (7.3)$$

Выражение (7.3) является уравнением механической характеристики двигателя  $n = \psi(M)$  при  $U = \text{const}$ . На форму характеристики влияют: реакция якоря; способ возбуждения (см. разд. 3.7.1, с. 149, сл. и разд. 3.7.2.2, с. 152).

### 3.3. Пуск двигателей постоянного тока

При пуске необходимо ограничить величину пускового тока якоря  $I_{a,п} = U / R_a$  до величины не опасной для двигателя, прежде всего с точки зрения удовлетворительной коммутации. При этом величина пускового момента  $M = c_m I_{a,п} \Phi$  должна быть достаточной для разгона двигателя до нужной частоты вращения.

Возможны три способа пуска:

- 1) *прямой* пуск – цепь якоря непосредственно подключается к питающей сети (на номинальное напряжение  $U = U_{\text{ном}}$ );
- 2) пуск с применением *пускового реостата*;
- 3) пуск *при пониженном напряжении* цепи якоря ( $U < U_{\text{ном}}$ ).

Так как в электрических машинах постоянного тока общепромышленного назначения сопротивление якорной цепи  $R_a$  незначительно, то пусковой ток якоря при прямом пуске с  $U = U_{\text{ном}}$  недопустимо велик и может достичь 50-кратного значения по сравнению с номинальным значением. Поэтому *прямой пуск применяется как правило для двигателей мощностью до нескольких сотен ватт*, так как сопротивление их якорной цепи достаточно велико и пусковой ток якоря может превысить номинальный ток в 5...10 раз (термин 51, с. 22). За время пуска, составляющее 1...2 секунды, обмотка якоря нагревается незначительно.

Наиболее распространенным является *пуск с применением пускового реостата* (рис. 7.1). Выражение для тока якоря записывается так

$$I_a = (U - E_a) / (R_a + \sum_i R_{\text{п},i}), \quad (7.4)$$

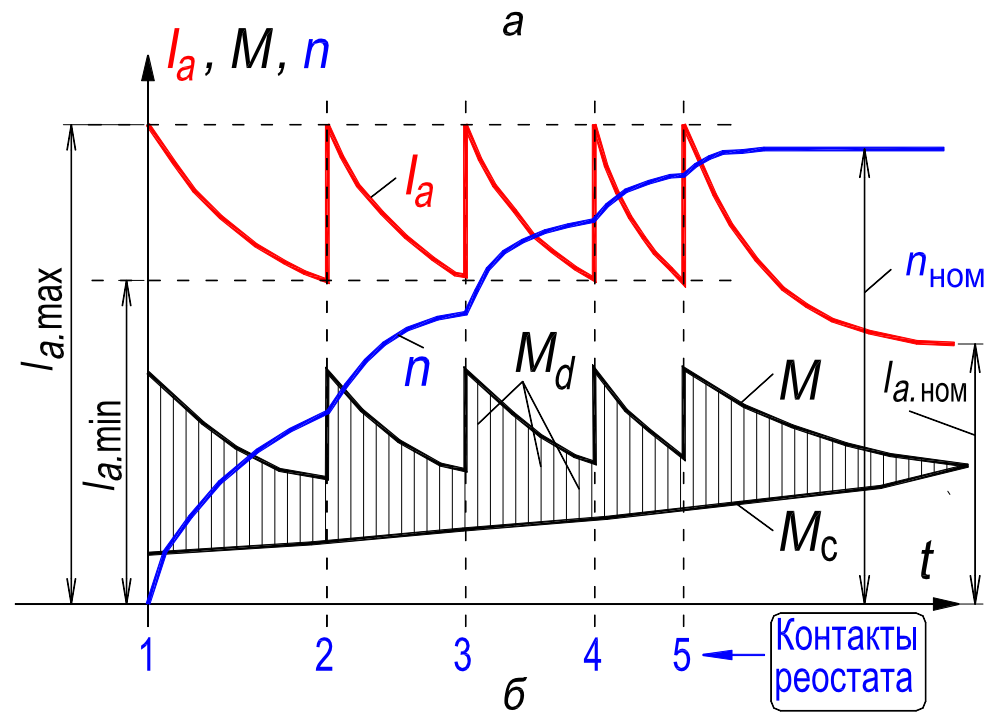
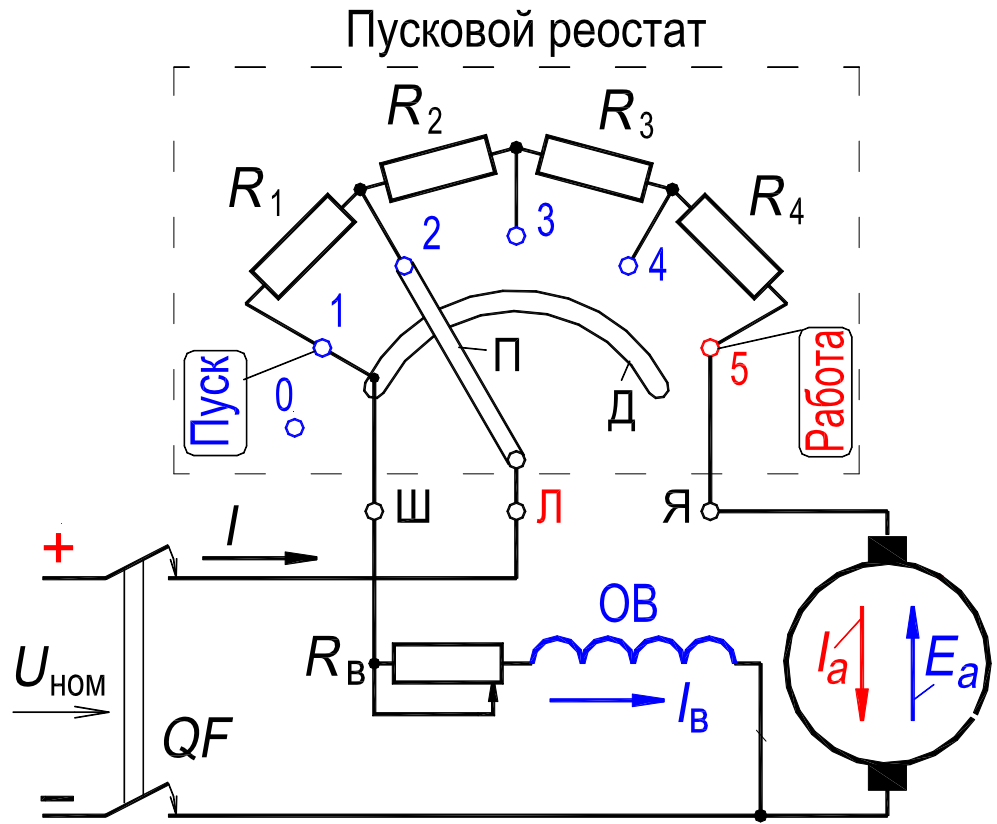
где  $\sum_i R_{\text{п},i} = R_{\text{п}}$  – сумма сопротивлений 4-х секций пускового реостата или пусковое сопротивление  $R_{\text{п}}$ ;  $i = 1, 2, 3, 4$ .

В момент пуска противо-ЭДС  $E_a = 0$  и выражение для пускового тока якоря имеет вид

$$I_{a,\text{п}} = U / (R_a + R_{\text{п}}). \quad (7.5)$$

Пусковое сопротивление  $R_{\text{п}}$  рассчитывается так, чтобы в начальный момент пуска ( $n = 0$ ) пусковой ток подчинялся условию  $I_{a,\text{п}} \leq (1,4 \dots 2,5) I_{a,\text{ном}}$ , причем большие значения пускового тока относятся к двигателям небольшой мощности.

По мере разгона двигателя растет противо-ЭДС  $E_a$ , что приводит к уменьшению тока якоря (7.4). Поэтому по мере разгона двигателя пусковой реостат выводят и после окончания процесса пуска якорь оказывается подключенным в сеть напрямую и ток якоря соответствует (4.34), с. 72.



**Рис. 7.1. Пуск двигателя с помощью пускового реостата:**  
 а – схема пуска;  
 б – зависимости тока якоря  $I_a$ , момента  $M$  и скорости  $n$  от времени  $t$

Рассмотрим схему включения пускового реостата и процесс пуска подробнее. На рис. 7.1,*a* приведена схема подключения двигателя параллельного возбуждения к сети через *трёхзажимный* пусковой реостат. Зажимы реостата обозначены буквами Л, Ш и Я. Зажим Л подсоединяется к питающей сети; зажим Ш – к обмотке возбуждения; зажим Я – к обмотке якоря. Основными элементами пускового реостата являются: секции  $R_1, R_2, R_3, R_4$  с отводами к неподвижным контактам 1, 2, 3, 4 и 5; подвижный контакт П, укрепленный на рукоятке пускового реостата; неподвижная контактная дуга Д; “нулевой” неподвижный контакт 0.

Перед пуском подвижный контакт П должен находиться на неподвижном контакте 0. Реостат  $R_B$  в цепи возбуждения устанавливают на весь период пуска в положение соответствующее  $R_B = 0$ . Это необходимо, чтобы в процессе пуска ток  $I_B$  и поток возбуждения  $\Phi$  были максимальными и постоянными, так как двигатель будет развивать максимальный электромагнитный момент  $M$  при данном токе якоря  $I_a$  (4.27);

Процесс пуска двигателя постоянного тока осуществляется в следующей последовательности:

1) частота вращения якоря  $n = 0$ . Включают автомат  $QF$ . Подвижный контакт П устанавливают на неподвижном контакте 1 (положение “Пуск”). Обмотка возбуждения включена на напряжение питающей сети непосредственно, а обмотка якоря через сопротивление пускового реостата  $R_{\Pi} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ . Ток якоря  $I_a$  определяется выражением (7.5) и максимально ограничен сопротивлением  $R_{\Pi}$ ; противо-ЭДС  $E_a = 0$ . Под действием момента  $M$  двигатель начинает разгоняться ( $n > 0$ ), противо-ЭДС увеличивается, ток в обмотке якоря  $I_a$  уменьшается (7.4), сопротивление пускового реостата можно уменьшить;

2) подвижный контакт П устанавливают на неподвижном контакте 2. Сопротивление пускового реостата  $R_{\Pi} = R_2 + R_3 + R_4$  – ток якоря и момент двигателя увеличиваются. Частота вращения и противо-ЭДС растут – ток якоря уменьшается, сопротивление пускового реостата можно уменьшить;

4) подвижный контакт П устанавливают на неподвижном контакте 3 и т. д. по мере разгона двигателя выводятся последовательно одна за другой секции  $R_2, R_3$  и  $R_4$  пускового реостата.

После завершения процесса пуска подвижный контакт П находится на неподвижном контакте 5 – обмотка якоря включена на напряжение питающей сети непосредственно, пусковой реостат находится в положении соответствующем состоянию  $R_{\Pi} = 0$  (положение “Работа”).

Процессу пуска соответствует уравнение равновесия моментов при переменной частоте вращения  $n$ ,  $M = M_c + M_d$  (4.32), с. 71. Графическая интерпретация процесса пуска представлена на рис. 7.1,б. Отрезки ординат между линией  $M_c$  (статический момент сопротивления на валу двигателя) и линией  $M$  (электромагнитный момент развиваемый двигателем) соответствуют динамическому моменту  $M_d$ . После завершения процесса пуска  $n = \text{const}$ ,  $M_d = 0$  и  $M = M_c$  (4.29).

Число секций пускового реостата и значения их сопротивлений рассчитывают таким образом, чтобы при надлежащих интервалах времени переключения секций максимальные и минимальные значения тока якоря  $I_a$  не изменялись (рис. 7.1,б). По условиям нагрева пусковой реостат рассчитывают на кратковременную работу под током.

*Отключение двигателя от сети* осуществляют следующим образом:

1) устанавливают пусковой реостат в положение “Пуск”, подвижный контакт П установлен на неподвижный контакт 1;

2) отключают автомат  $QF$ . Подвижный контакт П устанавливают на “нулевом” неподвижном контакте 0 (рис. 7.1,а).

При таком отключении ток якоря уменьшен, обмотка возбуждения замкнута на обмотку якоря и пусковой реостат и электромагнитная энергия обмотки возбуждения преобразуется в тепловую. *Отключать обмотку возбуждения от сети при пуске и установившемся режиме работы двигателя недопустимо* – это приводит к уменьшению потока возбуждения  $\Phi$ , к уменьшению противо-ЭДС  $E_a$  и возрастанию тока  $I_a$ . Резко возрастает частота вращения  $n$ , см. выражение (7.1). Двигатель “идет в разнос”. Возрастание тока якоря и частоты вращения приводит к ухудшению коммутации, может возникнуть “круговой огонь” по коллектору и произойти авария.

Для двигателей большой мощности пусковая аппаратура при реостатном способе пуска получается тяжелой и дорогой, в ней расходуется много

энергии в период пуска. В таком случае возможен безреостатный пуск двигателя, а *ограничение пускового тока достигается за счет непосредственного питания цепи якоря двигателя пониженным напряжением ( $U < U_{ном}$ ) от отдельного генератора постоянного тока (4.35), с. 72.* Напряжение подаваемое на обмотку якоря двигателя регулируется реостатом в цепи возбуждения генератора. Такая система называется “генератор –в двигатель” (Г – Д) и используется не только для пуска мощных двигателей, но и для регулирования их скорости вращения в широких пределах (см. разд. 3.7.2.3, с. 152,сл.).

Пуск двигателей последовательного и смешанного возбуждения (см. разд. 3.8, с. 156,сл. и 3.9, с. 159,сл.) производится аналогичным образом соответственно трем способа пуска, рассмотренным выше.

*Для изменения направления вращения якоря (реверсирования) необходимо изменить направление действия электромагнитного момента  $M$  двигателя. Как следует из (4.27), с.69 это можно достичь или изменяя направление тока в обмотке якоря  $I_a$  (одновременно следует изменить направление тока в обмотке дополнительных полюсов и в компенсационной обмотке) или изменяя направление тока в обмотке возбуждения  $I_B$  (то есть потока возбуждения  $\Phi_B$ ).*

### **3.4. Устойчивость работы двигателя**

При установившемся режиме работы двигателя частота его вращения неизменна ( $n = \text{const}$ ) и уравнение равновесия моментов электромеханической системы, включающей двигатель и производственный механизм, имеет вид  $M = M_c$  [см. выражение (4.29), с. 71]. В процессе работы вследствие *небольших кратковременных* возмущений возможны нарушения установившегося режима работы двигателя: равенство (4.29) нарушается, а скорость изменяется ( $n = \text{var}$ ) и возникает динамический момент  $M_d$  (4.30). Если электромеханическая система после прекращения действия возмущений самостоятельно возвращается к установившемуся режиму и восстанавливает равенство (4.29), то работа её является устойчивой. При неустойчивой работе небольшие кратковременные возмущения приводят к изменению  $n$ ,  $I_a$  и т. д., а равенство (4.29) не восстанавливается. В условиях эксплуатации необходимо обеспечить устойчивый режим работы. *Устойчивость работы электромеханической системы зависит от взаимного расположения механических характеристик двигателя и производственного механизма.*

Механическая характеристика  $n = \psi(M)$  (7.3) двигателя постоянного тока как правило является падающей, то есть с увеличением нагрузки (и момента  $M$ ) скорость уменьшается. При параллельном возбуждении это уменьшение незначительно (см. разд. 3.7, с. 149, сл.), при последовательном возбуждении механическая характеристика двигателя – крутопадающая (см. разд. 3.8, с. 156, сл.).

Типичные *производственные механизмы* имеют следующие механические характеристики  $n = \xi(M_{\text{нг}})$ :

1) *момент нагрузки почти не зависит от скорости*, то есть  $M_{\text{нг}} \approx \text{const}$ . Такой характеристикой обладают, например, подъемные краны, лебедки, металлорежущие станки, если установка резца не изменяется, и др.;

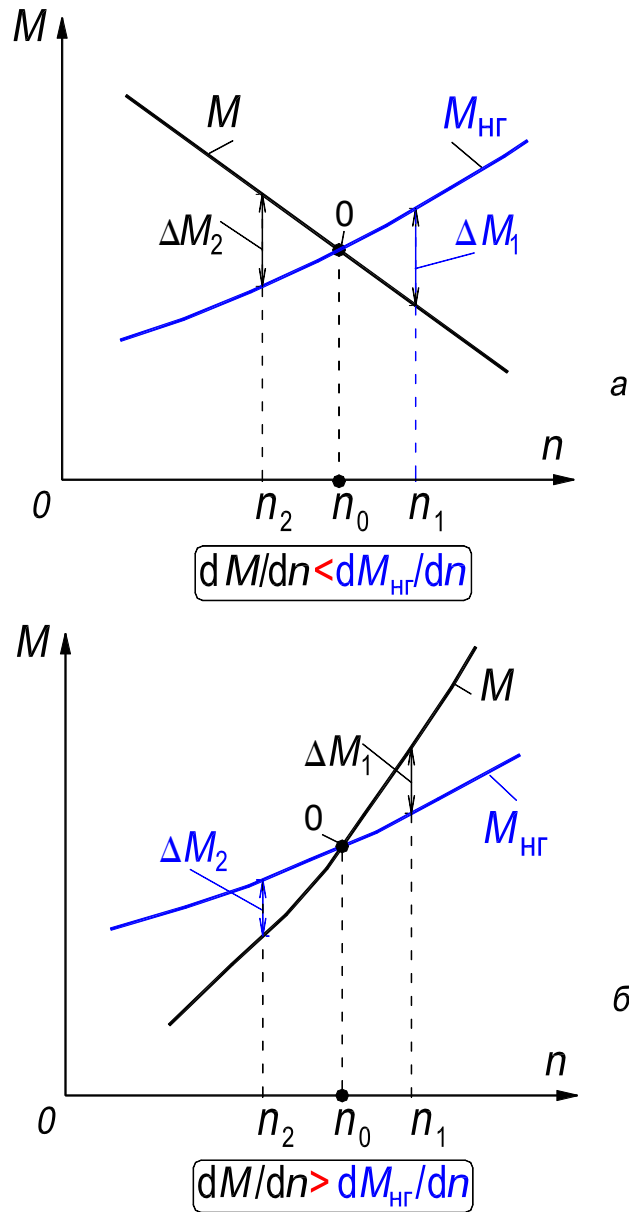
2) *момент нагрузки зависит от квадрата скорости*,  $M_{\text{нг}} \sim n^2$ , то есть зависимость параболическая. Производственные механизмы обладающие такой характеристикой, называют иногда механизмами с вентиляторным моментом, так как у вентиляторов момент сопротивления зависит от квадрата скорости. К механизмам, обладающим параболической механической характеристикой, относятся также центробежные насосы, гребные винты и т.п.;

3) *момент нагрузки уменьшается с увеличением скорости*. Такой характеристикой могут обладать металлорежущие станки.

Рассмотрим варианты взаимного расположения механических характеристик двигателя и производственного механизма (рис. 7.2) и определим критерий устойчивой работы электромеханической системы “двигатель – производственный механизм”.

Механические характеристики на рис. 7.2 соответствуют двум характерным вариантам их взаимного расположения. В точке 0 пересечения характеристик (и на рис. 7.2,а и на рис. 7.2,б) имеет место установившийся режим – выполняется равенство  $M = M_x + M_{\text{нг}} = M_c$  [см. выражение (4.29), с. 71] при частоте вращения  $n = n_0 = \text{const}$ . Однако электромеханическая система представленная на рис. 7.2,а устойчива, а на рис. 7.2,б – неустойчива (для удобства анализа не будем учитывать момент  $M_x$ ).





**Рис. 7.2. Механические характеристики двигателя и производственного механизма:**  
*a* – устойчивая работа; *б* – неустойчивая работа

Действительно, допустим что в результате кратковременного возмущения скорость увеличилась,  $n = n_1 > n_0$ . В первом варианте (рис. 7.2,*a*) появляется избыточный момент  $\Delta M_1$  на величину которого тормозной момент  $M_{\text{HГ}}$  больше момента двигателя  $M$ , поэтому электромеханическая система будет затормаживаться до тех пор пока не восстановятся равенства  $n = n_0 = \text{const}$  и  $M = M_{\text{HГ}}$ . Во втором варианте (рис. 7.2,*б*) появляется избыточный момент  $\Delta M_1$  на величину которого тормозной момент  $M_{\text{HГ}}$  меньше

момента двигателя  $M$ , поэтому электромеханическая система будет продолжать ускоряться и указанные равенства не восстановятся.

Если же в результате кратковременного возмущения скорость уменьшится,  $n = n_2 < n_0$ , то происходит следующее. В первом варианте (рис. 7.2,а) появляется избыточный момент  $\Delta M_2$  на величину которого момент двигателя  $M$  больше тормозного момента  $M_{\text{нг}}$ , поэтому электромеханическая система будет ускоряться до тех пор пока не восстановятся равенства  $n = n_0 = \text{const}$  и  $M = M_{\text{нг}}$ . Во втором варианте (рис. 7.2,б) появляется избыточный момент  $\Delta M_2$  на величину которого момент двигателя  $M$  меньше тормозного момента  $M_{\text{нг}}$ , поэтому электромеханическая система будет продолжать затормаживаться и указанные равенства не восстановятся.

Для взаимного расположения зависимостей моментов на рис. 7.2,а справедливо отношение

$$dM/dn < dM_{\text{нг}}/dn, \quad (7.6)$$

а на рис. 7.2,б отношение

$$dM/dn > dM_{\text{нг}}/dn. \quad (7.7)$$

Таким образом, выражение отношения (7.6) является критерием устойчивой работы электромеханической системы “двигатель – производственный механизм”.

Критерий устойчивой работы (7.6) справедлив не только для двигателей постоянного тока, но и для двигателей переменного тока.

### 3.5. Изменение режима работы

Двигатели постоянного тока, как и двигатели переменного тока [4, с. 128, сл.], обладают при соблюдении условий устойчивости (7.6) способностью автоматически, без внешнего регулирующего воздействия, приспосабливаться к изменившимся условиям работы. В этом смысле можно сказать, что электрические двигатели обладают свойством саморегулирования. Другими словами, двигатель переходит от одного установившегося состояния к другому самостоятельно, без внешнего воздействия. Проиллюстрируем сказанное на примере двигателя параллельного возбуждения.

Допустим, что такой двигатель работает при  $U = \text{const}$ ,  $I_{\text{в}} = \text{const}$ , и, следовательно,  $\Phi \approx \text{const}$  и нагрузочный момент  $M_{\text{нг}}$ , развиваемый рабочей

машиной, увеличивается. Тогда  $M < M_x + M_{нг}$ , возникает  $M_d < 0$  [см. выражение (4.30)] и  $n$  начинает уменьшаться. Но при этом будет уменьшаться также  $E_a$  [см. выражения (4.11), с. 59], а ток  $I_a$  и момент  $M$  начнут увеличиваться [см. выражения (4.34), с. 72 и (4.27), с. 69], причем это будет происходить до тех пор, пока снова не наступит равновесие моментов  $M = M_x + M_{нг}$ . Сказанное представлено в виде следующей логической цепочки, а также в виде графика на рис. 7.3,а.

$M_{нг} \uparrow \rightarrow (M_d < 0) \rightarrow n \downarrow \rightarrow E_a \downarrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow M \uparrow \rightarrow$	Восстанавливается равновесие моментов (4.29) и $M_d = 0$
---	--

Аналогичным образом изменяется также режим, если  $M_{нг}$  уменьшится, причем в этом случае  $n$  и  $E_a$  начнут увеличиваться, а  $I_a$  и  $M$  – уменьшаться до тех пор пока снова будет  $M = M_x + M_{нг}$  и  $M_d = 0$ .

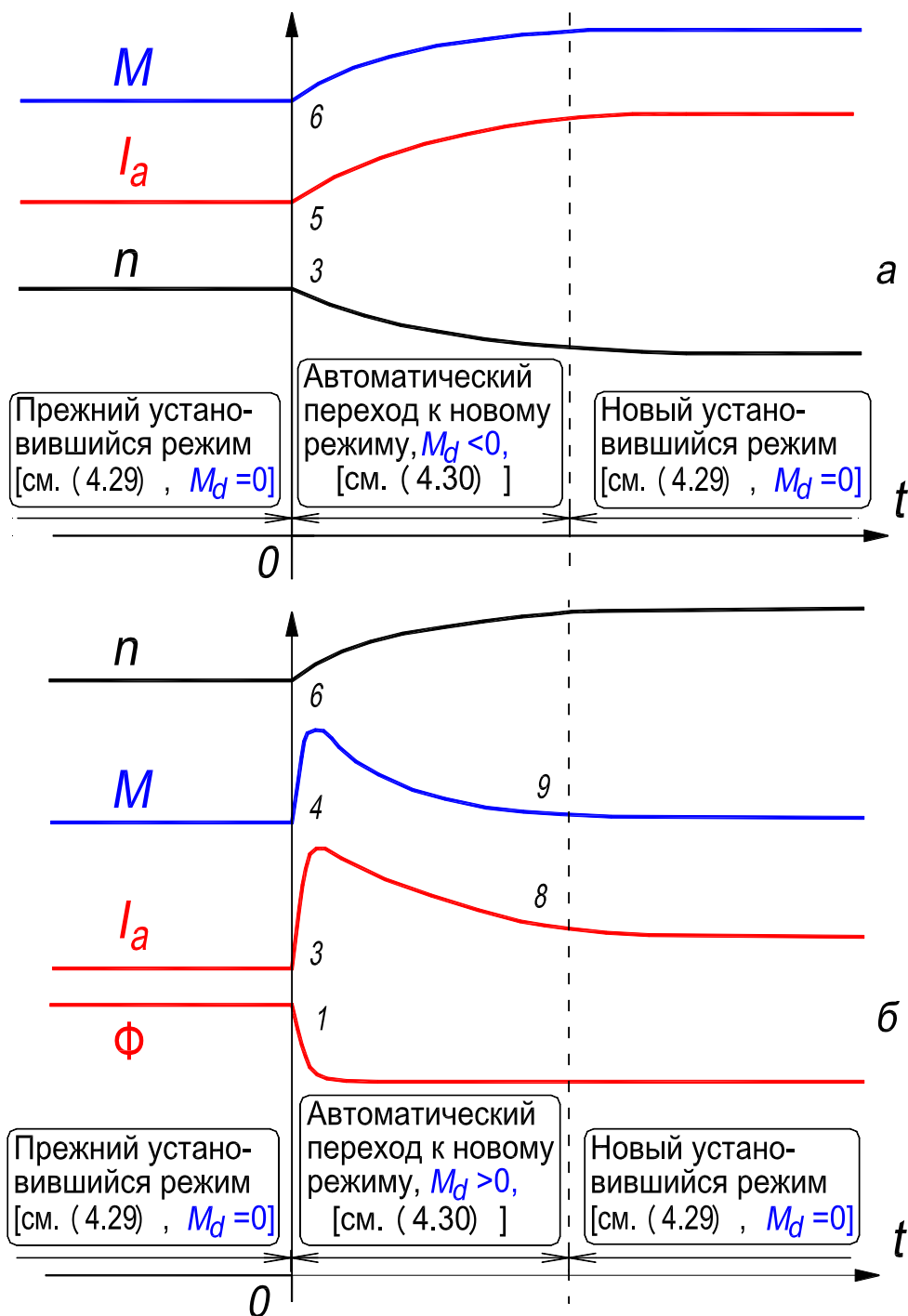
Допустим теперь, что с помощью реостата  $R_B$  (см. рис. 7.1,а) уменьшен ток  $I_B$ . При этом  $\Phi$  будет уменьшаться, однако вследствие механической инерции ротора скорость  $n$  в первый момент не изменится. Тогда  $E_a$  уменьшится [см. выражения (4.11), с. 59], вследствие этого  $I_a$  и  $M$  возрастут [см. выражения (4.34) и (4.27)]. При этом будет  $M > M_x + M_{нг}$ , в соответствии с равенством (4.30)  $M_d > 0$ , и скорость  $n$  начнет увеличиваться. Это вызовет, согласно тем же соотношениям, увеличение  $E_a$  и уменьшение  $I_a$  и  $M$  до тех пор, пока снова не наступит равновесие моментов  $M = M_x + M_{нг}$  и  $M_d = 0$ . Сказанное иллюстрирует следующая логическая цепочка, а также рис. 7.3,б.

$\Phi \downarrow \rightarrow E_a \downarrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow M \uparrow \rightarrow (M_d > 0) \rightarrow n \uparrow \rightarrow E_a \uparrow \rightarrow I_a \downarrow \rightarrow M \downarrow \rightarrow$ $\rightarrow$ восстанавливается равновесие моментов (4.29) и $M_d = 0$
--

При увеличении  $I_B$  явления развиваются в обратном направлении. Необходимо отметить, что резких изменений  $I_B$  при регулировании допускать нельзя, так как  $U$  и  $E_a$  являются близкими по значению [см. выражение (4.34), с. 72] и небольшое изменение  $\Phi$  и  $E_a$  ведет к большим изменениям  $I_a$  и  $M$ .

Аналогичным образом происходит переход к новому режиму при изменении других внешних условий (например, введение сопротивления в цепь якоря и т. д.), а также в двигателях с другими способами возбуждения.

Из изложенного следует, что поведение двигателя при установившемся режиме работы и переходах к новому режиму работы всецело определяется уравнениями равновесия моментов (4.30) и напряжения цепи якоря (4.33), с. 72.



**Рис. 7.3. Переход двигателя к новому режиму работы:**  
 а – при увеличении момента нагрузки; б – при уменьшении потока возбуждения  
 [см. выражения (4.29) и (4.30), с. 71]

### 3.6. Способы регулирования частоты вращения двигателя

Способы регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока следуют из выражений для скоростной (7.1) и механической (7.3) характеристик двигателя. Возможны три способа регулирования скорости вращения.

1. *Наиболее удобным, распространенным и экономичным является способ регулирования скорости изменением потока  $\Phi$ , т. е. тока возбуждения  $I_B$ .*

С уменьшением  $\Phi$ , согласно выражению (7.1), скорость возрастает. Этот способ позволяет *регулировать скорость вверх от номинальной* при токе возбуждения  $I_B < I_{B,ном}$ . При таком регулировании КПД двигателя остается высоким, так как мощность цепи возбуждения мала, в том числе мала и мощность реостатов для регулирования тока возбуждения. К тому же при уменьшении тока  $I_B$  мощность возбуждения уменьшается. Верхний предел регулирования скорости вращения ограничивается механической прочностью машины и условиями её коммутации.

2. Другой способ регулирования скорости заключается во включении последовательно в цепь якоря регулируемого сопротивления  $R_p$ .

Вместо выражения (7.1) при этом имеем

$$n = [U - I_a(R_a + R_p)] / c_e \Phi. \quad (7.8)$$

Этот способ дает возможность *регулировать скорость вниз от номинальной* и связан со значительными потерями в сопротивлении  $R_p$  и понижением КПД. По этой причине данный способ применяется в основном для двигателей небольшой мощности, а для более мощных двигателей используется редко и только кратковременно (пуско-наладочные режимы и т. д.).

3. Регулирование скорости осуществляется также путём регулирования напряжения цепи якоря. Так как работа двигателя при  $U > U_{ном}$  недопустима, то данный способ, согласно выражениям (7.1) и (7.3), дает возможность *регулировать скорость также вниз от номинальной*. КПД двигателя при этом остается высоким, так как никаких добавочных источников потерь в схему двигателя не вносится. Однако в этом случае необходим отдельный источник тока с регулируемым напряжением, что удорожает установку (см. разд. 3.7.2.3, с. 153, сл.).

Способы регулирования частоты вращения  $n$  двигателей с различным возбуждением, рассматриваются в последующих разделах.

## 3.7. Характеристики двигателей параллельного возбуждения

### 3.7.1. Естественные скоростная и механическая характеристики

Рассмотрим более подробно характеристики двигателя параллельного возбуждения (термин 35, с. 21), которые определяют его рабочие свойства (рис. 4.15,б, с. 68).

Скоростная [ $n = \varphi(I_a)$ ] и механическая [ $n = \psi(M)$ ] характеристики двигателя описываются равенствами (7.1) и (7.3) при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ . При отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря (в качестве этого сопротивления используются пусковое или/и регулировочное сопротивление) эти характеристики называются *естественными*.

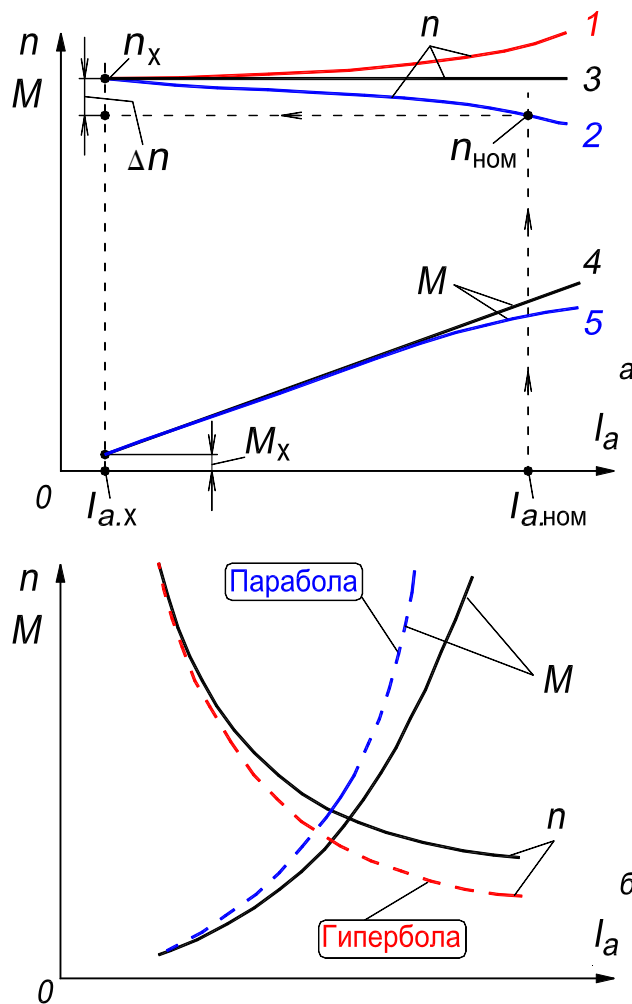
Если щётки находятся на геометрической нейтрали, то на изменение скорости влияют две причины: 1) действие поперечной реакции якоря – при увеличении тока  $I_a$  поток  $\Phi$  несколько уменьшится. В результате этого скорость  $n$ , согласно выражению (7.1), *будет стремиться возрасти*; 2) падение напряжения  $I_a R_a$  – вызывает *уменьшение скорости*. Поэтому, возможны три вида скоростной характеристики (рис. 7.4,а): 1 – при преобладании влияния первой причины скорость растёт (поток возбуждения несколько уменьшается); 2 – при преобладании влияния второй причины скорость уменьшается (растёт падение напряжения  $I_a R_a$ ); 3 – при взаимной компенсации действия указанных двух причин скорость почти не изменяется.

Ввиду того что изменение потока  $\Phi$  незначительно характеристики почти прямолинейны, причем скоростные (7.1) и механические (7.3) характеристики совпадают по форме.

Характеристики вида 1 (рис. 7.4) неприемлемы по условиям устойчивой работы (см. разд. 3.4, с. 142, сл.). Поэтому двигатели параллельного возбуждения изготавливаются с несколько падающими характеристиками вида 2.

В современных высоко использованных машинах (в таких машинах значения магнитной индукции в магнитопроводе и плотность тока в обмотках увеличены) ввиду довольно сильного насыщения зубцов якоря размагничивающее влияние поперечной реакции якоря может быть настолько большим, что получить характеристику вида 2 невозможно. Тогда для получения такой характеристики на основных полюсах помещают, кроме параллельной, слабую последовательную обмотку возбуждения *согласного включения*, МДС которой составляет до 10 % от МДС парал-

лельной обмотки возбуждения. При этом уменьшение  $\Phi$  под воздействием поперечной реакции якоря частично или полностью компенсируется за счет действия последовательной обмотки возбуждения. Такую *последовательную обмотку возбуждения называют стабилизирующей*, а двигатель с такой обмоткой по-прежнему называется двигателем параллельного возбуждения.



**Рис. 7.4.** Зависимости скорости  $n$  и момента  $M$  двигателя от тока якоря  $I_a$ :  
 а – при параллельном возбуждении; б – при последовательном возбуждении

Изменение скорости вращения  $\Delta n$  (рис. 7.4,а) при переходе от холостого хода ( $I_a = I_{a,x}$ ) к номинальной нагрузке ( $I_a = I_{a,ном}$ ) у двигателя параллельного возбуждения при работе на естественной характеристике мало и составляет 2...8 % от  $n_{ном}$ . Такие *незначительно падающие характеристики называются жесткими*. Двигатели параллельного возбуждения

с жесткими характеристиками применяются в установках, в которых требуется, чтобы скорость вращения при изменении нагрузки сохранялась приблизительно постоянной (металлорежущие станки и пр.).

Зависимость электромагнитного момента двигателя от тока якоря,  $M = \varphi(I_a)$ , определяется выражением (4.27), с. 69. Если пренебречь влиянием поперечной реакции якоря, то эту характеристику можно считать прямолинейной (линия 4 на рис. 7.4,а). При учете размагничивающего действия реакции якоря момент будет возрастать несколько медленнее тока якоря, что будет заметно в области больших токов (кривая 5).

### 3.7.2. Регулирование скорости двигателей параллельного возбуждения

#### 3.7.2.1. Регулирование скорости ослаблением магнитного потока

Такое регулирование скорости производится обычно с помощью реостата в цепи возбуждения  $R_B$  (рис. 4.15,б и рис. 7.1,а). При отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря характеристики,  $n = \varphi(I_a)$  и  $n = \psi(M)$ , определяемые равенствами (7.1) и (7.3), для разных значений  $R_B$  (и соответственно  $I_B$  и  $\Phi$ ) имеют вид, показанный на рис. 7.5. Все характеристики  $n = \varphi(I_a)$  сходятся на оси абсцисс ( $n = 0$ ) в общей точке при весьма большом токе  $I_a$ , который, согласно выражениям (4.34) и (4.35), с. 72, равен

$$I_{a.п} = U/R_a.$$

Нижняя характеристика на рис. 7.5 соответствует номинальному потоку ( $R_B=0$ ).

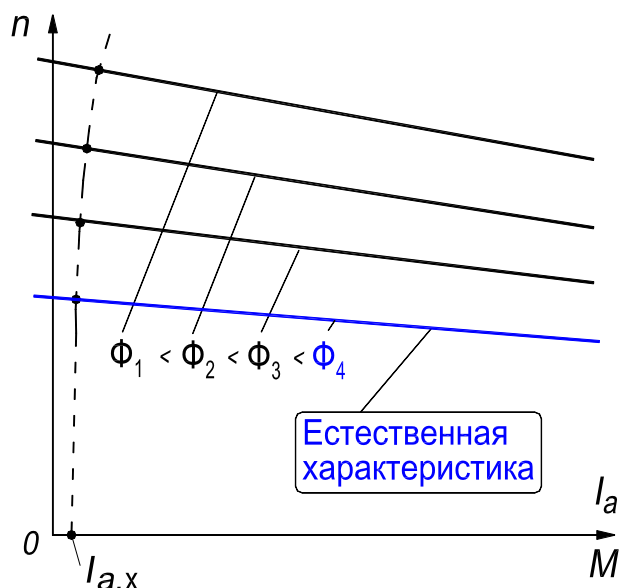


Рис. 7.5. Скоростная и механическая характеристики при ослаблении потока



Точка холостого хода двигателя ( $M = M_x, I_a = I_{a.x}$ ) лежит несколько правее оси ординат на рис. 7.5. С увеличением скорости вращения  $n$  вследствие увеличения механических потерь  $p_{мх}$ , величины  $M_x$  и  $I_{a.x}$  также несколько увеличиваются (тонкая штриховая линия на рис. 7.5).

Двигатели общепромышленного применения допускают по условиям коммутации регулирование скорости ослаблением поля возбуждения (за счет уменьшения тока возбуждения) в пределах  $n_{ном} \dots 2n_{ном}$ . Изготавливаются также двигатели с регулированием скорости таким способом в пределах  $n_{ном} \dots 5n_{ном}$  или даже  $n_{ном} \dots 8n_{ном}$ , но в этом случае для ограничения максимального напряжения между коллекторными пластинами (см. в Работе №1 разд. 3.2.6 на с. 102, сл.) необходимо увеличить воздушный зазор, применить компенсационную обмотку и др. Стоимость двигателя при этом увеличивается.

### 3.7.2.2. Регулирование скорости сопротивлением в цепи якоря, искусственные механическая и скоростная характеристики

Если последовательно в цепь якоря включить добавочное сопротивление  $R_p$  (рис. 7.6, а), то вместо выражений (7.1) и (7.3) получим

$$n = [U - (R_a + R_p)I_a] / c_e \Phi. \quad (7.9)$$

$$n = U / c_e \Phi - (R_a + R_p)M / c_e c_m \Phi^2. \quad (7.10)$$

Сопротивление  $R_p$  регулируемое и должно быть рассчитано, в отличие от пускового сопротивления  $R_{п}$ , на *длительную* работу. Цепь возбуждения должна быть включена непосредственно на напряжение сети.

Характеристики  $n = \varphi(I_a)$  и  $n = \psi(M)$ , для различных значений  $R_p = \text{const}$  при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$  изображены на рис. 7.6, б ( $R_{p1} < R_{p2} < R_{p3}$ ). Верхняя характеристика ( $R_p = 0$ ) является *естественной*. Каждая из характеристик пересекает ось абсцисс ( $n = 0$ ) в точке, для которой

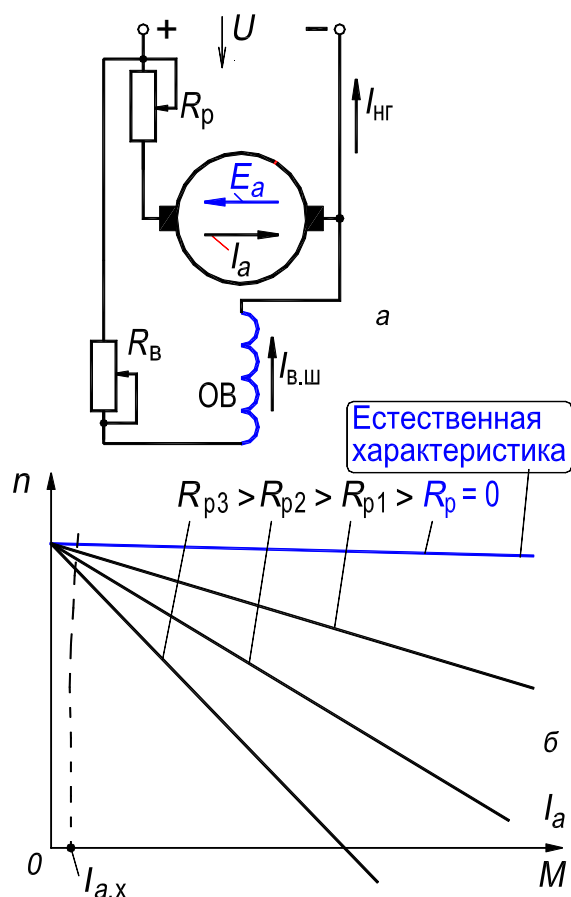
$$I_a = U / (R_a + R_p) \text{ и } M = c_m \Phi U / (R_a + R_p).$$

Как видно из рис. 7.6, б, при включении  $R_p$  характеристики становятся менее жесткими, а при больших значениях  $R_p$  – круто падающими, или мягкими. Чем больше  $R_p$ , тем меньше  $n$  и ниже КПД.

### 3.7.2.3. Регулирование скорости изменением напряжения якоря

Регулирование скорости изменением напряжения якоря может осуществляться с помощью агрегата “генератор – двигатель” (Г – Д), называемого также

агрегатом Леонарда (рис. 7.7,*a*). В этом случае первичный двигатель ПД (переменного тока, внутреннего сгорания и т. п.) вращает с постоянной скоростью генератор постоянного тока Г. Якорь генератора непосредственно приключен к якорю двигателя постоянного тока Д, который служит приводом рабочей машины РМ. Обмотки возбуждения генератора ОВГ и двигателя ОВД питаются от независимого источника – сети постоянного тока (рис. 7.7,*a*) или от возбуждителей (небольших генераторов постоянного тока) на валу первичного двигателя ПД. Регулирование тока возбуждения генератора  $I_{в.Г}$  должно производиться практически от нуля (на рис. 7.7,*a* с помощью реостата, включенного по схеме потенциометра  $RP$ ). При необходимости реверсирования двигателя можно изменить полярность напряжения  $U_G$  генератора (на рис. 7.7,*a* с помощью переключателя П).



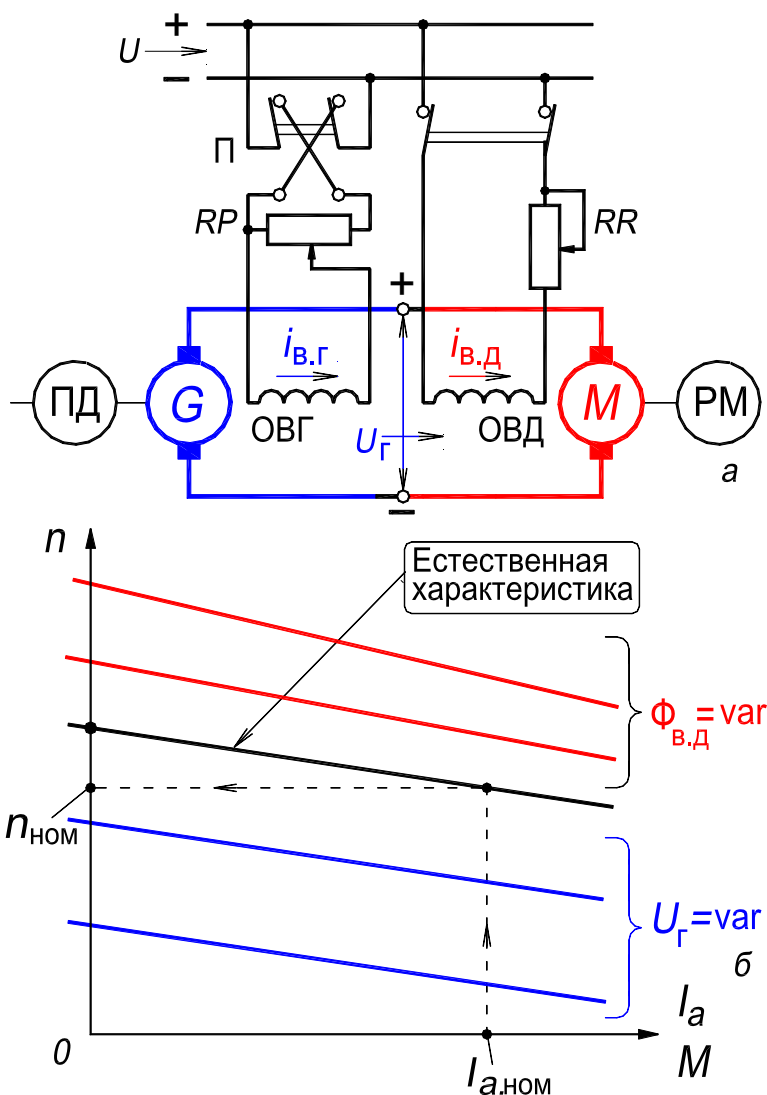
**Рис. 7.6. Наглядное изображение:**

*a* – схема регулирования скорости сопротивлением в цепи якоря;

*б* – скоростная и механическая характеристики

Пуск двигателя Д и регулирование его скорости осуществляют следующим образом. При максимальном  $I_{в.Д}$  и  $I_{в.Г} = 0$  производят пуск первичного двигателя ПД. Затем плавно увеличивают  $I_{в.Г}$ , и при небольшом напряжении генератора  $U_G$  двигатель Д

придет во вращение. Регулируя, далее,  $U_{\Gamma}$  в пределах до  $U_{\Gamma} = U_{\text{НОМ}}$  можно получить любые скорости вращения двигателя  $n \leq n_{\text{НОМ}}$ . Дальнейшее увеличение  $n > n_{\text{НОМ}}$  возможно путём уменьшения  $I_{\text{в.д.}}$ . Для реверсирования двигателя уменьшают  $I_{\text{в.г.}}$  до нуля, переключают ОВГ и снова увеличивают  $I_{\text{в.г.}}$  от значения  $I_{\text{в.г.}} = 0$ . На рис. 7.7,б представлены скоростные характеристики двигателя Д, полученные за счет регулирования напряжения генератора  $U_{\Gamma}$  (они расположены ниже естественной характеристики), и скоростные характеристики, полученные за счет регулирования тока возбуждения  $I_{\text{в.д.}}$  двигателя Д (они расположены выше естественной характеристики).



**Рис. 7.7. Наглядное изображение:**

*а* – схема Г – Д; *б* – скоростная и механическая характеристики

Когда рабочая машина создает резко пульсирующую нагрузку (например, некоторые прокатные станы) и нежелательно, чтобы пики нагрузки

полностью передавались первичному двигателю или в сеть переменного тока, двигатель  $M$  можно снабдить маховиком.

Рассмотренный агрегат используют при необходимости регулирования скорости вращения двигателя с высоким КПД в широких пределах – до  $n_{ном} \dots 100n_{ном}$  (крупные металлорежущие станки, прокатные станы и т. д.).

### 3.7.3. Рабочие характеристики двигателя

Рабочие характеристики представляют собой зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , потребляемого тока  $I$ , скорости  $n$ , момента  $M$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U = const$  и неизменных положениях регулирующих реостатов в цепи якоря и в цепи возбуждения. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения ( $P_{ном} = 10$  кВт) при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря представлены на рис. 7.8 (термин 74, с. 25).

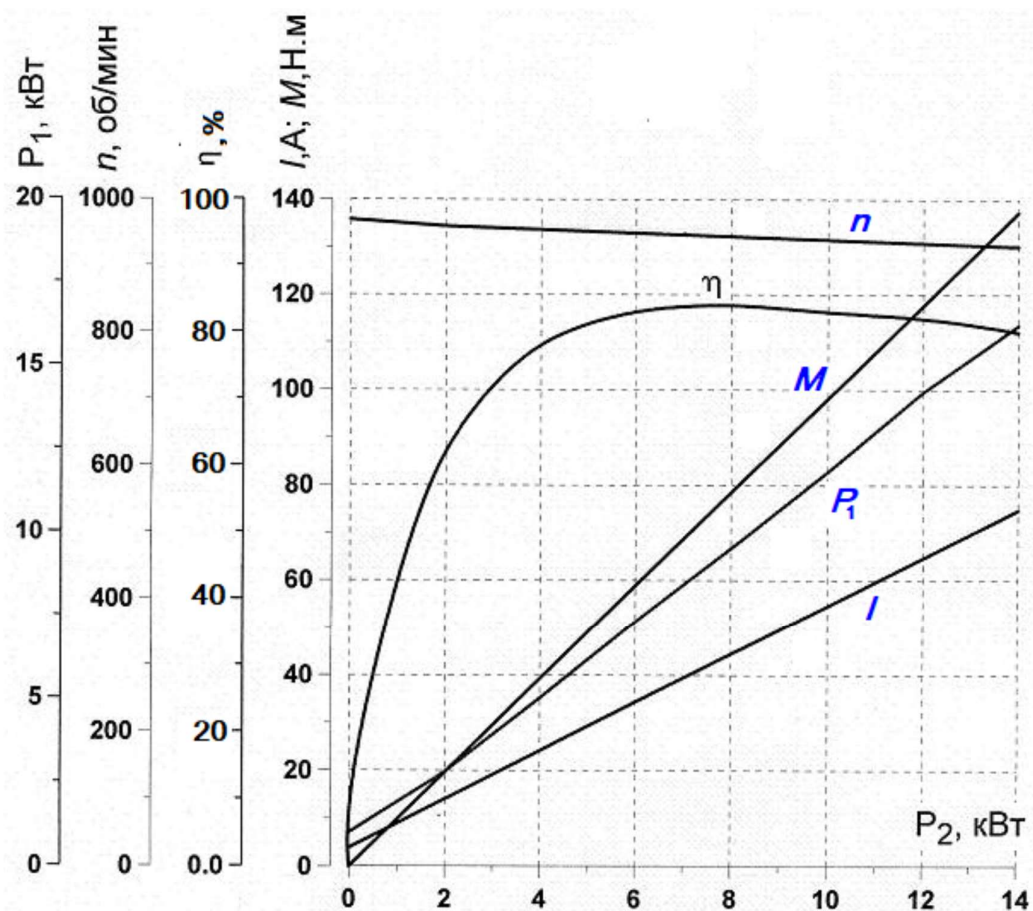


Рис. 7.8. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Одновременно с увеличением мощности на валу  $P_2$  (увеличивается нагрузка на валу) растет и момент двигателя  $M$ . Так как скорость  $n$  несколько

уменьшается, то  $M \sim P_2/n$  растет несколько быстрее  $P_2$ . Увеличение  $P_2$  и  $M$ , естественно, сопровождается увеличением тока двигателя  $I$ . Пропорционально  $I$  растет также потребляемая из сети мощность  $P_1$ . При холостом ходе ( $P_2 = 0$ ) КПД  $\eta = 0$ , затем с увеличением  $P_2$  сначала  $\eta$  быстро растет, но при больших нагрузках в связи с большим ростом потерь в цепи якоря  $\eta$  снова начинает уменьшаться. Условие максимума КПД – равенство постоянных потерь (к ним относят потери магнитные  $p_{\text{мг}} \approx \text{const}$  и механические  $p_{\text{мх}} \approx \text{const}$ ) переменным потерям (электрические потери в якорной цепи  $p_{\text{эл}}$ ). Зависимость КПД от нагрузки на валу имеет типичный вид, как и для других электрических машин.

### 3.8. Характеристики двигателей последовательного возбуждения

#### 3.8.1. Естественные скоростная и механическая характеристики.

##### Область применения

В двигателях последовательного возбуждения (термин 36, с. 21) ток якоря одновременно является также током возбуждения:  $I_B = I_a = I$  (рис. 4.15,б). Поэтому поток  $\Phi$  изменяется в широких пределах и можно написать, что

$$\Phi = k_{\Phi} I. \quad (7.11)$$

Коэффициент пропорциональности  $k_{\Phi}$  в значительном диапазоне нагрузок, при  $I < I_{\text{ном}}$ , является практически постоянным, и лишь при  $I > (0,8 \dots 0,9) I_{\text{ном}}$  вследствие насыщения магнитной цепи  $k_{\Phi}$  начинает несколько уменьшаться.

Учитывая соотношение (7.11) для двигателя последовательного возбуждения вместо выражений (7.1), (7.2) и (7.3) получим

$$n = (U - IR_a) / c_e k_{\Phi} I = U / c_e k_{\Phi} I - R_a / c_e k_{\Phi} = \varphi(I); \quad (7.12)$$

$$M = c_M I \Phi = c_M k_{\Phi} I^2; \quad (7.13)$$

$$n = c_M^{-1/2} U / c_e k_{\Phi}^{1/2} M^{1/2} - R_a / c_e k_{\Phi} = \psi(M). \quad (7.14)$$

Скоростная характеристика  $n = \varphi(I_a)$  двигателя [см. выражение (7.12)], представлена на рис. 7.4,б. При  $k_{\Phi} = \text{const}$  зависимость показана пунктирной линией, она является гиперболой.

Характеристика момента двигателя от тока якоря,  $M = \psi(I_a)$ , в соответствии с соотношением (7.13) изображена на рис. 7.4,б. При  $k_{\Phi} = \text{const}$  зависимость показана пунктирной линией, являющейся параболой.

При учете насыщения ( $k_f$  несколько уменьшается) эти характеристики представлены сплошными линиями.

При малых значениях тока  $I$  скорость двигателя становится недопустимо большой. Поэтому *работа двигателей последовательного возбуждения на холостом ходу не допускается* (за исключением самых маленьких). Обычно *минимально допустимая нагрузка*  $P_2 = (0,2 \dots 0,25)P_{\text{ном}}$ .

Поскольку у двигателей параллельного возбуждения  $M \sim I$  (4.27), а у двигателей последовательного возбуждения приблизительно  $M \sim I^2$  (7.13) и при пуске допускается  $I_{\text{п}} = (1,5 \dots 2,0)I_{\text{ном}}$ , то двигатели последовательного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент по сравнению с двигателями параллельного возбуждения. Кроме того, у двигателей параллельного возбуждения  $n \approx \text{const}$ , а у двигателей последовательного возбуждения, согласно выражениям (7.12) и (7.14), приблизительно (при  $R_a = 0$ )

$$n \sim U/I \sim U/M^{1/2}.$$

Поэтому у двигателей параллельного возбуждения

$$P_2 = 2\pi n M \sim M,$$

а у двигателей последовательного возбуждения

$$P_2 = 2\pi n M \sim M^{1/2}.$$

Таким образом, у двигателей последовательного возбуждения при изменении момента нагрузки  $M_{\text{нг}} = M$  в широких пределах мощность изменяется в меньших пределах, чем у двигателей параллельного возбуждения.

Поэтому для двигателей последовательного возбуждения менее опасны перегрузки по моменту. В связи с этим двигатели последовательного возбуждения имеют существенные преимущества в случае тяжелых условий пуска и изменения момента нагрузки в широких пределах. Они широко применяются для электрической тяги (трамвай, метро, троллейбусы, электровозы и тепловозы на железных дорогах) и в подъемно-транспортных установках.

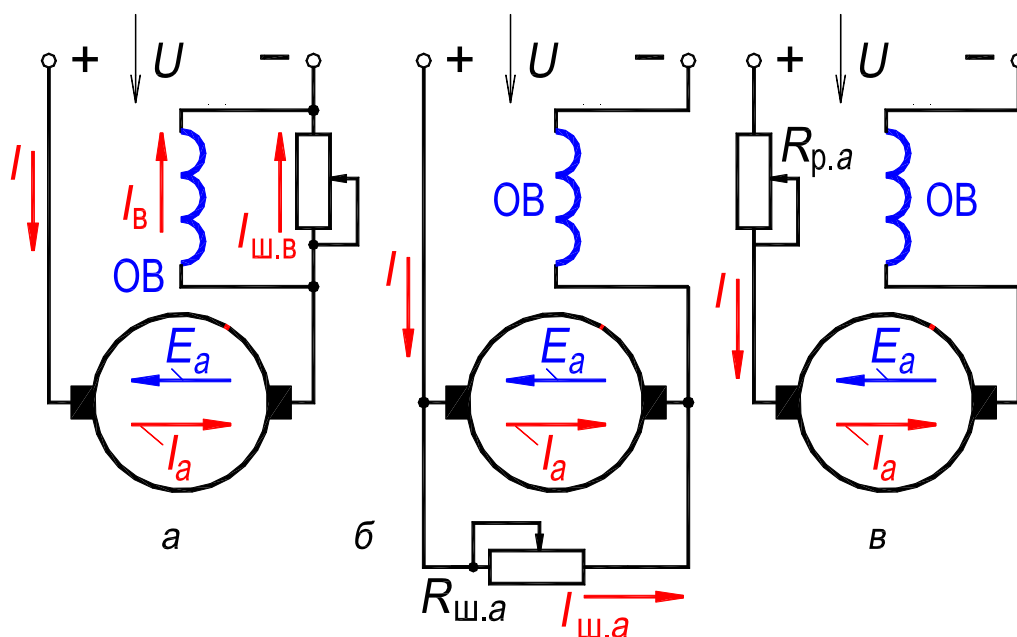
### **3.8.2. Регулирование скорости двигателей последовательного возбуждения**

*Регулирование скорости посредством ослабления поля.*

Регулирование скорости  $n$  посредством ослабления поля производится либо путём шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением  $R_{\text{ш.в}}$  (рис. 7.9,а), либо уменьшением числа включенных в работу витков обмотки

возбуждения. В последнем случае должны быть предусмотрены соответствующие выводы из обмотки возбуждения. При шунтировании обмотки возбуждения ток в ней уменьшается, а скорость  $n$  соответственно увеличивается.

Так как сопротивление обмотки возбуждения  $R_B$  и падение напряжения на нём малы, то  $R_{ш.в}$  также должно быть мало. Потери в сопротивлении  $R_{ш.в}$  поэтому малы, а суммарные потери на возбуждение при шунтировании даже уменьшаются. Вследствие этого КПД двигателя остается высоким, и такой способ регулирования широко применяется на практике.



**Рис. 7.9.** Схемы для регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения:  
 а – посредством ослабления поля; б – посредством шунтирования якоря;  
 в – включением сопротивления в цепь якоря

#### *Регулирование скорости путём шунтирования якоря.*

При шунтировании якоря (рис. 7.9,б) ток и поток возбуждения возрастают, а скорость уменьшается. Так как падение напряжения  $R_B I$  мало и поэтому можно принять  $R_B \approx 0$ , то сопротивление  $R_{ш.а}$  практически находится под полным напряжением сети, его значение должно быть значительным, потери в нём будут велики и КПД сильно уменьшится.

Кроме того, шунтирование якоря эффективно только тогда, когда магнитная цепь не насыщена. В связи с этим шунтирование на практике используется редко.

*Регулирование скорости включением сопротивления в цепь якоря (рис. 7.9,в).*

Этот способ позволяет регулировать  $n$  вниз от номинального значения. Так как одновременно при этом значительно уменьшается КПД, то такой способ регулирования находит ограниченное применение. Выражения для скоростной и механической характеристик в этом случае получим, если в равенствах (7.12) и (7.14) заменим  $R_a$  на  $R_a + R_{p.a.}$

*Регулирование скорости изменением напряжения.*

Этим способом можно регулировать  $n$  вниз от номинального значения с сохранением высокого КПД. Рассматриваемый способ регулирования широко применяется в транспортных установках, где на каждой ведущей оси устанавливается отдельный двигатель и регулирование осуществляется путём переключения этих двигателей с параллельного включения в сеть на последовательное.

### **3.9. Характеристики двигателей смешанного возбуждения**

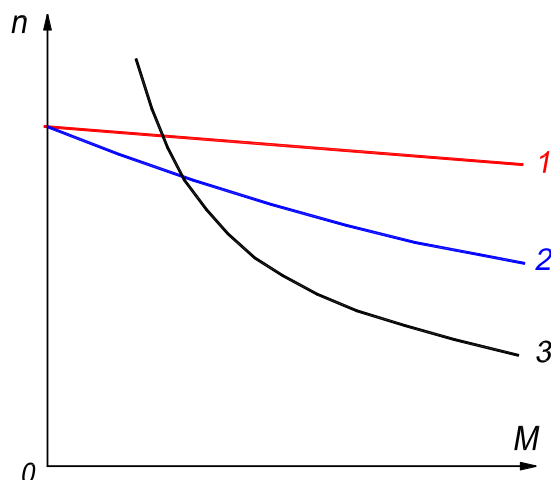
При *встречном* включении последовательной обмотки возбуждения двигателя смешанного возбуждения поток  $\Phi$  с увеличением нагрузки будет уменьшаться (термины 37, 39, с. 21). Вследствие этого характеристики  $n = \varphi(I)$  и  $n = \psi(M)$  будут иметь характер кривой 1 на рис. 7.4,а. Так как работа при этом обычно неустойчива, то *двигатели с встречным включением последовательной обмотки возбуждения не применяются.*

При *согласном* включении последовательной обмотки возбуждения поток  $\Phi$  с увеличением нагрузки возрастает (термин 38, с. 21). Поэтому такой двигатель смешанного возбуждения имеет более мягкую механическую характеристику (кривая 2 на рис. 7.10) по сравнению с двигателем параллельного возбуждения (кривая 1), но более жесткую по сравнению с двигателем последовательного возбуждения (кривая 3). В зависимости от назначения двигателя доля последовательной обмотки в создании полной МДС возбуждения может меняться в широких пределах.

Скорость вращения двигателей смешанного возбуждения (рис. 4.15,з) обычно регулируется так же, как и в двигателях параллельного возбуждения, хотя в принципе можно использовать также способы, применяемые в двигателях последовательного возбуждения.



Двигатели смешанного возбуждения применяются в условиях, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы значительные изменения скорости вращения при изменении нагрузки. Эти двигатели используются также в случаях, когда момент нагрузки изменяется в широких пределах, так как при этом мощность двигателя снижается, как и у двигателя с последовательным возбуждением. В связи с этим двигатели смешанного возбуждения применяются для привода на постоянном токе компрессоров, строгальных станков, печатных машин, прокатных станов, подъемников и т. д. Двигатели смешанного возбуждения используются также для электрической тяги, так как при этом легче, чем в случае применения двигателей последовательного возбуждения, осуществляется торможение подвижных составов с возвращением энергии в контактную сеть постоянного тока путём перевода машины в генераторный режим работы.



**Рис. 7.10. Механические характеристики двигателя:**

1 — с параллельным возбуждением; 2 — со смешанным возбуждением при согласном включении обмоток возбуждения; 3 — с последовательным возбуждением

### **3.10. Отключение двигателя от сети и торможение**

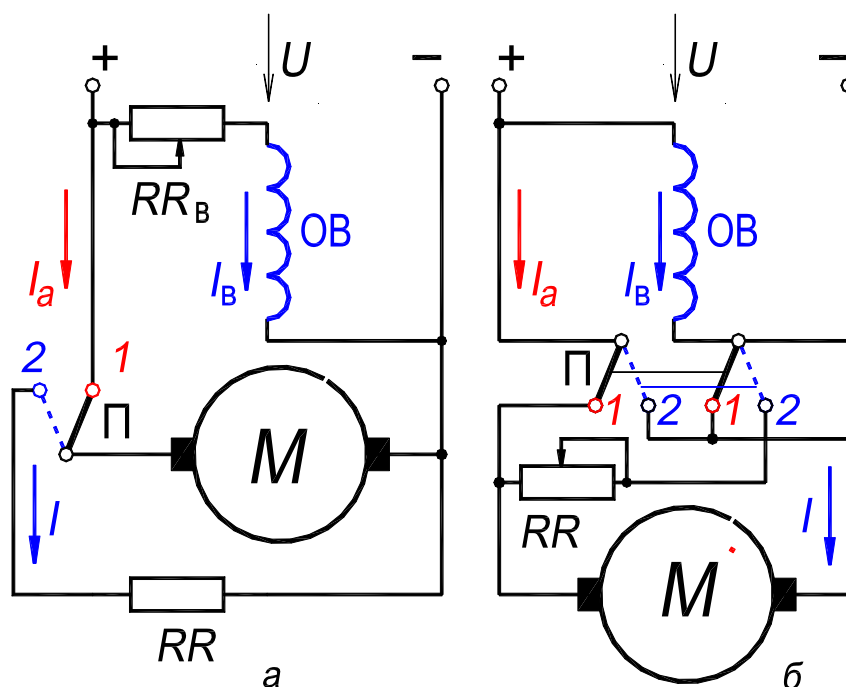
Отключение двигателя от сети производится выключателем. За счет накопленной кинетической энергии выбег двигателя вместе с приводным механизмом может продолжаться некоторое время. Время выбега уменьшается, если обмотка возбуждения не отключается от сети. Тогда за счет потерь в стали двигатель останавливается быстрее.

Во многих случаях торможение следует осуществлять быстро, а иногда и точно (станки, лифты, транспорт). *Возможны три основных типа*

*быстрого останова двигателей постоянного тока: динамическое торможение, торможение противовключением и рекуперативное торможение.*

При *динамическом* торможении (рис. 7.11,*а*) якорь отключают от сети и переключают на резистор  $R$  (выключатель  $\Pi$  переведен из положения 1 в положение 2). Обмотка возбуждения  $ОВ$  остается подключенной к сети. Торможение в этом случае осуществляется быстрее, так как к потерям в стали в магнитопроводе добавляются электрические потери в обмотке якоря и добавочном резисторе  $R$  (термин 48, с. 22).

Торможение *противовключением* (рис. 7.11,*б*) осуществляется путём изменения направления тока в якоря за счет переключения выводов якоря к сети (выключатель  $\Pi$  переведен из положения 1 в положение 2). При этом создается электромагнитный момент, направленный навстречу вращения якоря. Эта схема применяется для быстрого останова двигателя, который проходит в трудных условиях ухудшения коммутации, быстрого выделения большого количества тепла. Для ограничения тока в якоря применяется добавочное сопротивление  $R$ . После останова якоря двигатель отключают от сети. Схема, представленная на рис. 7.11,*б*, позволяет также осуществить реверс двигателя (термин 50, с. 22).



**Рис. 7.11. Схемы отключения двигателя от сети:**  
*а* – динамическое торможение; *б* – торможение противовключением  
 (направление тока  $I$  соответствует положению 2 выключателя  $\Pi$ )

При *рекуперативном* торможении двигатель переводится в генераторный режим, а затем отключается от сети. Достоинство этого способа в том, что при рекуперативном торможении часть кинетической энергии преобразуется в электрическую и отдается в сеть, а при других способах торможения кинетическая энергия преобразуется в тепло (термин 49, с. 22).

*Для того чтобы двигатель перевести в генераторный режим, надо повысить ЭДС. Когда  $E_a$  будет больше  $U$ , ток в якоре изменит направление и двигатель перейдет в генераторный режим [см. выражение (4.34), с. 72]. При этом изменяется направление электромагнитного момента [см. выражение (4.27), с. 69]. Пока  $E_a > U$  в сеть будет отдаваться электрическая энергия.*

Рекуперативное торможение широко применяется на транспорте. Рекуперация может осуществляться двигателями параллельного и смешанного возбуждения. Двигатели последовательного возбуждения не позволяют осуществлять рекуперацию энергии.

## 4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке в состав которой входят: исследуемый двигатель постоянного тока (ДПТ) параллельного возбуждения  $M1$  и ДПТ параллельного возбуждения  $M2$ , используемый в режиме *электромагнитного тормоза* (схема на рис. 7.12). На рис. 7.13 приведена фотография передней (приборной) панели стенда “Двигатель постоянного тока”. На рис. 7.14 – фотография стенда с исследуемым агрегатом, расположенным слева.

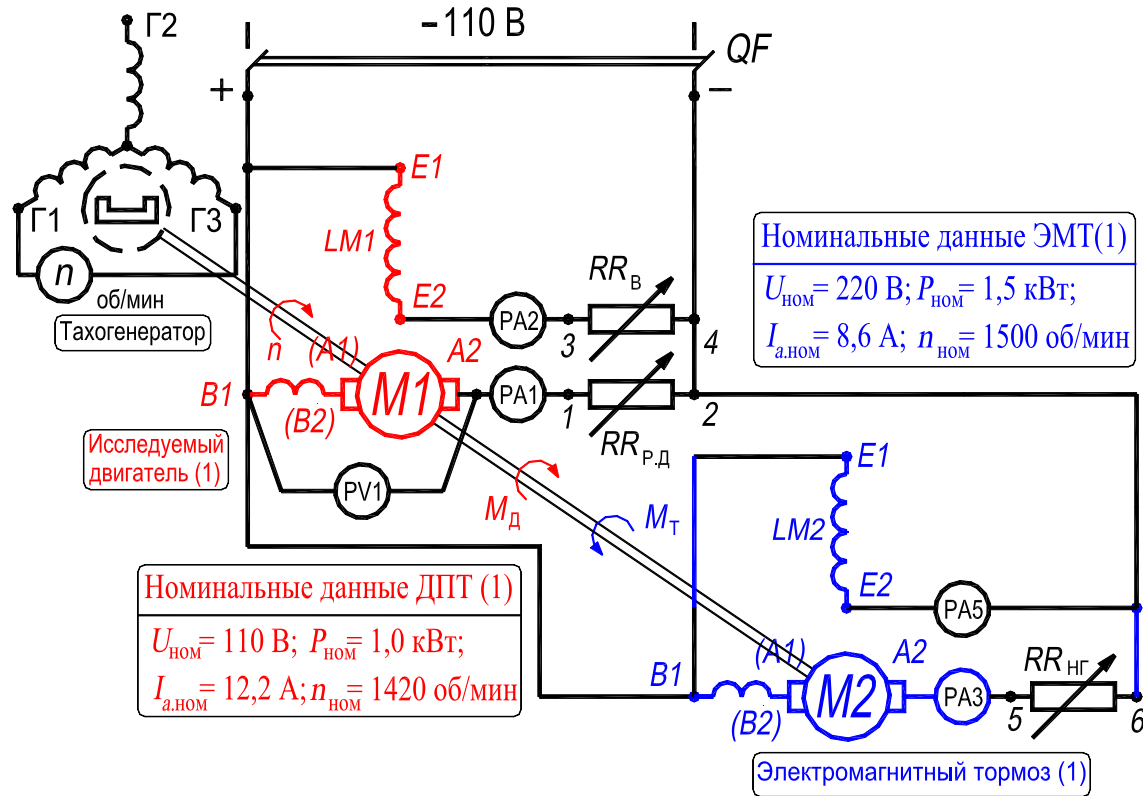
Величина тормозного момента двигателя  $M2$  регулируется реостатом (на рис. 7.12 реостат обозначен символом  $RR_{НГ}$ ), включенным последовательно с якорем и определяется из выражения:

$$M_T = 1,285 I_{a.T}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (7.15)$$

где  $I_{a.T}$  – ток в обмотке якоря электромагнитного тормоза ( $PA3$ ).

Значения номинальных данных двигателей  $M1$  и  $M2$  – см. разд. 5.2, с. 73 и 74.

Собрать схему включения двигателей  $M1$  и  $M2$  (параллельные обмотки возбуждения  $LM1$  и  $LM2$ ) (рис. 7.12).



**Рис. 7.12. Схема лабораторной установки для исследования двигателя с параллельным возбуждением**

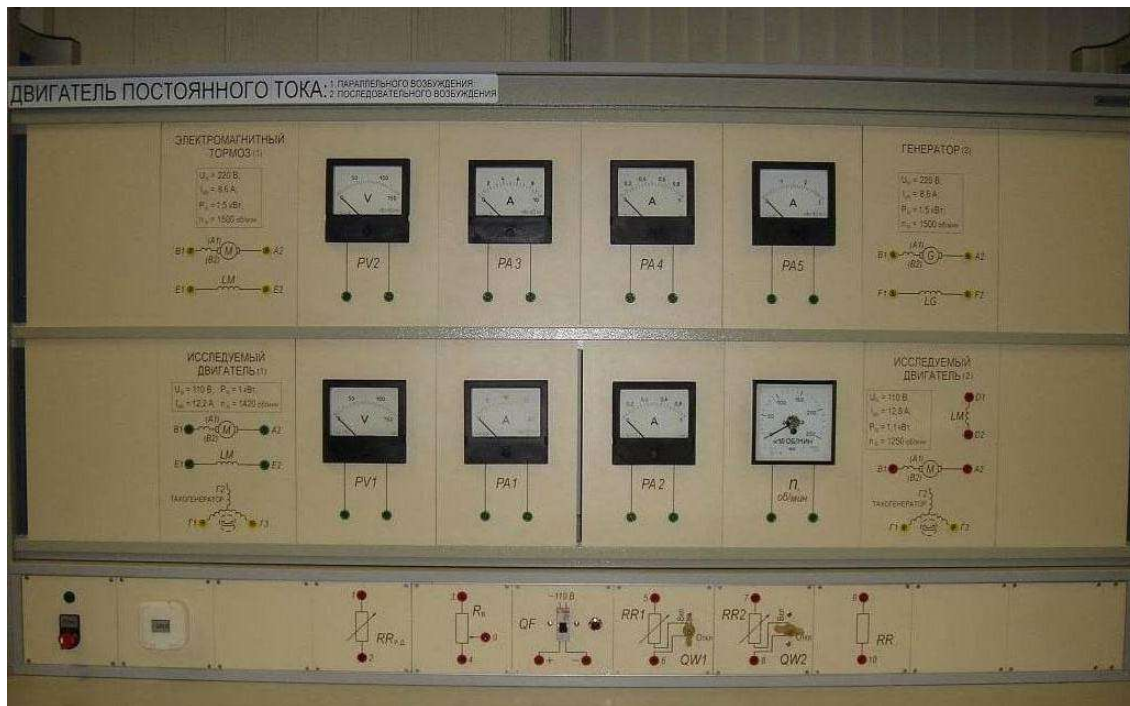


Рис. 7.13. Передняя (приборная) панель стенда “Двигатель постоянного тока”



Рис. 7.14. Общий вид стенда “Двигатель постоянного тока” с исследуемыми агрегатами:  
слева расположен агрегат с ДПТ параллельного возбуждения (Работа № 2);  
справа – агрегат с ДПТ последовательного возбуждения (Работа № 3)

## 4.1. Пуск и реверс исследуемого двигателя $M1$

1. Установить реостат  $RR_{нг}$  в положение “Отключено”, а реостат  $RR_{р.д}$  в положение “Пуск” (*введен*) (двигатель  $M1$  запускается на холостой ход);
2. Установить реостат  $RR_{в}$  в цепи возбуждения в положение “*выведен*”;
3. Включить автомат  $QF$  (на схему подано напряжение от сети  $-110$  В; на обмотке якоря двигателя  $M1$  напряжение будет меньше ( $PVI$ ), т. к. часть поданного напряжения падает на сопротивлении  $RR_{р.д}$ );
4. В процессе разгона двигателя *плавно* и *медленно* перевести реостат  $RR_{р.д}$  в положение “Работа” (*выведен*); при этом на обмотке якоря двигателя  $M1$  напряжение поднимется до номинального значения  $U_{ном} = 110$  В;
5. Реостатом  $RR_{в}$  установить частоту вращения  $n_{д} = n_{д,ном} = 1420$  об/мин (см. показание тахогенератора) и *отметить направление вращения якоря*;

**Внимание.** *Перед отключением* двигателя от сети (после выполнения каждого из разделов 4.2, 4.3, 4.4 и 4.5) необходимо реостат  $RR_{р.д}$  *устанавливать* в положение “Пуск” (*введен*).

6. Для осуществления реверса двигателя  $M1$ :

- отключить двигатель от сети;
- поменять местами проводники, подключённые к зажимам  $E1$  и  $E2$ , обмотки возбуждения  $LM1$ ;
- осуществить пуск двигателя в соответствии с пунктами **1 – 5**.

**Внимание.** При дальнейших испытаниях двигателя  $M1$  направление вращения его должно соответствовать указанному стрелкой на подшипниковом щите.

Оставить двигатель  $M1$  включенным в сеть и не отключать после выполнения опытов в соответствии с разделами 4.2, 4.3 и 4.4.

## 4.2. Рабочие характеристики двигателя

$$P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2) \text{ при } U = U_{ном} \text{ и } I_B = I_{B,ном}$$

Номинальный момент двигателя  $M1$  по определению по формуле

$$M_{ном} = P_{2,ном} / \Omega_{ном} = 1000 / 148,7 = 6,725 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (7.16)$$

где  $P_{2,ном} = 1000$  Вт - номинальная мощность двигателя (полезная механическая на валу);  $\Omega_{ном}$  - номинальная угловая скорость вращения якоря двигателя, которая связана с номинальной частотой вращения якоря  $n_{ном} = 1420$  об/мин соотношением

$$\Omega_{\text{НОМ}} = n_{\text{НОМ}} 2\pi / 60 = 1420 \cdot 2\pi / 60 = 148,7 \text{ рад/с.} \quad (7.17)$$

Величина тока  $I_{a.T}$  тормозного устройства  $M2$  соответствующего номинальному моменту /см. выражением (7.15)/

$$I_{a.T} = M_{\text{НОМ}} / 1,285 = 6,725 / 1,285 = 5,23 \text{ А.}$$

Снятие рабочих характеристик  $P_1$ ,  $M$ ,  $I_a$ ,  $n$ ,  $\eta = f(P_2)$  при  $U = U_{\text{НОМ}}$  и  $I_B = I_{B.\text{НОМ}}$  осуществить следующим образом.

**1.** Реостатом  $RR_{\text{НГ}}$  в цепи обмотки якоря тормозного двигателя  $M2$  установить номинальный момент на валу исследуемого двигателя  $M1$ : на амперметре  $PA3$  показание 5,23 А (ток  $I_{a.T}$ );

**2.** Реостатом  $RR_B$  в цепи возбуждения двигателя  $M1$  установить номинальную частоту вращения якоря  $n_{\text{НОМ}} = 1420$  об/мин. Соответствующий этому режиму ток возбуждения  $I_{B.\text{НОМ}}$  ( $PA2$ ) является номинальным.

Номинальный ток возбуждения  $I_{B.\text{НОМ}}$  в паспорте двигателя не указывается, а определяется опытным путём. *Номинальным током возбуждения* называется такой ток, который при номинальной нагрузке на валу двигателя и номинальном напряжении сети обеспечивает номинальную частоту вращения.

**3.** Постепенно уменьшать реостатом  $RR_{\text{НГ}}$  величину тормозного момента до нуля (см. показания амперметра  $PA3$ ) и фиксировать значения следующих величин: токов  $I_a$  ( $PA1$ ) и  $I_B$  ( $PA2$ ) в обмотках якоря и возбуждения двигателя  $M1$ ; частоты вращения якоря (см. показание тахогенератора); тока  $I_{a.T}$  в обмотке якоря тормозного устройства  $M2$ . Данные измерений (5, 6 точек) записать в табл. 7.1.

Реостатом  $RR_{p.d}$  в процессе опыта поддерживать неизменным номинальное напряжение на зажимах обмотки якоря  $U_{\text{НОМ}} = 110$  В ( $PVI$ ). Реостатом  $RR_B$  поддерживать номинальное значение тока возбуждения  $I_{B.\text{НОМ}}$  ( $PA2$ ).

Таблица 7.1. Измерение и расчёт рабочих характеристик

Измерение				Расчёт				
$I_a$	$I_B = I_{B.НОМ}$	$n$	$I_{a.Т}$	$\Omega$	$M$	$P_1$	$P_2$	$\eta$
А	А	об/мин	А	рад/с	Н·м	Вт	Вт	%

Угловую скорость  $\Omega$  вращения якоря определить по соотношению  $\Omega = n \cdot 2\pi/60$ . Момент  $M$  рассчитать по формуле (7.15). Значения подводимой к двигателю электрической мощности  $P_1$ , мощности на валу  $P_2$  и КПД  $\eta$  рассчитать по формулам:

$$P_1 = U_{НОМ} (I_a + I_B); \quad P_2 = M \cdot \Omega; \quad \eta = 100 \cdot P_2 / P_1.$$

Метод определения КПД по отношению полезной механической мощности на валу  $P_2$  к подводимой электрической мощности  $P_1$  называется *методом непосредственного определения*. На практике имеет широкое распространение определение КПД *по методу отдельных потерь* (см. далее разд. 4.6).

По полученным данным построить рабочие характеристики двигателя  $P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2)$  при  $I_B = I_{B.НОМ}$  и  $U = U_{НОМ}$ .

### 4.3. Скоростная (электромеханическая) характеристика

Снятие скоростных характеристик  $n = f(I_a)$  при  $U = U_{НОМ}$  и  $I_B = I_{B.НОМ}$ ,  $I_B = 0,5I_{B.НОМ}$  осуществить следующим образом.

1. Данные, соответствующие зависимости  $n = f(I_a)$  при  $U = U_{НОМ}$  и  $I_B = I_{B.НОМ}$ , перенести из табл. 7.1 в табл. 7.2.

2. Для получения скоростной характеристики при  $I_B = 0,5I_{B.НОМ}$  реостатом  $RR_B$  в цепи возбуждения двигателя  $M1$  установить соответствующее значения тока  $I_B$  ( $PA2$ ).

3. Постепенно уменьшать реостатом  $RR_{HT}$  величину тормозного момента до нуля (см. показания амперметра  $PA3$ ) и фиксировать значения тока  $I_a$  ( $PA1$ )



в обмотке якоря двигателя  $M1$  и частоты вращения якоря (см. показание тахогенератора). В процессе опыта величина тока якоря не должна превысить значения  $I_{a.ном} = 12,2 \text{ А}$  ( $PA1$ ). Данные измерений (5, 6 точек) записать в табл. 7.2.

Реостатом  $RR_{p.д}$  в процессе опыта поддерживать неизменным номинальное напряжение на зажимах обмотки якоря  $U_{ном} = 110 \text{ В}$  ( $PVI$ ). Реостатом  $RR_B$  поддерживать неизменным значение тока возбуждения  $I_B = 0,5I_{B.ном}$  ( $PA2$ ).

**Таблица 7.2. Измерение скоростных характеристик**

		$I_B = I_{B.ном}$					$I_B = 0,5I_{B.ном}$				
$I_a$	А										
$n$	Об/ мин										

По полученным данным построить скоростные характеристики двигателя  $n = f(I_a)$  при  $U = U_{ном}$  и  $I_B = I_{B.ном}$ ,  $I_B = 0,5I_{B.ном}$ .

#### 4.4. Регулировочная характеристика (частота вращения $n = \text{const}$ )

Снятие регулировочной характеристики  $I_B = f(M)$  при  $U = U_{ном}$  и  $n = \text{const}$  осуществить следующим образом.

1. Установить реостат  $RR_{нт}$  в положение “Отключено” (показание амперметра  $PA3$  равно нулю,  $I_{a.т} = 0$ ): двигатель  $M1$  в режиме холостого хода.

2. Реостатом  $RR_B$ , регулируя ток  $I_B$  ( $PA2$ ), установить заданную преподавателем частоту вращения  $n = \text{const}$  (см. показание тахометра). Занести в первую строку табл. 7.3 значение  $n = \text{const}$  и показания приборов ( $PA2$ ,  $PA1$  и  $PA3$ ), перечисленных в п. 3.

3. Реостатом  $RR_{нт}$  увеличивать тормозной момент двигателя  $M2$  ( $PA3$ ) и одновременно регулировать (уменьшать) ток возбуждения  $I_B$  ( $PA2$ ) так, чтобы установленная в п. 2, частота вращения оставалась постоянной,  $n = \text{const}$  (см. показание тахометра). В процессе опыта фиксировать величины: частоты вращения якоря  $n$ ; токов  $I_B$  ( $PA2$ ) и  $I_a$  ( $PA1$ ) в обмотках возбуждения и якоря двигателя  $M1$ ; тока  $I_{a.т}$  ( $PA3$ ) в обмотке якоря тормозного устройства  $M2$ . В процессе опыта величина тока якоря не должна превысить значения  $I_{a.ном} = 12,2 \text{ А}$  ( $PA1$ ). Данные измерений (5, 6 точек) занести в табл. 7.3.

**Таблица 7.3. Измерение и расчёт регулировочной характеристики**  
(частота вращения  $n = \text{const}$ )

Измерение			Расчёт		
$n = \text{const}$	$I_B$	$I_a$	$I_{a.T}$	$M$	$\Delta I_B$
об/мин	А	А	А	Н·м	А

По полученным данным построить регулировочную характеристику двигателя  $n = f(I_a)$  при  $U = U_{\text{НОМ}}$  и  $I_B = I_{B.\text{НОМ}}$ .

В табл. 7.3  $\Delta I_B = I_{B.X} - I_B$ , где  $I_{B.X}$  – ток возбуждения при отсутствии нагрузки на валу исследуемого двигателя, то есть при  $I_{a.T} = 0$ . Значение момента  $M$  рассчитать пользуясь выражением (7.15).

#### **4.5. Регулировочная характеристика** (момент $M = \text{const}$ )

Снятие регулировочной характеристики  $n = f(U)$  при  $I_B = I_{B.\text{НОМ}}$  и  $M_c = \text{const}$  осуществить следующим образом.

**1.** Реостатом  $RR_{\text{HT}}$  установить на валу двигателя  $M1$  величину тормозного момента  $0,75 \cdot M_{\text{НОМ}}$  ( $I_{a.T} = 0,75 \cdot M_{\text{НОМ}} / 1,285 = 0,75 \cdot 6,725 / 1,285 \approx 3,9$  А; амперметр  $PA3$ ).

**2.** Постепенно снижать реостатом  $RR_{\text{P,д}}$  напряжение на якоре двигателя  $M1$  ступенями по 10 В ( $PVI$ ), одновременно реостатом  $RR_{\text{HT}}$  сохранять постоянство тормозного момента ( $I_{a.T} \approx 3,9$  А = const). В процессе опыта фиксировать величины: напряжения  $U$  ( $PVI$ ); частоты вращения якоря  $n$  (см. показание тахогенератора); токов  $I_B$  ( $PA2$ ) и  $I_a$  ( $PA1$ ) в обмотках возбуждения и якоря двигателя  $M1$ ; тока  $I_{a.T}$  ( $PA3$ ) в обмотке якоря тормозного устройства  $M2$ . Опыт проводить до тех пор, пока удаётся поддерживать постоянным тормозной момент, то есть выдержать равенство  $I_{a.T} \approx 3,9$  А. Данные опыта заносят в табл. 7.4.

**Таблица 7.4. Измерение и расчёт регулировочной характеристики**  
(момент  $M = \text{const}$ )

Измерение					Расчёт	
$U$	$n$	$I_B = \text{const}$	$I_a$	$I_{a.T} = \text{const}$	$M$	$P_2$
В	об/мин	А	А	А	Н·м	Вт

По полученным данным построить регулировочную характеристику двигателя  $n = f(U)$  при  $I_B = I_{B,\text{ном}}$  и  $M_c = \text{const}$ .

Установить реостат  $RR_{p,d}$  в положение “Пуск” (*введен*) и автоматом  $QF$  отключить двигатели  $M1$  и  $M2$  от сети.

#### **4.6. Определение КПД двигателя по методу отдельных потерь**

Метод отдельных потерь широко используется на практике.

Необходимо определить значение КПД двигателя по методу отдельных потерь для *одного* значения тока якоря  $I_a$  примерно равного номинальному значению,  $I_{a,\text{ном}} = 12,2$  А. Это значение тока якоря  $I_a$  взять из табл. 7.1. Рассчитанное по методу отдельных потерь значение КПД следует сравнить со значением КПД, найденным методом непосредственного определения при снятии рабочих характеристик (см. табл. 7.1).

Определить согласно методу отдельных потерь: потери на возбуждение; потери магнитные и механические; электрические потери в обмотках, обтекаемых током якоря; электрические потери в щётках и добавочные потери (формулы приведены ниже).

Коэффициент полезного действия по методу отдельных потерь рассчитать по формуле:

$$\eta = 100(1 - \Sigma p/P_1), \quad (7.18)$$

где  $\Sigma p$  – сумма отдельных потерь мощности, преобразующихся в тепло.

$$\text{Сумма этих потерь } \Sigma p = p_{\text{в}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{эл.об}} + p_{\text{эл.щ}} + p_{\text{д}}, \quad (7.19)$$

где  $p_{\text{в}}$  – электрические потери в обмотке возбуждения;  $p_{\text{мг}}$  – магнитные потери в сердечнике якоря;  $p_{\text{мх}}$  – механические потери на трение;  $p_{\text{эл.об}}$  – электрические потери в обмотке якоря, обмотке добавочных полюсов и др.;  $p_{\text{эл.щ}}$  – электрические потери в щётках;  $p_{\text{д}}$  – добавочные потери.

$$\text{Величина мощности } P_1, \text{ подводимой к двигателю, } P_1 = U_{\text{ном}} \cdot (I_a + I_{\text{в}}).$$

$$\text{Электрические потери в обмотке возбуждения } p_{\text{в}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{в}}.$$

Магнитные и механические потери:

$$p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}} = U_{\text{ном}} I_{a,x} - I_{a,x}^2 R_{a(75)},$$

где  $I_{a,x}$  – ток в обмотке якоря двигателя при холостом ходе (значение тока берется из табл. 7.1 при  $I_{a,T} = 0$  А);  $R_{a(75)}$  – сопротивление цепи обмотки якоря при температуре  $75^\circ\text{C}$  (без учета сопротивления щеточного контакта),  $R_{a(75)} \approx 1,2R_a^*$ .

$$\text{Электрические потери в обмотках якорной цепи } p_{\text{эл.об}} = I_a^2 R_{a(75)}.$$

$$\text{Электрические потери в щётках } p_{\text{эл.щ}} \approx 2\Delta U_{\text{щ}} I_a = 2(0,3 \dots 1) I_a.$$

$$\text{Добавочные потери } p_{\text{д}} \approx 0,01 U_{\text{ном}} I_a.$$

КПД определить по формуле (7.18), результаты расчёта поместить в табл. 7.5.

**Таблица 7.5. Расчёт коэффициента полезного действия**

Метод определения КПД	$I_a$	$P_1$	$P_2$	$p_{\text{в}}$	$p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}}$	$p_{\text{эл.об}}$	$p_{\text{эл.щ}}$	$p_{\text{д}}$	$\Sigma p$	$\eta$
	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	%
Метод непосредственного определения (данные табл. 7.1)				–	–	–	–	–	–	
Метод отдельных потерь			–							

\* сопротивление обмотки якоря  $R_a = 1,1$  Ом;

сопротивление *параллельной* обмотки возбуждения  $R_{\text{в,ш}} = 210$  Ом

## 5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 135).
4. Номинальные данные исследованного ДПТ (разд. 5.2, с. 73 и 74).
5. Номинальные данные ДПТ, использованного в режиме тормоза (там же).
6. Схемы испытаний, рис. 7.12.
7. Результаты опытов и расчётов, представленные в таблицах 7.1 – 7.5.
8. Экспериментальные графические зависимости:
  - 8.1. Рабочие характеристики двигателя;
  - 8.2. Две скоростные характеристики двигателя  $n = f(I_a)$ , представленные на одном графике в осях координат  $n$  и  $I_a$ ;
  - 8.3. Регулировочная характеристика двигателя  $I_B = f(M)$  ( $n = \text{const}$ ) в осях координат  $I_B$  и  $M$ .
  - 8.4. Регулировочная характеристика двигателя  $n = f(U)$  ( $M = \text{const}$ ) в осях координат  $n$  и  $U$ .

Привести на отдельной странице:

- табл. 7.1, формулы, расчёт соответствующих величин и график рабочих характеристик;
- табл. 7.2 и график двух скоростных характеристики двигателя  $n = f(I_a)$ ;
- табл. 7.3, формулы, расчёт соответствующих величин и график регулировочной характеристики  $I_B = f(M)$ ;
- табл. 7.4, формулы, расчёт соответствующих величин и график регулировочной характеристики  $n = f(U)$ ;
- табл. 7.5, формулы и расчёт КПД по методу отдельных потерь.

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 Машины постоянного тока подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

## 6. Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит магнитная система двигателя?
2. В каком соотношении находятся токи якоря и возбуждения двигателя?
3. Как пустить в ход двигатель параллельного возбуждения?
4. Почему не изменится направление вращения, если изменить полярность питающего напряжения?
5. Почему при увеличении нагрузки на валу увеличивается потребляемый якорем двигателя ток и уменьшается частота вращения?
6. Почему меняется наклон скоростных (электромеханических) характеристик при изменении тока возбуждения?
7. Какие Вы знаете способы регулирования частоты вращения двигателя?
8. Как будут меняться ток якоря и частота вращения двигателя, если менять величину сопротивления в цепи возбуждения при постоянстве тормозного момента?
9. Как будут изменяться ток якоря и частота вращения двигателя, если менять величину сопротивления в цепи якоря при постоянстве тормозного момента?
10. Как будут изменяться ток якоря и частота вращения при постоянстве тормозного момента, если изменить положение щеток?
11. Назовите потери мощности в двигателе. Какие потери зависят от нагрузки на валу, какие не зависят?
12. Где используются двигатели постоянного тока параллельного возбуждения?

### П7.1. Управляемые двигатели постоянного тока

**Общие положения.** Управляемыми двигателями (термин 99, с. 29) называются двигатели, которые применяются в системах автоматического управления и регулирования различных автоматизированных установок и предназначены для преобразования электрического сигнала (напряжение управления), получаемого от какого-либо измерительного органа, в механическое перемещение (вращение) вала с целью воздействия на соответствующий регулирующий или управляющий аппарат. Если напряжение и мощность сигнала малы для управления двигателем, то применяются промежуточные усилители мощности (магнитные, электронные, полупроводниковые).

Номинальная мощность управляемых двигателей обычно составляет от долей ватта до нескольких киловатт. К этим двигателям предъявляются большие требования по точности работы и быстродействию. Для сокращения продолжительности переходных процессов управляемые двигатели стремятся выполнить малоинерционными, малогабаритными. Обычно требуется, чтобы зависимости момента  $M$  и скорости вращения  $n$  от напряжения сигнала (управления)  $U_y$  были по возможности *линейными*.

Существует ряд разновидностей управляемых двигателей постоянного и переменного тока. Ниже кратко рассматриваются управляемые двигатели постоянного тока. Управляемые асинхронные двигатели рассмотрены в [4, с. 250, сл.]

Конструктивно управляемый двигатель постоянного тока – это по существу обычная коллекторная машина, у которой обмотка якоря и обмотка полюсов питаются от двух *независимых* источников энергии (схемы электромагнитного возбуждения). Возбуждение управляемого двигателя возможно также от постоянных магнитов. *По конструкции управляемые двигатели постоянного тока отличаются от двигателей постоянного тока общего применения тем, что имеют шихтованными не только якорь, но и станину и полюса из тех соображений, что практически работа проходит в переходных режимах.* Магнитная цепь не насыщена, поэтому реакция якоря практически не влияет на рабочие характеристики. Якорь по конструкции бывает трёх видов: нормальный барабанный, полый немагнитный и дисковый [1,13].

Управляемые двигатели постоянного тока отличаются схемами управления. При электромагнитном возбуждении одна из обмоток *постоянно* находится под напряжением и называется обмоткой возбуждения независимо от того, находится ли она на якоре или полюсах. На другую обмотку *подается электрический сигнал лишь тогда, когда должен вращаться вал*; она называется обмоткой управления.

Если в качестве обмотки управления используется обмотка якоря, получается *двигатель с якорным управлением* (рис. П7.1,а). При якорном управлении ток возбуждения  $I_B = \text{const}$ , а на якорь подается напряжение управления  $U_y$ . Если обмоткой управления служит обмотка возбуждения, то это *двигатель с полюсным управлением* (рис. П7.1,б). При полюсном управлении на якорь подается напряжение  $U_B = \text{const}$ , а напряжение управления  $U_y$  подается на обмотку возбуждения. При постоянных магнитах возможна лишь схема якорного управления (рис. П7.1,в). В управляемых двигателях постоянного тока *преимущественно распространено управление со стороны якоря*. Двигатели с полюсным управлением рациональны при малой мощности управления.

Свойства управляемого двигателя оцениваются его механическими и регулировочными характеристиками и полной механической мощностью.

*Механические* характеристики представляют собой зависимость момента от скорости вращения при разных постоянных значениях электрического сигнала управления:  $M = f(n)$  при  $U_y = \text{const}$ .

*Регулировочные* характеристики представляют собой зависимость скорости вращения от электрического сигнала управления при разных постоянных значениях момента:  $n = f(U_y)$  при  $M = \text{const}$ .

**Двигатели с якорным управлением.** Обмотка возбуждения включается на *неизменное номинальное* для данного двигателя напряжение  $U_B$  (рис. П7.1,а). Магнитный поток  $\Phi$  без учета размагничивающего действия реакции якоря *постоянен*.

Уравнение механических характеристик выводится на основе уравнения равновесия напряжения (4.33), с. 72, подведенного к обмотке якоря, а также формул для ЭДС (4.11), с. 59 и электромагнитного момента (4.27), с. 69

$$U_y = E_a + I_a R_a; \quad (4.33)$$

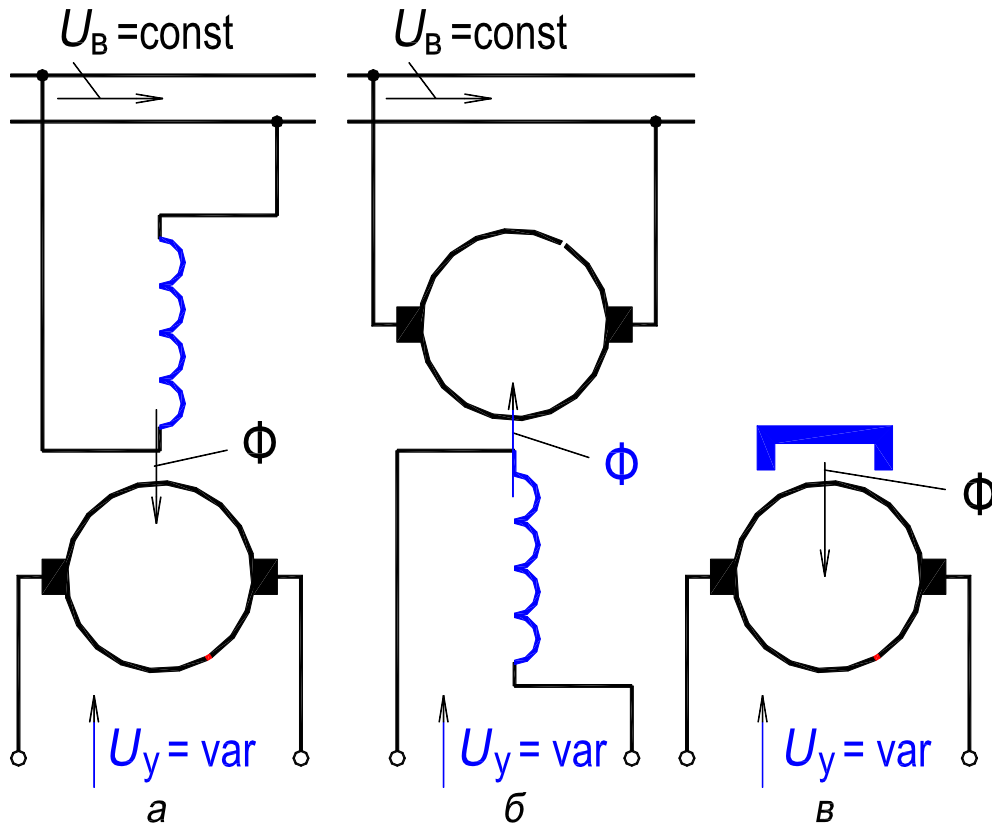


$$E_a = c_e n \Phi; \quad (4.11)$$

$$M = c_M I_a \Phi. \quad (4.27)$$

Подставив формулу для ЭДС (4.11) в уравнение (4.33), запишем выражение (4.34) для тока якоря

$$I_a = (U_y - c_e n \Phi) / R_a. \quad (4.34)$$



**Рис. П7.1. Схемы включения управляемого двигателя:**

*а* – с якорным управлением;

*б* – с полюсным управлением; *в* – с возбуждением от постоянных магнитов

Уравнение механических характеристик получим, подставив выражение (4.34) в формулу (4.27) для электромагнитного момента. После несложных преобразований имеем

$$M = c_M \Phi U_y / R_a - c_M c_e \Phi^2 n / R_a = A_a U_y - B_a n = f(n, U_y), \quad (\text{П7.1})$$

где  $A_a = c_M \Phi / R_a$  и  $B_a = c_M c_e \Phi^2 / R_a$  – величины, значения которых принимаются неизменными;  $U_y$  – параметр.

Уравнение регулировочных характеристик получим, преобразовав уравнение (П7.1):

$$n = A_a U_y / B_a - M / B_a = C_a U_y - D_a M = f(U_y, M), \quad (\text{П7.2})$$

где  $C_a = A_a / B_a$  и  $D_a = 1 / B_a$  – величины, значения которых принимаются неизменными;  $M$  – параметр.

При выводе уравнений (П7.1) и (П7.2) не учитывалось влияние насыщения и размагничивающего действия реакции якоря.

Как видно из уравнения (П7.1), электромагнитный момент  $M$  при данном сигнале управления  $U_y$  будет наибольшим при пуске. Электромагнитный момент управляемого двигателя с управлением со стороны якоря линейно зависит как от сигнала управления  $U_y$ , так и от скорости вращения  $n$ . При изменении напряжения управления  $U_y$  механические характеристики смещаются параллельно, их жесткость постоянна. Линейность и одинаковый наклон механических характеристик двигателя с якорным управлением (рис. П7.2,а) положительно характеризует его как отдельное звено системы автоматического регулирования.

Как следует из уравнения (П7.2) регулировочные характеристики также линейны (рис. П7.2,б). У двигателей в режиме холостого хода якорь начинает вращаться лишь при определенном значении напряжения управления  $U_y$  (напряжение трогания), отличном от нуля (пунктирная кривая, рис. П7.2,б). Значение напряжения трогания зависит от момента трения в двигателе и определяет зону нечувствительности.

Линейность механических и регулировочных характеристик – ценное свойство, которым не обладает управляемый асинхронный двигатель переменного тока.

Мощность управления двигателями с якорным управлением равна почти полной мощности, потребляемой двигателем, и это приводит к необходимости увеличивать мощность устройства, подающего сигнал на обмотку якоря.

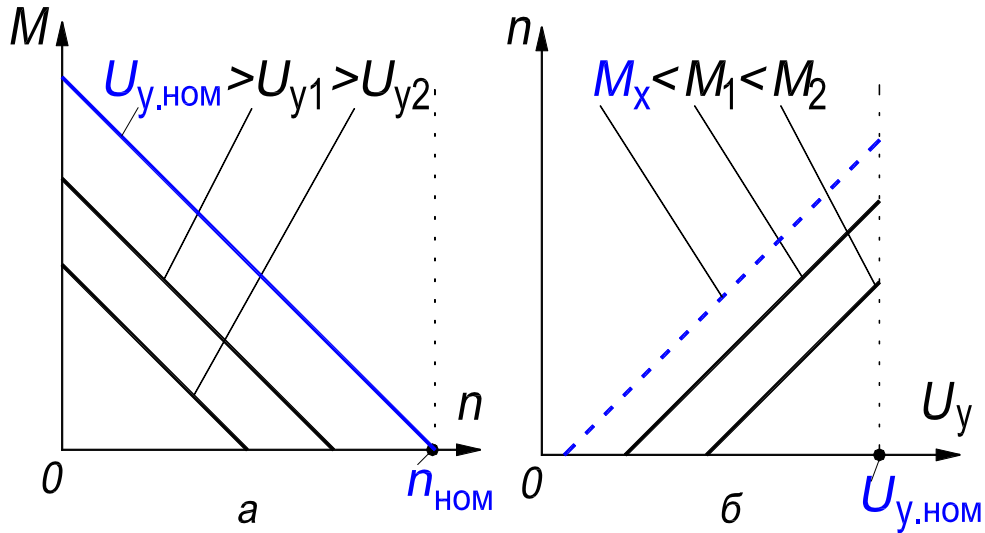


Рис. П7.2. Характеристики двигателя с якорным управлением:  
*a* – механические; *б* – регулировочные

К управляемым двигателям постоянного тока с якорным управлением относятся и двигатели с постоянными магнитами (рис. П7.1*в*). Применение двигателей с постоянными магнитами позволяет обойтись без источника энергии для возбуждения, их КПД выше, чем двигателей с электромагнитным возбуждением и нагревание обмоток меньше.

**Двигатели с полюсным управлением.** На обмотку якоря постоянно подается номинальное напряжение ( $U_B = \text{const}$ ) от независимого источника питания (рис. П7.1,*б*). На обмотку управления (теперь это обмотка главных полюсов) напряжение управления  $U_y$  подается лишь тогда, когда потребуется вращение управляемого двигателя.

Уравнение механических характеристик выводится на основе уравнения равновесия напряжения (4.33), с. 72, подведенного к обмотке якоря, а также формул для ЭДС (4.11), с. 59 и электромагнитного момента (4.27), с. 69

$$U_B = E_a + I_a R_a; \quad (4.33)$$

$$E_a = c_e n \Phi = c_e c_{\Pi} n U_y; \quad (4.11)$$

$$M = c_M I_a \Phi = c_M c_{\Pi} I_a U_y. \quad (4.27)$$

Как и при выводе уравнений (П7.1) и (П7.2) не учитывалось влияние насыщения и размагничивающего действия реакции якоря. При записи правых частей формул (4.11) и (4.27) принято, что магнитный поток главных полюсов

пропорционален напряжению управления,  $\Phi = c_{\Pi} U_y$ . Последовательность вывода уравнений для механической и регулировочной характеристик двигателя с полюсным управлением такая же, как и для двигателя с якорным управлением.

Выражение для тока  $I_a = (U_B - c_e c_{\Pi} n U_y) / R_a$  подставляем в формулу для момента и после несложных преобразований, запишем уравнение механических характеристик двигателя с полюсным управлением

$$M = c_m c_{\Pi} U_B U_y / R_a - c_m c_e c_{\Pi}^2 n U_y^2 / R_a = A_{\Pi} U_y - B_{\Pi} U_y^2 n = f(n, U_y), \quad (\text{П7.3})$$

где  $A_{\Pi} = c_m c_{\Pi} U_B / R_a$  и  $B_{\Pi} = c_m c_e c_{\Pi}^2 / R_a$  – величины, значения которых принимаются неизменными;  $U_y$  – параметр.

Уравнение регулировочных характеристик получим, преобразовав уравнение (П7.3):

$$n = A_{\Pi} / B_{\Pi} U_y - M / B_{\Pi} U_y^2 = C_{\Pi} / U_y - D_{\Pi} M / U_y^2 = f(U_y, M), \quad (\text{П7.4})$$

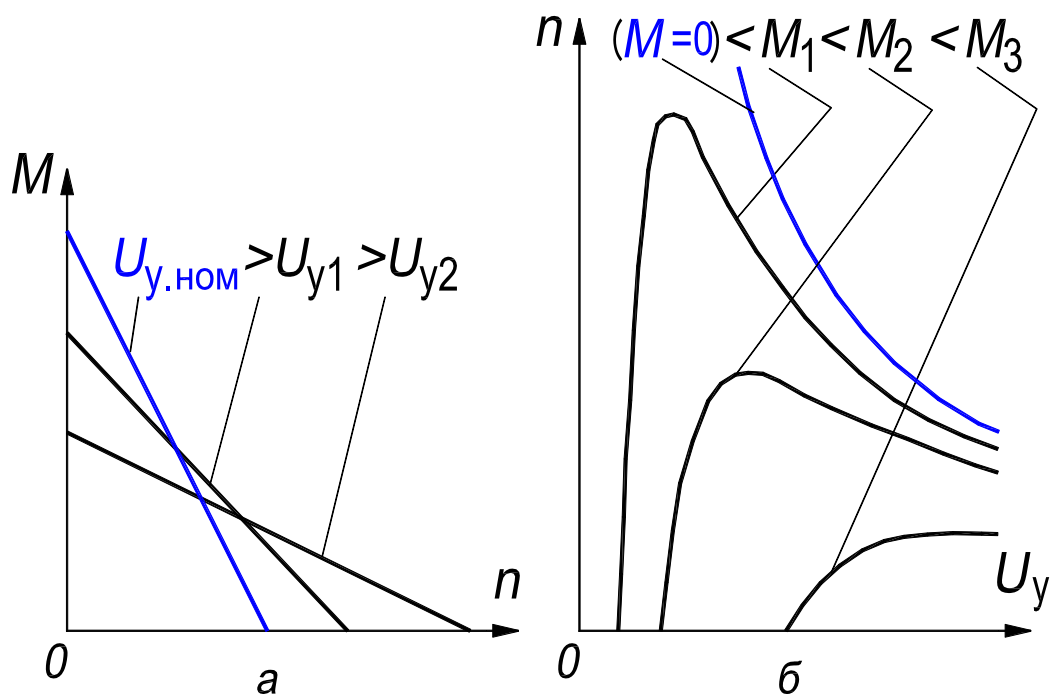
где  $C_{\Pi} = A_{\Pi} / B_{\Pi}$  и  $D_{\Pi} = 1 / B_{\Pi}$  – величины, значения которых принимаются неизменными;  $M$  – параметр.

Из уравнения (П7.3) следует, что механические характеристики при постоянном значении напряжения управления  $U_y$  прямолинейны, но наклон их (жесткость) меняется при изменении значения напряжения управления (рис. П7.3,а).

Как следует из уравнения (П7.4), регулировочные характеристики двигателя с полюсным управлением нелинейны (рис. П7.3,б). При малом моменте нагрузки они двузначны, то есть при двух различных значениях напряжения управления  $U_y$  может быть получена одна и та же скорость. По характеру задач, стоящих перед управляемым двигателем, этого обычно не должно быть.

Скорость холостого хода при полюсном управлении обратно пропорциональна напряжению управления  $U_y$  (при якорном управлении она прямо пропорциональна  $U_y$ ). Следовательно, при напряжении управления  $U_y$ , приближающемся к нулю, двигателю с полюсным управлением свойственна тенденция к разносу (см. на рис. П7.3,б зависимость, соответствующую  $M = 0$ ). Наилучшей гарантией от разноса является момент сопротивления на валу управляемого двигателя. Практически повышение числа оборотов

при холостом ходе ограничивается присущими двигателю механическими и вентиляционными потерями.



**Рис. П7.3. Характеристики двигателя с полюсным управлением:**  
 $a$  – механические;  $б$  – регулировочные

Управляемые двигатели постоянного тока в подавляющем большинстве имеют якорное управление, полюсное управление применяется ограниченно, лишь для двигателей малой мощности. Коэффициент полезного действия управляемых двигателей постоянного тока сравнительно высок: порядка 30 % при мощности 5–10 Вт и порядка 65 % в двигателях мощностью 200–300 Вт.

## 8. РАБОТА № 3

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

### Оглавление

1. Цель работы .....	183
2. Программа работы .....	183
3. Основы теории .....	184
4. Экспериментальное исследование .....	184
4.1. Пуск и реверс двигателя .....	185
4.2. Рабочие характеристики.....	185
4.3. Регулировочные характеристики .....	187
4.3.1. Регулировочная характеристика $U = f(M)$ при $n = \text{const}$ .....	187
4.3.2. Регулировочные характеристики $I_a, n = f(U)$ при $M_c = \text{const}$ .....	187
4.4. Скоростная характеристика $n = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ .....	188
5. Содержание отчета и оформление отчета .....	189
6. Контрольные вопросы .....	190
<b>Приложение 8</b>	
<b>П8.1.</b> Зависимость момента двигателя от тока якоря, $M = f(I_a)$ .....	<b>191</b>
<b>Перечень рисунков в 8-м разделе .....</b>	<b>182</b>
<b>Перечень таблиц в 8-м разделе .....</b>	<b>182</b>

### Перечень рисунков в 8-м разделе

Рис. 8.1. Схема лабораторной установки для исследования ДПТ последовательного возбуждения .....	184
Рис. б.н. П8.1. Зависимость момента двигателя от тока якоря, $M = f(I_a)$ .....	191

### Перечень таблиц в 8-м разделе

Табл. 8.1. Измерение и расчёт рабочих характеристик .....	186
Табл. 8.2. Измерение регулировочной характеристики (частота вращения $n = \text{const}$ ) .....	187
Табл. 8.3. Измерение регулировочных характеристик (момент $M = \text{const}$ ) .....	188
Табл. 8.4. Измерение скоростной характеристики .....	188

## 1. Цель работы

Познакомиться с устройством и уяснить принцип действия двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением\*. Осуществить пуск в ход и реверсирование двигателя. Овладеть методикой снятия характеристик двигателя.

## 2. Программа работы

2.1. Познакомиться с устройством двигателя постоянного тока (ДПТ).

2.2. Собрать на лабораторном стенде схему двигателя, осуществить пуск двигателя, изменить направление вращения.

2.3. Определить опытным путём и построить *рабочие* характеристики двигателя

$$P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2) \text{ при } U = U_{\text{ном}}.$$

2.4. Определить опытным путём и построить *регулировочную* характеристику двигателя при постоянной частоте вращения

$$U = f(M) \text{ при } n = \text{const}.$$

2.5. Определить опытным путём и построить *регулировочные* характеристики двигателя при постоянном моменте на валу:

а)  $I_a = f(U)$  при  $M_c = \text{const}$ ,

б)  $n = f(U)$  при  $M_c = \text{const}$ .

2.6. Определить опытным путём и построить *скоростную* характеристику двигателя

$$n = f(I_a) \text{ при } U = U_{\text{ном}} = \text{const}.$$

---

\* сопротивление обмотки якоря  $R_a = 1,0$  Ом;  
сопротивление последовательной обмотки возбуждения  $R_{в.с} = 0,35$  Ом



### 3. Основы теории

ДПТ последовательного возбуждения широко применяются для электрической тяги (трамвай, метро, троллейбусы, электровозы и тепловозы на железных дорогах) и в подъемно-транспортных установках.

Основы устройства и теории двигателя последовательного возбуждения изложены в разд. 4 (с. 37...66, 67...72) и в Работе №2, разд. 3 (с. 136,сл.). Характеристики и регулирование скорости двигателей последовательного и смешанного возбуждения рассмотрены в Работе №2, разд. 3.8 (с. 156,сл.) и 3.9 (с. 159,сл.).

### 4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на установке в состав которой входят: исследуемый двигатель постоянного тока  $M$  (ДПТ) последовательного возбуждения и генератор постоянного тока  $G$  (ГПТ) независимого возбуждения, создающий нагрузку на валу двигателя (рис. 8.1).

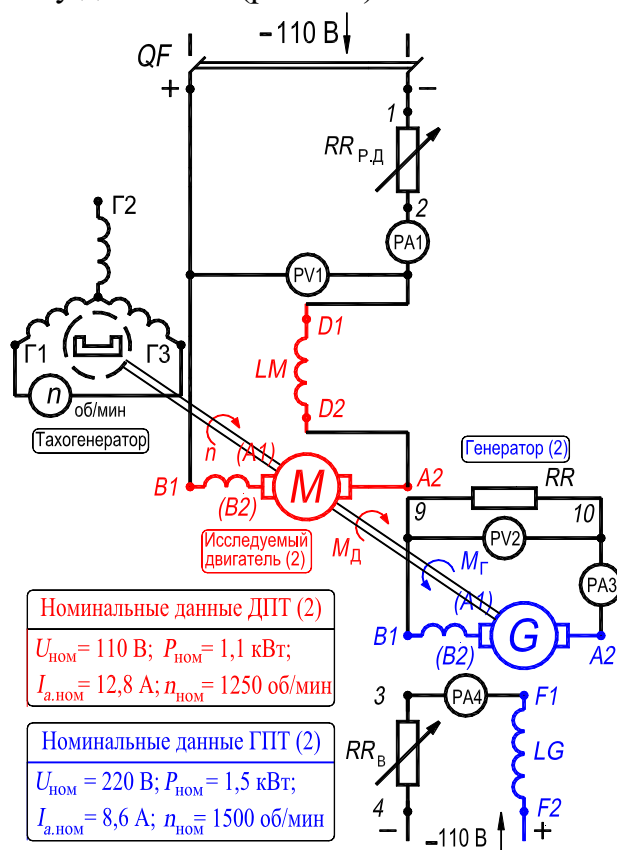


Рис. 8.1. Схема лабораторной установки для исследования ДПТ последовательного возбуждения

Величину электромагнитного момента генератора  $G$ , действующего навстречу моменту исследуемого двигателя  $M$ , регулировать реостатом в цепи обмотки возбуждения  $LG$  генератора (на рис. 8.1 он обозначен символом  $RR_B$ ).

На рис. 7.13 (с. 164) приведена фотография передней (приборной) панели стенда “Двигатель постоянного тока”. На рис. 7.14 (с. 164) – фотография стенда с исследуемым агрегатом, он расположен справа.

Значения номинальных данных двигателя  $M$  и генератора  $G$  – см. разд. 5.3, с. 74.

Собрать схему включения исследуемого двигателя  $M$  (последовательная обмотки возбуждения  $LM$  (рис. 8.1).

#### 4.1. Пуск и реверс двигателя

1. Установить реостат  $RR_{р.д}$  в положение “Пуск” (введен),
2. Перевести движок реостата  $RR_{в}$  в среднее положение;
2. Включить автомат  $QF$  (на схему подано напряжение 110 В);
4. В процессе разгона двигателя *плавно* и *медленно* перевести реостат  $RR_{р.д}$  в положение “Работа” (*выведен*); при этом на обмотке якоря двигателя  $M$  напряжение поднимется до номинального значения  $U_{ном} = 110$  В;
5. Реостатом  $RR_{в}$  установить частоту вращения  $n_{д} = n_{д.ном} = 1250$  об/мин (см. показание тахогенератора) и *отметить направление вращения якоря*;

**Внимание.** *Перед отключением* двигателя от сети необходимо реостат  $RR_{р.д}$  *установить* в положение “Пуск” (*введен*).

6. Для осуществления реверса двигателя  $M$ :
  - отключить двигатель от сети;
  - поменять местами проводники, подключённые к зажимам  $D1$  и  $D2$  обмотки возбуждения  $LM$ ;
  - осуществить пуск двигателя в соответствии с пунктами **1 – 5**.

**Внимание.** При дальнейших испытаниях двигателя  $M$  направление вращения его должно соответствовать указанному стрелкой на подшипниковом щите.

Оставить двигатель  $M$  включенным в сеть и не отключать после выполнения опытов в соответствии с разделами 4.2, 4.3.

#### 4.2. Рабочие характеристики двигателя

$$P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2) \text{ при } U = U_{ном}$$

Номинальный момент двигателя  $M$  по определить по формуле

$$M_{ном} = P_{2.ном} / \Omega_{ном} = 1100 / 130,9 = 8,4 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (8.1)$$

где  $P_{2.ном} = 1100$  Вт – номинальная мощность двигателя (полезная

механическая мощность на валу);  $\Omega_{\text{НОМ}}$  – номинальная угловая скорость вращения якоря двигателя, которая связана с номинальной частотой вращения якоря  $n_{\text{НОМ}} = 1250$  об/мин соотношением

$$\Omega_{\text{НОМ}} = n_{\text{НОМ}} \cdot 2\pi/60 = 1250 \cdot 2\pi/60 = 130,9 \text{ рад/с.} \quad (8.2)$$

Снятие рабочих характеристик  $P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2)$  при  $U = U_{\text{НОМ}}$  осуществить следующим образом.

1. Реостатом  $RR_B$  в цепи обмотки возбуждения генератора  $G$  установить номинальный момент на валу двигателя (при номинальном напряжении  $U_{\text{НОМ}} = 110$  В, подведенном к двигателю, в обмотке якоря протекает ток  $I_{a,\text{НОМ}} = 12,8$  А, а частота вращения якоря  $n_{\text{НОМ}} = 1250$  об/мин).

2. Реостатом  $RR_B$  постепенно уменьшать момент генератора  $G$  до тех пор, пока частота вращения не возрастет до  $n = 1,5n_{\text{НОМ}} = 1,5 \cdot 1250 = 1875$  об/мин. В процессе опыта фиксировать величины: тока якоря  $I_a = I_B$  (амперметр  $PAI$ ), частоты вращения  $n$  и момента  $M$ . Величину момента определить по значению тока якоря  $I_a$  двигателя в соответствии с зависимостью  $M = f(I_a)$ , приведенной в Прил. 8.1 (см. с. 191). Данные измерений (6, 7 точек) занести в табл. 8.1

Таблица 8.1. Измерение и расчёт рабочих характеристик

Измерение				Расчёт		
$U_{\text{НОМ}}$	$I_a = I_B$	$n$	$M$	$P_1$	$P_2$	$\eta$
В	А	об/мин	Н·м	Вт	Вт	%

Значения подводимой к двигателю электрической мощности  $P_1$ , полезной механической мощности на валу  $P_2$  и КПД  $\eta$  рассчитать по формулам:

$$P_1 = U_{\text{НОМ}} I_a; \quad P_2 = 2\pi \cdot M \cdot n / 60 \approx 0,1047 M \cdot n; \quad \eta = 100 P_2 / P_1.$$

По полученным данным построить рабочие характеристики двигателя  $P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2)$  при  $U = U_{\text{НОМ}}$ .

### 4.3. Регулировочные характеристики

Регулировочные характеристики позволяют выяснить возможности и пределы регулирования частоты вращения или поддержания её постоянной при изменении тормозного момента на валу двигателя.

#### 4.3.1. Регулировочная характеристика (частота вращения $n = \text{const}$ )

Характеристика позволяет выяснить в каких пределах следует изменять подводимое к двигателю напряжение, чтобы при изменении нагрузки на валу частота вращения его оставалась постоянной.

Снятие регулировочной характеристики  $U = f(M)$  при  $n = \text{const}$  осуществить следующим образом.

1. Реостатом  $RR_B$  загрузить двигатель посредством момента генератора  $G$  до номинального режима ( $U_{\text{ном}} = 110$  В,  $I_{a,\text{ном}} = 12,8$  А,  $M_{\text{ном}} = 8,4$  Н·м,  $n_{\text{ном}} = 1250$  об/мин).

2. Реостатом  $RR_B$  постепенно уменьшать момент генератора  $G$ ; одновременно реостатом  $RR_{p,d}$  поддерживать частоту вращения якоря постоянной,  $n_{\text{ном}} = 1250$  об/мин (за счет уменьшения подводимого к двигателю напряжения  $U$ ). В процессе опыта фиксировать величины: частоты вращения якоря  $n$ ; тока  $I_a = I_B$  ( $PAI$ ) в обмотках якоря и возбуждения двигателя; момента  $M$  (см. Прил. 8.1, см. с. 191). Данные измерений (6, 7 точек) занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2. Измерение регулировочной характеристики  
(частота вращения  $n = \text{const}$ )

$U$	В								
$I_a = I_B$	А								
$M$	Н·м								

По полученным данным построить регулировочную характеристику двигателя  $U = f(M)$  при  $n = \text{const}$ .

#### 4.3.2. Регулировочные характеристики (момент $M = \text{const}$ )

Снятие регулировочной характеристики  $I_a, n = f(U)$  при  $M_c = \text{const}$  осуществить следующим образом.

1. Реостатом  $RR_{p,d}$  установить номинальное значение напряжения двигателя  $M, U_{\text{ном}} = 110$  В ( $PVI$ );

2. Реостатом  $RR_B$  загрузить двигатель посредством генератора  $G$  до значения тока  $I_a = I_B = 10$  А и момента  $M = 0,75M_{ном} = 0,75 \cdot 8,4 = 6,3$  Н·м.

3. Реостатом  $RR_{р.д}$  уменьшать напряжение  $U$  ( $PVI$ ); одновременно поддерживать реостатом  $RR_B$  тормозной момент на валу постоянным ( $I_a = I_B = 10$  А = const;  $M = 6,3$  Н·м = const). В процессе опыта фиксировать величины: напряжение  $U$  ( $PVI$ ); тока  $I_a = I_B$  ( $PAI$ ) в обмотках якоря и возбуждения двигателя; частоты вращения якоря  $n$  (см. показание тахогенератора). Данные измерений (6, 7 точек) занести в табл. 8.3.

**Таблица 8.3. Измерение регулировочных характеристик**  
(момент  $M = \text{const}$ )

$U$	В									
$I_a = I_B$	А									
$n$	об/мин									

По полученным данным построить регулировочные характеристики двигателя  $I_a, n = f(U)$  при  $M_c = \text{const}$ .

#### 4.4. Скоростная характеристика

Скоростная характеристика  $n = f(I_a)$  при  $U = U_{ном}$  получена по данным опыта снятия рабочих характеристик (см. выше разд. 4.2 и табл. 8.1).

Опытные данные для построения скоростной характеристики перенести из табл. 8.1 в табл. 8.4.

**Таблица 8.4. Измерение скоростной характеристики**

$n$	об/мин									
$I_a = I_B$	А									

По полученным данным построить скоростную характеристику двигателя  $n = f(I_a)$  при  $U = U_{ном}$ .

Установить реостат  $RR_{р.д}$  в положение “Пуск” (*введен*) и автоматом  $QF$  отключить двигатель  $M$  и обмотку возбуждения  $LG$  генератора  $G$  от сети.

## 5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 183).
4. Номинальные данные исследованного ДПТ (разд. 5.3, с. 74).
5. Номинальные данные ГПТ (там же).
6. Схемы испытаний, рис. 8.1.
7. Результаты опытов и расчётов, представленные в таблицах 8.1 – 8.4.
8. Экспериментальные графические зависимости:

8.1. Рабочие характеристики двигателя  $P_1, M, I_a, n, \eta = f(P_2)$  при  $U = U_{\text{ном}}$ , представленные *на одном графике*;

8.2. Регулировочную характеристику двигателя  $U = f(M)$  при  $n = \text{const}$  в осях координат  $U$  и  $M$ .

8.3. Регулировочные характеристики двигателя  $I_a, n = f(U)$  при  $M_c = \text{const}$ , представленные *на одном графике* в осях координат  $I_a, n$  и  $U$ .

8.4. Скоростную характеристику двигателя  $n = f(I_a)$  при  $U = U_{\text{ном}}$  в осях координат  $n$  и  $I_a$ .

Каждый график расположить с соответствующей таблицей на одной странице. На странице с рабочими характеристиками также привести соответствующие формулы для расчёта характеристик

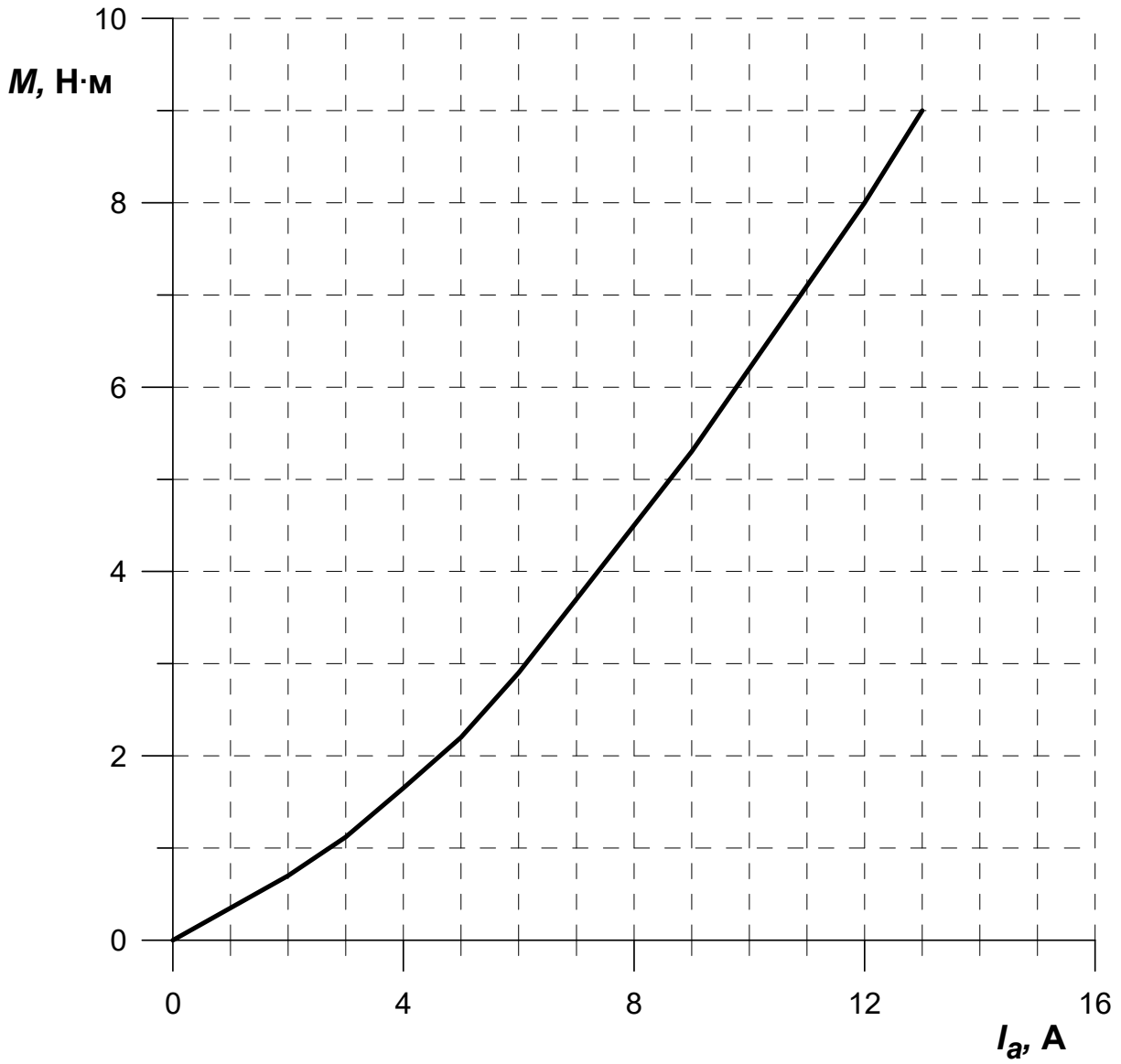
Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Машины постоянного тока подшить в *одну* общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

## 6. Контрольные вопросы

1. Опишите устройство двигателя постоянного тока. Какое основное конструктивное отличие машин постоянного тока от других типов электрических машин?
2. Какова область применения двигателей постоянного тока последовательного возбуждения?
3. Какие преимущества имеет двигатель последовательного возбуждения по сравнению с двигателем параллельного возбуждения?
4. Как осуществляется пуск в ход двигателя постоянного тока? Как изменить направление вращения двигателя?
5. Назовите способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока.
6. Почему не допускается работа двигателя последовательного возбуждения на холостом ходу и при малых нагрузках?
7. Поясните принцип действия двигателя постоянного тока.
8. Назовите основные характеристики двигателей постоянного тока. Почему характеристики двигателя последовательного возбуждением являются мягкими?
9. Почему при малых нагрузках двигатель последовательного возбуждения идет “в разнос”?

## Приложение 8

### П8.1. Зависимость момента двигателя от тока якоря, $M=f(I_a)$





## 9. РАБОТА № 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ

### Оглавление

1. Цель работы .....	194
2. Программа работы .....	194
3. Основы теории и устройство .....	195
3.1. Общие положения .....	195
3.2. Двухступенчатые ЭМУ с поперечным полем .....	197
4. Экспериментальное исследование .....	201
4.1. Пуск асинхронного двигателя .....	204
4.2. Характеристики холостого хода .....	204
4.2.1. Характеристика первой ступени .....	204
4.2.2. Характеристика второй ступени .....	205
4.2.3. Результирующая характеристика .....	206
4.3. Исследование ЭМУ под нагрузкой .....	207
4.3.1. Настройка компенсации .....	207
4.3.2. Внешние характеристики .....	208
4.3.2.1. Внешняя характеристика при нормальной компенсации .....	209
4.3.2.2. Внешняя характеристика при недокомпенсации .....	209
4.3.2.3. Внешняя характеристика при перекомпенсации .....	210
4.3.3. Коэффициент усиления ЭМУ .....	211
5. Содержание и оформление отчёта .....	213
6. Контрольные вопросы .....	213
Перечень рисунков в 9-м разделе .....	193
Перечень таблиц в 9-м разделе .....	193

### Перечень рисунков в 9-м разделе

Рис. 9.1. Схема ЭМУ с поперечным полем .....	196
Рис. 9.2. Магнитная система ЭМУ со схемой размещения обмоток .....	198
Рис. 9.3, лист 1. Схема включения ЭМУ для снятия характеристик холостого хода: <i>a</i> – первой ступени $E_2 = f(I_1)$ ; <i>b</i> – второй ступени $E_3 = f(I_2)$ и результирующей $E_3 = f(I_1)$ .....	201
Рис. 9.3, лист 2. Схема включения ЭМУ для снятия характеристик при нагрузке: внешние характеристики $U_3 = f(I_3)$ .....	202
Рис. 9.4. Передняя (приборная) панель стенда “Электромашинный усилитель” .....	203
Рис. 9.5. Общий вид стенда “Электромашинный усилитель” .....	203

### Перечень таблиц в 9-м разделе

Табл. 9.1. Измерение характеристики холостого хода первой ступени .....	205
Табл. 9.2. Измерение характеристики холостого хода второй ступени .....	206
Табл. 9.3. Измерение результирующей характеристики холостого хода .....	207
Табл. 9.4. Измерение внешних характеристик .....	210
Табл. 9.5. Расчёт коэффициента усиления .....	212

## 1. Цель работы

Изучить устройство, принцип действия и основные характеристики электромашиного усилителя (ЭМУ).

## 2. Программа работы

2.1. Познакомиться с устройством ЭМУ, схемой соединения обмоток и паспортными данными.

2.2. Снять характеристику холостого хода каждой ступени.

Определить величину ЭДС  $E_{3r}$  на рабочих (продольных) щётках  $IA1$  и  $IA2$ , индуцированную остаточным магнитным потоком.

2.3. Настроить нормальную компенсацию реакции якоря путём подбора величины сопротивления  $RR_k$ , шунтирующего компенсационную обмотку.

2.4. Снять внешние характеристики ЭМУ для возрастающей нагрузки при токе управления  $I_1$ , соответствующем номинальному напряжению  $U_3$  при холостом ходе, и  $n = n_{ном}$  для различной степени компенсации:

- нормальная компенсация,
- недокомпенсация,
- перекомпенсация.

2.5. Определить коэффициент усиления ЭМУ  $k_y$ , соответствующий нормальной компенсации.

### 3. Основы теории и устройство

#### 3.1. Общие положения

В автоматических устройствах возникает *необходимость усиления электрической мощности*, получаемой от различных маломощных измерительных элементов или преобразователей (температуры, давления, влажности, химического свойства среды и т. д.). В частности, преобразователями скорости вращения являются тахогенераторы (см. разд. Пб.1, с. 129, сл.). Используемые для указанной цели устройства называются *усилителями*.

В технике применяются различные виды усилителей электрической мощности: электронные (ламповые), полупроводниковые, магнитные и электромашинные (термин 28, с. 20). Последние представляют собой специальную разновидность электромашинных генераторов, которые приводятся во вращение приводными электрическими двигателями с  $n = \text{const}$ . *Усиление мощности при этом происходит за счет мощности, получаемой от приводного двигателя*. Электромашинные усилители (ЭМУ) применяются для автоматического управления работой электрических машин в различных производственных и транспортных установках.

Простейший, *одноступенчатый*, ЭМУ – это обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением с *шхтованной магнитной цепью индуктора и якоря*. Простейший ЭМУ имеет одну степень усиления мощности – от обмотки возбуждения (в ЭМУ она называется *обмоткой управления*) к обмотке якоря. Так как в таких генераторах мощность цепи возбуждения  $P_B = (0,01 \dots 0,02)P_{\text{ном}}$ , то коэффициент усиления  $k_y = P_{\text{ном}}/P_B = 50 \dots 100$ . Ввиду малого значения  $k_y$  такие усилители применяются редко.

В системах автоматического управления желательно иметь бóльший коэффициент усиления, чтобы уменьшить массу промежуточных блоков усиления. Электромашинные усилители – это генераторы постоянного тока с коэффициентом усиления 1000...10000.

*Номинальная выходная мощность современных ЭМУ достигает 100 кВт, а мощность цепи управления колеблется от долей ватта до нескольких ватт.*

Самыми распространенными являются *двухступенчатые* ЭМУ поперечного поля. В таких ЭМУ объединены два генератора независимого возбуждения, которые составляют *две ступени усиления* (рис. 9.1):

*первая ступень* – обмотка управления с током  $I_1 = I_y$  и поперечный короткозамкнутый контур в цепи якоря с поперечным током  $I_2 = I_q$  (щётки 1–1);

*вторая ступень* – поперечный короткозамкнутый контур с током возбуждения  $I_2 = I_q$  и выходная цепь – продольный ток  $I_3 = I_d$  и напряжение  $U_3 = U_{\text{ВЫХ}}$  (щётки 2–2).

Таким образом коэффициент усиления  $k_y$  по мощности ЭМУ поперечного поля равен

$$k_y = k_{y1} k_{y2}, \quad (9.1)$$

где  $k_{y1}$  и  $k_{y2}$  – коэффициенты усиления мощностей первой и второй ступеней.

Рассмотрим далее устройство и принцип действия *двухступенчатого* ЭМУ.

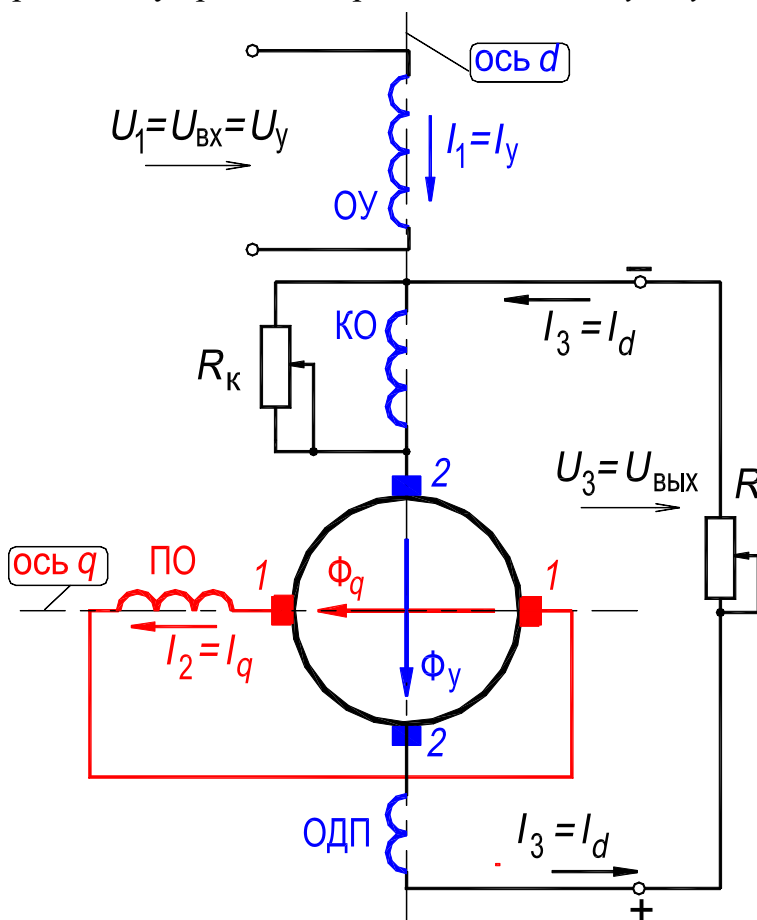


Рис. 9.1. Схема ЭМУ с поперечным полем

### 3.2. Двухступенчатые ЭМУ с поперечным полем

Двухступенчатые ЭМУ с поперечным полем являются самыми распространёнными ЭМУ и были разработаны фирмой “Дженерал электрик” (США) в 1937 г. под названием “амплидин”. Они изготавливаются обычно с неявно выраженными полюсами и с  $2p = 2$ . В России такие ЭМУ выпускаются серийно.

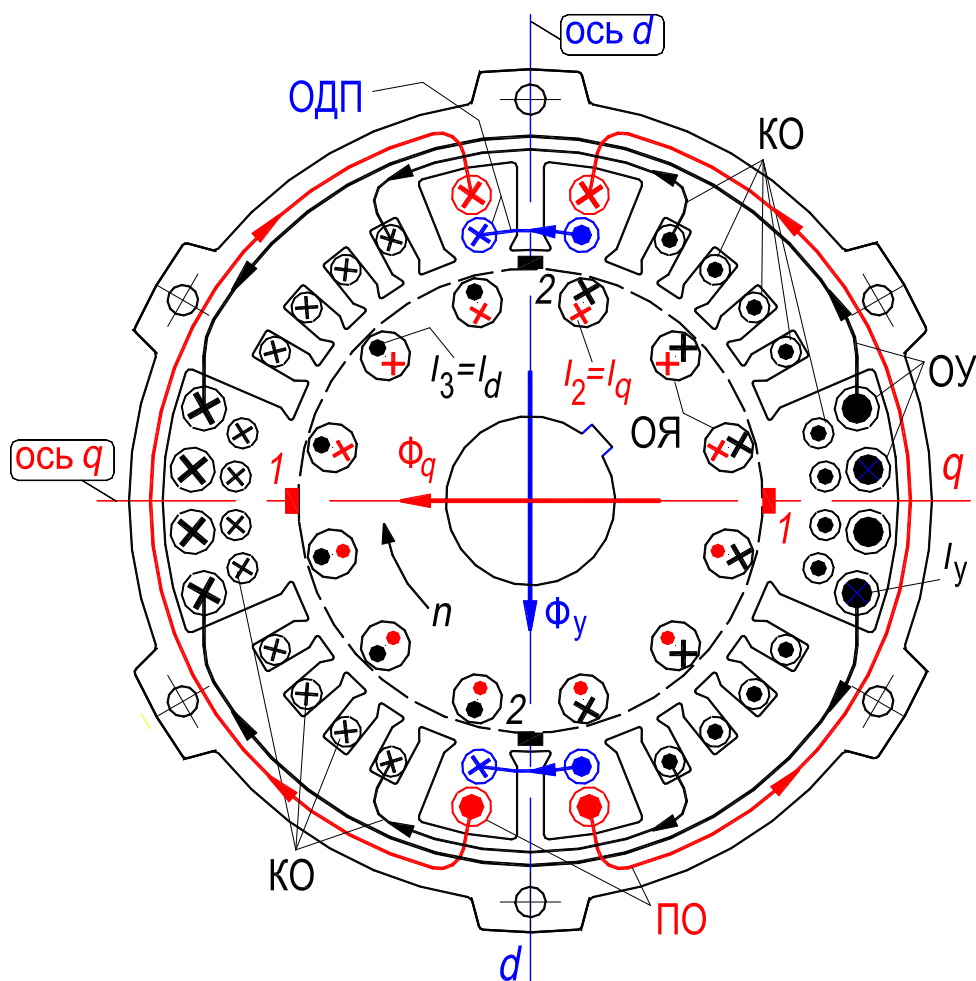
Этот ЭМУ имеет на якоре две пары щёток: щётки 1–1 по поперечной оси  $q$  и щётки 2–2 по продольной оси  $d$  (рис. 9.1 и 9.2). Обмотка управления ОУ создает первоначальный поток  $\Phi_y$  по продольной оси  $d$ . Этот поток индуцирует ЭДС, которая вызывает ток  $I_2 = I_q = k_1 \Phi_y$  в короткозамкнутой поперечной цепи якоря (щётки 1–1). Ток  $I_2 = I_q$ , протекая по обмотке якоря ОЯ и поперечной подмагничивающей обмотке ПО, создает поток  $\Phi_q = k \cdot I_2$  по поперечной оси  $q$ . Поток  $\Phi_q$  индуцирует ЭДС в выходной цепи (щётки 2–2), в результате чего в цепи нагрузки возникает ток  $I_3 = I_d$  и на выходных зажимах – напряжение  $U_3 = U_{\text{вых}}$ .

Применение поперечной подмагничивающей обмотки ПО позволяет уменьшить ток  $I_2 = I_q$  и улучшить тем самым коммутацию под поперечными щётками 1–1. Поэтому добавочных полюсов в поперечной оси  $q$  обычно не делают.

Ток нагрузки  $I_3 = I_d$  создает поток реакции якоря действующий навстречу потоку управления  $\Phi_y$ . Для компенсации действия реакции якоря в ЭМУ поперечного поля устанавливается компенсационная обмотка КО. В результате снижается мощность управления и увеличивается коэффициент усиления. Компенсационную обмотку, с целью достижения компенсации реакции якоря не только по величине, но и форме, выполняют распределенной. Для точной компенсации в ЭМУ поперечного поля имеется регулировочный резистор  $RR_k$ , с помощью которого производится настройка компенсации.

Если действие КО является слишком сильным, то возникает опасность самовозбуждения ЭМУ, в результате чего нормальная работа ЭМУ нарушается. Обычно КО выполняется с некоторым запасом (*перекомпенсация*), и регулирование (ослабление) её действия производится с помощью шунтирующего сопротивления  $R_k$ .

Результирующий поток  $\Phi_q$  в поперечной оси  $q$  машины создается током  $I_2 = I_q$  поперечной цепи, включающей обмотку якоря ОЯ и обмотку подмагничивания ПО. Результирующий поток в продольной оси  $d$  машины равен потоку обмотки управления  $\Phi_y$ , так как МДС компенсационной обмотки и МДС реакции якоря от тока нагрузки  $I_3 = I_d$  в сумме практически равны нулю.



**Рис. 9.2. Магнитная система ЭМУ со схемой размещения обмоток**  
(лобовые соединения обмоток управления ОУ и компенсационной КО показаны частично)

На рис. 9.2 представлен поперечный разрез магнитопровода статора и якоря ЭМУ поперечного поля. Статор – неявнополусный с пазами, имеющими разный профиль. Обмотка дополнительных полюсов ОДП, которой снабжается ЭМУ для улучшения коммутации тока нагрузки  $I_3 = I_d$  (щётки 2–2), располагается на зубце по продольной оси  $d$  машины. Компенсационная обмотка КО, которая состоит из катушек *разной* ширины, помещается в пазах между осью  $d$  и большим пазом. В большом пазу располагаются обмотки управления ОУ, которых

обычно в ЭМУ бывает две или четыре. При этом можно осуществлять управление в зависимости от нескольких величин (например, в зависимости от скорости вращения и тока якоря двигателя прокатного стана и т. п.). В большом пазу также располагается одна сторона катушки компенсационной обмотки КО. Высота спинки магнитопровода над большим пазом всего несколько миллиметров, так как над большим пазом замыкается только поток управления.

Сердечник якоря имеет обычную конфигурацию (на рис. 9.2 он изображен схематично, без пазов). Обмотка якоря обычно имеет небольшое укорочение шага. В витках обмотки якоря складываются токи в короткозамкнутом поперечном контуре  $I_2 = I_q$  и ток нагрузки  $I_3 = I_d$ . В каждой четверти обмотки якоря токи отличаются друг от друга, что вносит лишь некоторые особенности в расчёт электрических потерь в обмотке якоря.

Для уменьшения влияния гистерезиса вокруг спинки сердечника статора наматывают размагничивающую обмотку, питаемую переменным током. Поток этой обмотки замыкается в сердечнике статора по окружности (вдоль ярма) и не проникает в якорь. Ширина петли гистерезиса при таком размагничивании сужается. На рис. 9.2 эта обмотка не показана.

Коэффициентом усиления ЭМУ  $k_y$  называется отношение выходной мощности  $P_{\text{вых}} = P_3$  к входной мощности  $P_{\text{вх}} = P_y = P_1$ :

$$k_y = P_3 / P_1. \quad (9.2)$$

Мощность  $P_{\text{вх}}$  называется также мощностью управления  $P_y$ . Коэффициент усиления мощности ЭМУ достигает значений  $k_y = 1000 \dots 10000$ .

Различает также коэффициенты усиления тока

$$k_i = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} = I_3 / I_1 \quad (9.3)$$

и напряжения

$$k_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = U_3 / U_1. \quad (9.4)$$

Очевидно, коэффициент усиления мощности

$$k_y = k_i k_u. \quad (9.5)$$

Обычно требуется, чтобы при изменении режима работы ЭМУ  $k_y = \text{const}$ . Для этого магнитная система ЭМУ выполняется ненасыщенной.



От ЭМУ требуется также быстродействие работы, т. е. быстрое изменение  $P_{\text{вых}}$  при изменении  $P_{\text{вх}}$ . Быстродействие определяется электромагнитными постоянными времени обмоток ЭМУ. Быстродействие ЭМУ можно оценить некоторой эквивалентной постоянной времени  $T_3$ , учитывающей скорость протекания переходных процессов в ЭМУ в целом. Обычно  $T_3 = 0,05 \dots 0,3$  с.

Во избежание замедляющего действия вихревых токов, индуцируемых при изменении потока в магнитопроводе, последний изготавливается полностью из листовой электротехнической стали высокого качества. Влияние гистерезиса магнитной цепи сводится к минимуму выбором соответствующей марки стали, а также специальными дополнительными мерами.

Для оценки качества ЭМУ вводится также понятие *добротности*  $k_d$ , которая определяется как

$$k_d = k_y / T_3. \quad (9.6)$$

Желательно, чтобы добротность  $k_d$  была больше, что возможно при больших  $k_y$  и малых  $T_3$ . Однако увеличение  $k_y$  обычно приводит к увеличению  $T_3$  и наоборот. Например, при увеличении сечений магнитопровода ЭМУ магнитный поток, выходное напряжение, выходная мощность и коэффициент усиления мощности увеличиваются. Однако одновременно увеличиваются также индуктивности и постоянные времени обмоток. Поэтому значения  $k_y$  и  $T_3$  приходится выбирать компромиссным образом [1,13].

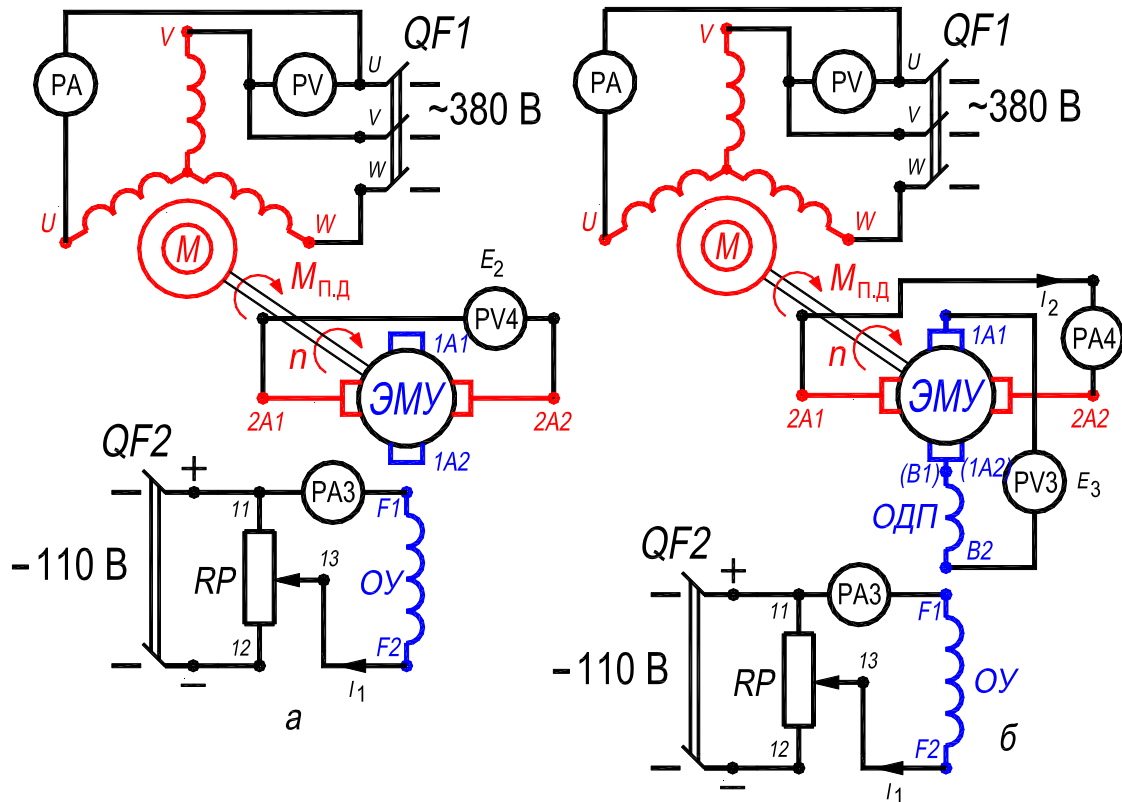
## 4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке в состав которой входят: исследуемый электромашинный усилитель (ЭМУ) и приводной двигатель ( $M$ ) – четырёхполюсный ( $p = 2$ ) трёхфазный асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором,  $n_1 = 25$  об/с (1500 об/мин); схемы включения приведены на рис. 9.3, листы 1 и 2. На рис. 9.4 представлена фотография передней (приборной) панели стенда “Электромашинный усилитель”. На рис. 9.5 – фотография стенда с исследуемым агрегатом.

Значения номинальных данных ЭМУ и АД – см. разд. 5.4, с. 75.

Собрать схему включения ЭМУ и двигателя  $M$  для снятия характеристик холостого хода первой ступени усилителя (рис. 9.3, лист 1, *a*).

Электромашинный усилитель имеет несколько обмоток управления, предназначенных для суммирования сигналов и других целей (уничтожение остаточного магнитного потока, стабилизация и т. д.). При снятии характеристик для удобства их сравнения необходимо использовать одну и ту же обмотку управления ОУ (рис. 9.3).



**Рис. 9.3, лист 1.** Схема включения ЭМУ для снятия характеристик холостого хода: *a* – первой ступени  $E_2 = f(I_1)$ ; *б* – второй ступени  $E_3 = f(I_2)$  и результирующей  $E_3 = f(I_1)$  (см. далее разд. 4.2)

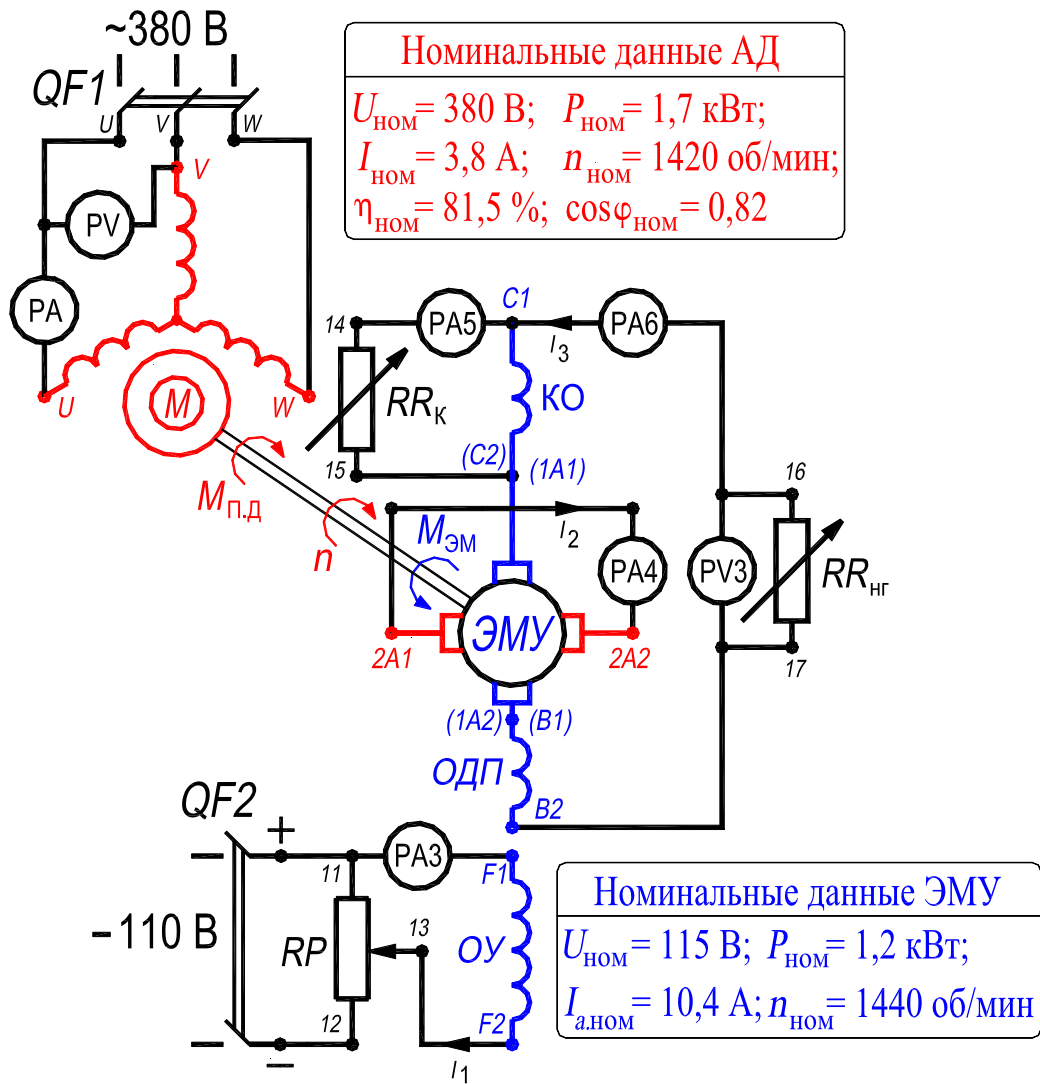


Рис. 9.3, лист 2. Схема включения ЭМУ для снятия характеристик при нагрузке: внешние характеристики  $U_3 = f(I_3)$ ; см. далее разд. 4.3

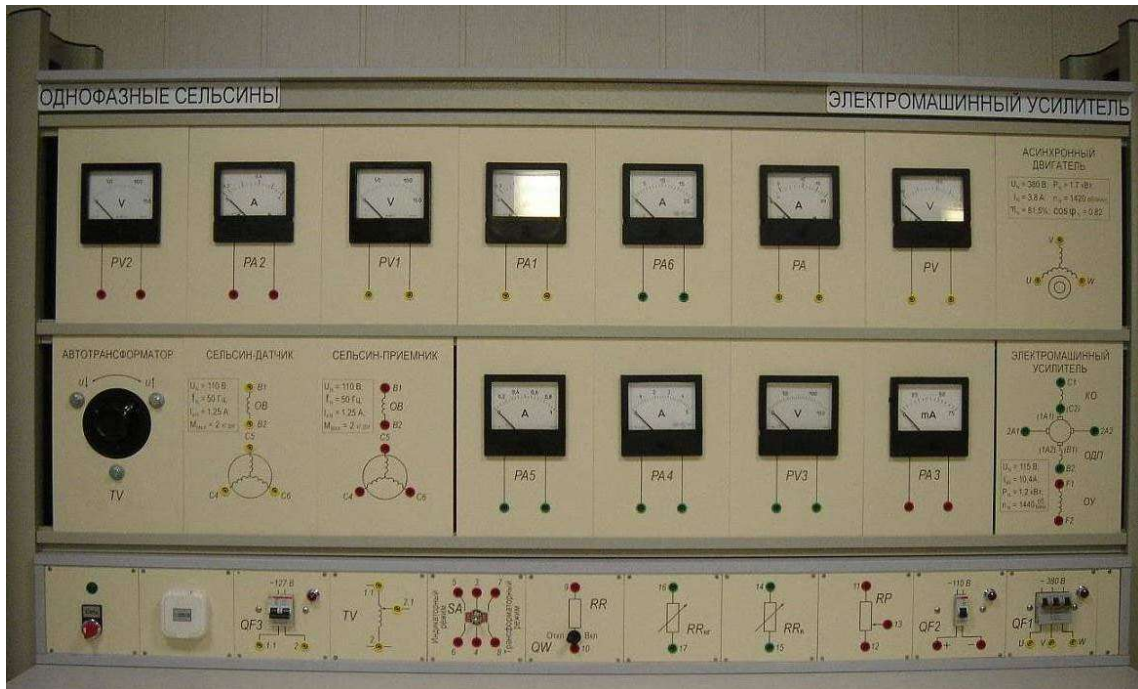


Рис. 9.4. Передняя (приборная) панель стенда “Электромашинный усилитель”



Рис. 9.5. Общий вид стенда “Электромашинный усилитель”

## 4.1. Пуск асинхронного двигателя

Выполнить *прямой пуск* приводного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (на роторе обмотка типа беличья клетка) [4, см. разд. 3.9, с. 140, сл.].

Включить автомат  $QF1$  – на обмотку статора двигателя подано номинальное линейное напряжение  $U_{л.ном} = 380$  В. Пусковой ток в обмотке статора двигателя составляет 16...20 А (номинальный ток – 3,8 А). На распределительную электрическую сеть, питающую Лаборатории Электрических машин, это практически не оказывает влияния. Через несколько секунд ротор двигателя разгонится до скорости холостого хода (она незначительно меньше скорости поля  $n_1 = 1500$  об/с), а ток уменьшится примерно до 1.0...1,5 А.

## 4.2. Характеристики холостого хода

(см. разд. 3.1, с. 195, сл.)

Магнитную цепь ЭМУ, как и в машинах нормального типа, исследуют по характеристике холостого хода. Наличие в ЭМУ поперечного поля двух ступеней усиления входного сигнала приводит к необходимости снятия трёх характеристик холостого хода:

- а) *первой* ступени  $E_2 = f(I_1)$  при  $I_2 = 0$  и  $I_3 = 0$ ;
- б) *второй* ступени  $E_3 = f(I_2)$  при  $I_3 = 0$ ;
- в) *результатирующей*  $E_3 = f(I_1)$  при  $I_3 = 0$ .

Для всех характеристик снимают *восходящую и нисходящую* ветви в первой четверти при постоянной номинальной скорости вращения  $n = \text{const}$ .

### 4.2.1. Характеристика первой ступени

Характеристика холостого хода первой ступени – это зависимость ЭДС  $E_2$  (PV4, см. рис. 9.3, лист 1, а) на поперечных щётках 2A1 и 2A2 от тока  $I_1$  (PA3) в обмотке управления ОУ; снимать характеристику при изменении тока  $I_1$  от нуля до номинального значения и обратно (цепь продольных щеток 1A1 и 1A2 разомкнута,  $I_2 = 0$  и  $I_3 = 0$ ).

Снятие характеристики х. х.  $E_2 = f(I_1)$  при  $n = \text{const}$  осуществить следующим образом.

1. Запустить приводной двигатель  $M$  (см. выше разд. 4.1).

2. Включить автомат  $QF2$  – на обмотку управления ОУ подано напряжение постоянного тока, которое регулируется потенциометром  $RP$ .

3. Снять *восходящую ветвь* характеристики х. х. Потенциометром  $RP$  увеличивать ток  $I_1$  до номинального значения и фиксировать значение ЭДС  $E_2$ . Результаты опыта (6...8 точек) занести в первую и вторую строки табл. 9.1.

4. Снять *нисходящую ветвь* характеристики х. х. Потенциометром  $RP$  уменьшать ток  $I_1$  от номинального значения до нуля и фиксировать значение ЭДС  $E_2$  при тех же значениях тока  $I_1$ , что и предыдущем пункте 2. Результаты опыта (6...8) точек занести в третью строку табл. 9.1.

5. Выключить автоматы  $QF1$  и  $QF2$  – схема (рис. 9.3, лист 1,а) отключена от источников напряжения переменного и постоянного тока.

**Таблица 9.1. Измерение характеристики холостого хода первой ступени**

Ветвь характеристики	$I_1$	A								
Восходящая	$E_2$	B								
Нисходящая	$E_2$	B								

По данным опыта построить характеристику х. х. первой ступени ЭМУ,  $E_2 = f(I_1)$  при  $I_2 = 0$  и  $I_3 = 0$ .

#### 4.2.2. Характеристика второй ступени

Характеристика холостого хода второй ступени – это зависимость ЭДС  $E_3$  ( $PV3$ , см. рис. 9.3, лист 1,б) на продольных щётках  $1A1$  и  $1A2$  от тока  $I_2$  ( $PA4$ ) в цепи поперечных щёток; снимается при замкнутой цепи поперечных щёток  $2A1$  и  $2A2$ .

Собрать схему включения ЭМУ и двигателя  $M$  для снятия характеристик холостого хода второй ступени усилителя (рис. 9.3, лист 1,б). Для перехода от схемы на рис. 9.3, лист 1,а к схеме на рис. 9.3, лист 1,б необходимо вольтметр  $PV4$  заменить амперметр  $PA4$  и к продольным щёткам  $1A1$  и  $1A2$  подсоединить вольтметр  $PV3$ .

Снятие характеристики х. х.  $E_3 = f(I_2)$  при  $n = \text{const}$  осуществить следующим образом.

1. Запустить приводной двигатель  $M$  (см. выше разд. 4.1).

2. Измерить ЭДС остаточного магнетизма  $E_{3r}$  ( $PV3$ ), наведенную остаточным магнитным потоком при обесточенной цепи обмотки управления ОУ (автомат  $QF2$  отключен,  $I_1 = 0$ ) и номинальной скорости вращения.

3. Снять *восходящую ветвь* характеристики х. х. Потенциометром  $RP$  увеличивать ток  $I_2$  и фиксировать значение ЭДС  $E_3$  (максимальное значение  $E_3 = (1,2 \dots 1,3)U_{ном} = (1,2 \dots 1,3) \cdot 115$  В). Результаты опыта (6...8) точек занести в первую и вторую строки табл. 9.2.

4. Снять *нисходящую ветвь* характеристики х. х. Потенциометром  $RP$  уменьшать ток  $I_2$  от значения соответствующего максимальному значению  $E_3$  до нуля и фиксировать значение ЭДС  $E_3$  при тех же значениях тока  $I_2$ , что и в предыдущем пункте 3. Результаты опыта (6...8) точек занести в третью строку табл. 9.2.

5. Выключить автоматы  $QF1$  и  $QF2$  – схема (рис. 9.3, лист 1,б) отключена от источников напряжения переменного и постоянного тока.

**Таблица 9.2. Измерение характеристики холостого хода второй ступени**

Ветвь характеристики	$I_2$	А								
Восходящая	$E_3$	В								
Нисходящая	$E_3$	В								

По данным опыта построить характеристику х. х. второй ступени ЭМУ,  $E_3 = f(I_2)$  при  $I_3 = 0$ .

#### 4.2.3. Результирующая характеристика

Результирующая характеристика х. х. усилителя – это зависимость ЭДС  $E_3$  ( $PV3$ ) на продольных щётках  $1A1$  и  $1A2$  от тока  $I_1$  ( $PA3$ ) в обмотке управления ОУ; снимается при замкнутой цепи поперечных щёток  $2A1$  и  $2A2$ .

Схема опыта прежняя, представлена на рис. 9.1, лист 1,б.

Снятие характеристики х. х.  $E_3 = f(I_1)$  при  $n = \text{const}$  осуществить следующим образом.

1. Запустить приводной двигатель  $M$  (см. выше разд. 4.1).

2. Включить автомат  $QF2$  – на обмотку управления ОУ подано напряжение постоянного тока, которое регулируется потенциометром  $RP$ .

3. Снять *восходящую ветвь* характеристики х. х. Потенциометром  $RP$  увеличивать ток  $I_1$  и фиксировать значение ЭДС  $E_3$  /максимальное значение  $E_3 = (1,2...1,3)U_{ном} = (1,2...1,3) \cdot 115$  В/. Результаты опыта (6...8) точек занести в первую и вторую строки табл. 9.3.

4. Снять *нисходящую ветвь* характеристики х. х. Потенциометром  $RP$  уменьшать ток  $I_1$  от значения соответствующего максимальному значению  $E_3$  до нуля и фиксировать значение ЭДС  $E_3$  при тех же значениях тока  $I_1$ , что и в предыдущем пункте 3. Результаты опыта (6...8) точек занести в третью строку табл. 9.3.

5. Выключить автоматы  $QF1$  и  $QF2$  – схема (рис. 9.3, лист 1,б) отключена от источников напряжения переменного и постоянного тока.

**Таблица 9.3. Измерение результирующей характеристики холостого хода**

Ветвь характеристики	$I_1$	А								
Восходящая	$E_3$	В								
Нисходящая	$E_3$	В								

*Примечание.* Опыт по снятию результирующей характеристики холостого хода можно объединить с опытом по снятию характеристики х. х. второй ступени, фиксируя одновременно значения токов  $I_1$  и  $I_2$ , а также ЭДС  $E_3$ , и занося их табл. 9.2 и 9.3.

По данным опыта построить результирующую характеристику х. х. ЭМУ,  $E_3 = f(I_1)$  при  $I_3 = 0$ .

Все три характеристики холостого хода в пределах номинального напряжения  $U_{ном} = 115$  В ( $PV3$ ) прямолинейны (оно снимается с продольных щёток  $IA1$  и  $IA2$ ), так как магнитная система ЭМУ в отличие от нормальных машин не насыщена. Малое насыщение магнитной системы ЭМУ необходимо для обеспечения высокого коэффициента усиления, а также пропорциональности между входным сигналом ( $I_1$  или  $U_1$ ) и выходной величиной ( $E_3$ ).

### 4.3. Исследование ЭМУ под нагрузкой

#### 4.3.1. Настройка компенсации

Исследование ЭМУ под нагрузкой производится в соответствии со схемой, представленной на рис. 9.3, лист 2.

Степень компенсации ЭМУ характеризуется величиной отношения МДС  $F_k$  компенсационной обмотки КО к МДС  $F_d$  продольной реакции якоря



$$k_k = F_k / F_d = I_k W_k / I_3 W_a, \quad (9.7)$$

где  $W_k = 127$  – число витков компенсационной обмотки на один полюс;  
 $W_a = 332,5$  – число витков обмотки якоря на один полюс.

При *полной (нормальной)* компенсации, когда  $k_k = 1$  и ток управления  $I_1 = \text{const}$ , магнитный поток по продольной оси  $d$  машины в условиях меняющейся нагрузки остается постоянным и, следовательно, ток  $I_2$  в поперечной цепи не зависит от рабочего тока  $I_3$ . Поэтому *для нормальной компенсации необходимо подобрать такое значение шунтирующего сопротивления  $RR_k$ , при котором изменение рабочего тока  $I_3$  от нуля до номинального не вызывало бы изменения тока  $I_2$  в поперечной цепи,  $I_2 = \text{const}$ .*

При *недокомпенсации*, когда  $k_k < 1$  значение  $RR_k$  должно быть меньше, чем при нормальной компенсации.

При *перекомпенсации*, когда  $k_k > 1$  значение  $RR_k$  должно быть больше, чем при нормальной компенсации.

Опыт по настройке нормальной компенсации ЭМУ рекомендуется начинать с *малого* значения сопротивления  $RR_k$  (*с недокомпенсацией*) при токе возбуждения  $I_1$  обеспечивающем номинальное напряжение  $U_3 = E_3 = U_{\text{ном}} = 115$  В при холостом ходе.

### 4.3.2. Внешние характеристики ЭМУ

Внешняя характеристика ЭМУ – это зависимость напряжения  $U_3$  ( $PV3$ ) на продольных щётках  $IA1$  и  $IA2$  от тока нагрузки  $I_3$  ( $PA6$ ) при постоянной скорости вращения,  $U_3 = f(I_3)$  (см. рис. 9.3, лист 2).

Внешние характеристики ЭМУ снимают при трёх степенях компенсации:

- *нормальной*  $k_k = 1$ ,
- *недокомпенсации*  $k_k < 1$ ,
- *перекомпенсации*  $k_k > 1$ .

Порядок проведения опытов во всех трёх случаях одинаков.

Собрать схему включения ЭМУ и двигателя  $M$  для снятия внешних характеристик (рис. 9.3, лист 2).

#### 4.3.2.1. Внешняя характеристика при *нормальной компенсации*

Снятие внешней характеристики  $U_3 = f(I_3)$  при *нормальной компенсации* осуществить следующим образом.

1. Запустить приводной двигатель  $M$  (см. выше разд. 4.1).
2. Отключить нагрузку  $RR_{нг}$  (*холостой ход ЭМУ, ток  $I_3 = 0$* ). Включить автомат  $QF2$  и изменяя потенциометром  $RP$  ток  $I_1$  установить номинальное напряжение  $U_{ном} = 115$  В ( $PV3$ ).
3. Настроить *нормальную* компенсацию (см. выше разд. 4.3.1): опытным путём установить такое значение сопротивления  $RR_k = RR_{к.н}$  при котором ток  $I_2$  ( $PA4$ ) *остаётся неизменным* ( $I_2 = \text{const}$ ) в диапазоне изменения тока  $I_3$  ( $PA6$ ) *от нуля до номинального значения* ( $0 \leq I_3 \leq 10,4$  А). Изменение тока  $I_3$  осуществить реостатом  $RR_{нг}$ .

4. Для снятия внешней характеристики постепенно увеличивать реостатом  $RR_{нг}$  ток нагрузки  $I_3$  ( $PA6$ ) от нуля до номинального значения 10,4 А, при этом поддерживать неизменным значение тока возбуждения  $I_1 = \text{const}$  ( $PA3$ ), а также скорость вращения якоря. В процессе опытов фиксировать: напряжение  $U_3$  ( $PV3$ ), ток нагрузки  $I_3$  ( $PA6$ ) и ток  $I_2$  ( $PA4$ ) в цепи поперечных короткозамкнутых щеток  $2A1$  и  $2A2$ . Результаты опыта для *нормальной* компенсации (6...8 точек) занести табл. 9.4.

Схему (рис. 9.3, лист 2) оставить включенной к источникам питания.

#### 4.3.2.2. Внешняя характеристика при *недокомпенсации*

Снятие внешней характеристики  $U_3 = f(I_3)$  при *недокомпенсации* осуществить следующим образом.

1. Перейти к режиму *недокомпенсации*: уменьшить шунтирующее сопротивление  $RR_k$  ( $RR_k < RR_{к.н}$ ), вследствие чего уменьшится ток  $I_k$  компенсационной обмотки ( $F_k < F_d$ ).
2. Для снятия внешней характеристики постепенно увеличивать реостатом  $RR_{нг}$  ток нагрузки  $I_3$  ( $PA6$ ) от нуля до номинального значения 10,4 А, при этом поддерживать неизменным значение тока возбуждения  $I_1 = \text{const}$  ( $PA3$ ), а также скорость вращения якоря. В процессе опытов фиксировать: напряжение  $U_3$  ( $PV3$ ),

ток нагрузки  $I_3$  (РА6) и ток  $I_2$  (РА4) в цепи поперечных короткозамкнутых щеток 2А1 и 2А2. Результаты опыта для *недокомпенсации* (6...8 точек) занести табл. 9.4.

Схему (рис. 9.3, лист 2) оставить включенной к источникам питания.

#### 4.3.2.3. Внешняя характеристика при *перекомпенсации*

Снятие внешней характеристики  $U_3 = f(I_3)$  при *перекомпенсации* осуществить следующим образом.

1. Перейти к режиму *перекомпенсации*: незначительно увеличить шунтирующее сопротивление  $RR_K$  ( $RR_K > RR_{K,н}$ ), вследствие чего увеличится ток  $I_K$  компенсационной обмотки ( $F_K > F_d$ ) (*при значительной перекомпенсации возможно самовозбуждение ЭМУ и, соответственно, перегрузка усилителя*).

2. Для снятия внешней характеристики постепенно увеличивать реостатом  $RR_{нг}$  ток нагрузки  $I_3$  (РА6) от нуля до номинального значения 10,4 А, при этом поддерживать неизменным значение тока возбуждения  $I_1 = \text{const}$  (РА3), а также скорость вращения якоря. В процессе опытов фиксировать: напряжение  $U_3$  (PV3), ток нагрузки  $I_3$  (РА6) и ток  $I_2$  (РА4) в цепи поперечных короткозамкнутых щеток 2А1 и 2А2. Результаты опыта для *перекомпенсации* (6...8 точек) занести табл. 9.4.

Схему (рис. 9.3, лист 2) отключить от источников питания.

Таблица 9.4. Измерение внешних характеристик

Степень компенсации	нормальная	$U_3$	В							
		$I_3$	А							
		$I_2$	А							
		$I_1$	А							
	недокомпенсация	$U_3$	В							
		$I_3$	А							
		$I_2$	А							
		$I_1$	А							
	перекомпенсация	$U_3$	В							
		$I_3$	А							
		$I_2$	А							
		$I_1$	А							

По данным опытов построить на одном графике три внешних характеристики ЭМУ (нормальная компенсация, недокомпенсация и перекомпенсация),  $U_3 = f(I_3)$  при  $I_1 = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ .

Падение напряжения в якорной цепи ЭМУ определяет падающий характер внешней характеристики при *нормальной* компенсации. При *недокомпенсации* характеристика получается более резко падающая вследствие некоторой недокомпенсации реакции якоря. При *перекомпенсации* внешние характеристики могут получаться разными в зависимости от установки величины шунтирующего сопротивления  $RR_k$ . При незначительной перекомпенсации характеристика падающая. При соответствующей величине шунтирующего сопротивления характеристика может быть горизонтальной, тогда  $U_3 = \text{const}$ . В этом случае МДС компенсационной обмотки компенсирует реакцию якоря и падение напряжения в якорной цепи ЭМУ при любом токе нагрузки  $I_3$ . При значительной перекомпенсации внешнюю характеристику будет возрастающей. На практике она не применяется из-за возможного в этом случае самовозбуждения ЭМУ даже при отсутствии тока возбуждения (управления)  $I_1$ . При самовозбуждении нарушается управление работой ЭМУ и возможна значительная перегрузка машины.

### 4.3.3. Коэффициент усиления ЭМУ

Коэффициент усиления ЭМУ, представляющий отношение выходной полезной мощности  $P_3$  к мощности управления  $P_1$ , определяют для режима *нормальной* компенсации.

Обычно  $k_y \leq 10000$ , в специальных случаях  $k_y$  достигает значений 100000.

Коэффициент усиления определяют по формуле

$$k_y = P_3 / P_1, \quad (9.8)$$

где  $P_3 = U_3 \cdot I_3$ ;  $P_1 = I_1^2 R_1$ ;  $R_1 = 1860$  Ом – сопротивление обмотки управления.

На величину коэффициента усиления ЭМУ влияют величина нагрузки, степень компенсации, насыщение магнитной системы и другие факторы. Влияние величины нагрузки можно установить по внешней характеристике при *нормальной* компенсации.

*Расчёт коэффициента усиления  $k_y$  осуществить следующим образом.*

**1.** Перенести в табл. 9.5 экспериментальные данные из табл. 9.4, соответствующие *нормальной* компенсации.

**2.** Выполнить по (9.8) расчёт значений  $P_3$ ,  $P_1$ ,  $k_y$  и занести их в табл. 9.5. По данным расчёта построить зависимость  $k_y = f(P_3)$ .

Таблица 9.5. Расчёт коэффициента усиления

Нормальная компенсация	Экспери- мент	$U_3$	В							
		$I_3$	А							
		$I_2$	А							
		$I_1$	А							
	Расчёт	$P_3$	Вт							
		$P_1$	Вт							
		$k_y$	–							

Коэффициент усиления повышается при перекомпенсации и понижается при недокомпенсации. Магнитная система ЭМУ выполняется слабонасыщенной. Это делается для того, чтобы повысить коэффициент усиления  $k_y$  и получить линейные связи между входными и выходными величинами. Повышение коэффициента усиления при малом насыщении магнитопровода ЭМУ объясняется тем, что МДС и мощность  $P_1$  обмотки управления, необходимые для получения заданных значений выходного напряжения  $U_3$  и выходной мощности  $P_3$ , будут меньше, чем при насыщенном магнитопроводе.

Однако повышение коэффициента усиления  $k_y$  при слабом использовании ЭМУ в магнитном отношении приводит к тому, что при одной и той же номинальной мощности и частоте вращения габариты и масса ЭМУ будут больше.

## 5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 194).
4. Номинальные данные исследованного ЭМУ (разд. 5.4, с. 75).
5. Номинальные данные приводного АД (там же).
6. Схемы испытаний, рис. 9.3, листы 1 и 2.
7. Результаты опытов, представленные в таблицах 9.1 – 9.5.
8. Экспериментальные графические зависимости:
  - 8.1. Характеристика холостого хода **первой** ступени  $E_2 = f(I_1)$ ;
  - 8.2. Характеристика холостого хода **второй** ступени  $E_3 = f(I_2)$ ;
  - 8.3. **Результирующая** характеристика холостого  $E_3 = f(I_1)$ ;
  - 8.4. Три **внешних** характеристики (сняты при нормальной компенсации при недокомпенсации и перекомпенсации), которые должны быть построены на одном графике в осях координат  $U_3$  и  $I_3$ ;
  - 8.5. Зависимость коэффициента усиления  $k_y$  ЭМУ от выходной полезной мощности  $P_3$ . Привести расчёт коэффициента  $k_y$  для одного значения напряжения  $U_3$ , близкого к номинальному (115 В).

Каждый график расположить с соответствующей таблицей 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 Машины постоянного тока подшить в *одну* общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

## 6. Контрольные вопросы

1. Каковы особенности конструкции ЭМУ поперечного поля?
2. Объяснить принцип действия ЭМУ?
3. Объяснить способ настройки компенсации ЭМУ?

## 10. Машины постоянного тока, изготавливаемые в России

В истории развития машин постоянного тока было два периода, когда предполагали, что они не будут выпускаться промышленностью. Первый период относится к началу прошлого века, когда казалось, что переменный ток вытеснит постоянный и останутся только машины переменного тока. Второй период относится к 75...80-летней давности, когда представлялось, что развитие полупроводниковой техники должно было вытеснить механический преобразователь частоты – коллектор и машины постоянного тока в классической конструкции не будут выпускаться. Однако развитие электромашиностроения опровергло эти предположения.

*Машины постоянного тока благодаря экономичному регулированию частоты вращения, благоприятным механическим характеристикам появления новых источников постоянного тока нашли новые области применения и выдержали конкуренцию с машинами переменного тока.*

Выпускаются следующие серии машин постоянного тока: 1) серии машин общего назначения 2П и 4П (устройство и теория этих машин рассмотрены выше); 2) серии краново-металлургических двигателей; 3) серии машин специализированного назначения [13].

Серия 2П включает двигатели мощностью от 0,13 до 200 кВт с высотой оси вращения 90–135 мм. Для замены двигателей серии П габаритов 12-26 выпускается серия П2.

Разработана новая серия машин постоянного тока 4П, которая имеет лучшие технико-экономические показатели и использует некоторые узлы и детали асинхронных двигателей серии 4А [4, разд. 4, с. 20, сл.].

Двигатели серии 2П и 4П выпускаются на напряжения 110, 220, 340 и 440 В, на номинальные частоты вращения 750, 1000, 1500, 2200 и 3000 об/мин. Машины выполняются в защищенном исполнении с самовентилиацией и независимой вентиляцией от постороннего вентилятора; в закрытом исполнении – с естественным охлаждением и наружным обдувом от постороннего вентилятора [4, разд. 7, с. 28, сл.].

Двигатели серии 2П имеют независимое возбуждение и компенсационную обмотку (термин 21, с. 19), обеспечивающую большие кратковременные перегрузки и широкий диапазон изменения частоты вращения.

Для металлургических, крановых, экскаваторных и других электроприводов выпускаются двигатели постоянного тока серии Д. Двигатели имеют мощность от 2,5 до 185 кВт, напряжение 220 и 440 В и номинальную частоту вращения 400–1440 об/мин. Масса двигателя мощностью 2,5 кВт 130 кг, а двигателя 185 кВт – 3745 кг.

Двигатели серии Д обладают малым моментом инерции и обеспечивают регулирование частоты вращения в широких пределах. Максимальная частота вращения примерно в 3 раза выше номинальной.

Для горнодобывающей металлургической и других отраслей промышленности выпускаются уникальные машины постоянного тока.

Для электроприводов шагающих экскаваторов с ковшем объемом от 15 до 100 м<sup>3</sup> и стрелой до 100 м разработан комплекс электрооборудования, включающий двигатели и генераторы постоянного тока. В комплекс входят, электродвигатель постоянного тока вертикального исполнения типа МПВЭ-450-29 для привода механизма вращения мощностью 450 кВт, напряжением 370 В, частотой вращения 29 об/мин, массой 36 т; электродвигатель типа МПЭ-1000-630 УХЛЗ в горизонтальном исполнении для привода механизма подъема и тяги мощностью 1000 кВт, напряжением 600 В, частотой вращения 630/1000 об/мин, массой 8460 кг. Генераторы постоянного тока ГПЭ-1250 обеспечивают питание главных приводов постоянного тока. Мощность генератора 1250 кВт, напряжение 930 В, частота вращения 1000 об/мин, масса 14 т.

Для буровых установок выпущен двигатель типа ДЭВ-808 мощностью 68 кВт,  $U = 440$  В,  $n = 1200$  об/мин, масса 920 кг. Для морских буровых установок в морском взрывозащищенном исполнении создан двигатель типа МПП-1000-1000МЗ мощностью 1000 кВт,  $U = 600$  В,  $n = 1000$  об/мин, массой 62500 кг.

Для привода автосамосвала БелАЗ-7519 грузоподъемностью 110 т выпускается тяговый двигатель мотор-колеса, который встраивается в пневматические колеса автосамосвала и крепится к его шасси при помощи фланца на станине. Мощность двигателя 360 кВт,  $U = 750$  В,  $n = 1100$  об/мин, масса 2050 кг.

Создан тяговый генератор типа ГПА-600 для питания тяговых двигателей мотор-колеса. Мощность генератора 630 кВт, масса 2480 кг.



Для электровозов и тепловозов выпускаются тяговые двигатели мощностью до 8 МВт. Для мощных ледоколов, прокатных станков изготавливаются двигатели постоянного тока до 30 МВт в двух-, трёх- и четырёхъякорном исполнении. Большое число различных типов двигателей постоянного тока выпускается для летательных аппаратов, автомобилей и тракторов.

Микродвигатели постоянного тока изготавливаются несколькими сериями. Серия ПЛ включает двигатели независимого возбуждения мощностью от 30 до 600 Вт, напряжением 110 и 220 В и частотой вращения 1400 и 2700 об/мин.

Микродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами входят в серию ДПМ от долей ватта до десятков ватт, напряжением 12, 14 и 27 В.

Малоинерционные исполнительные микродвигатели постоянного тока имеют якорь, выполненный в виде полого цилиндра или диска с печатной обмоткой (термин 19, с.19). Эти двигатели с постоянными магнитами объединяются серией ДПР. Машины серии ДПР могут применяться в качестве тахогенераторов (см. разд. Пб.1, с. 129, сл.).

Выпускается большое количество двигателей постоянного тока для детских игрушек с питанием от батареи 4В.

Выпускаются универсальные коллекторные двигатели серий УЛ, УМТ и МУН, работающие на постоянном и переменном токе. Мощность универсальных двигателей от 10 до 600 Вт (см. разд. 13.5, с. 256, сл.).

Предполагается, что в ближайшие годы число модификаций двигателей постоянного тока увеличится. Более подробные данные приведены в [13].

## **Часть вторая. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **11. Назначение коллекторных машин переменного тока**

Асинхронные [4] и синхронные [5] двигатели переменного тока не могут в полной мере удовлетворить потребностям промышленности, так как они не допускают достаточно простого, плавного и экономичного регулирования скорости вращения. Эта задача может быть в ряде случаев разрешена с помощью коллекторных (асинхронных) двигателей переменного тока [1,13].

*Коллекторные двигатели переменного тока* (термин 1, с. 17) выполняются как *трёхфазными*, так и *однофазными* и допускают плавное и широкое регулирование скорости при высоком коэффициенте мощности. Они имеют достаточно большой начальный момент вращения и могут быть построены с различными характеристиками скорости вращения.

Трёхфазные коллекторные двигатели находят применение в промышленных установках, однофазные – также в тяговых установках переменного тока и в быту.

Как всякая электрическая машина, коллекторная машина обратима: она может работать в качестве двигателя и генератора. Однако в генераторном режиме коллекторная машина используется лишь в специальных случаях.

Наряду с положительными свойствами коллекторные машины переменного тока имеют ряд существенных недостатков, существенно ограничивающих их распространение.

Наличие на роторе коллектора сравнительно низкого напряжения с подвижными щётками значительно удорожает машину. Стоимость 1 кВт, отнесенного к одному полюсу машины, у однофазного коллекторного двигателя получается в 1,5...1,7 раза выше, чем у обычного асинхронного двигателя, а для трёхфазного коллекторного двигателя – выше в 3...5 раз.

Коллекторные асинхронные двигатели конструктивно и технологически значительно сложнее бесколлекторных [4, разд. 8.1, с. 36, сл.].

Трудности, связанные с коммутацией тока, ограничивают возможность построения коллекторных асинхронных машин большой мощности.

Чаще можно встретить коллекторные машины в качестве вспомогательных в каскадных соединениях с бесколлекторными асинхронными машинами. С помощью каскадных соединений во многих случаях удается решить проблему плавного и достаточно экономичного регулирования скорости вращения крупных асинхронных машин при одновременном регулировании их коэффициента мощности [1,13].

С коллекторными машинами конкурируют асинхронные машины со статическими полупроводниковыми преобразователями частоты, заменяющими коллектор (термины 4 и 6, с. 17).

## 12. Трёхфазные коллекторные машины

### 12.1. Работа трёхфазной асинхронной бесколлекторной машины при введении в цепь ротора дополнительной ЭДС

Для понимания принципа работы трёхфазной коллекторной машины рассмотрим вначале бесколлекторную асинхронную машину [4, с.185, сл.], в цепь фазы ротора которой посредством контактных колец добавляется ЭДС  $\underline{E}_\Delta$  частоты скольжения  $f_{2s}$ . Добавление в цепь ротора ЭДС  $\underline{E}_\Delta$  означает подведение к ротору дополнительной активной электрической мощности  $P_\Delta = m_2 E_\Delta I_2 \cos \varphi_\Delta$ , которая в зависимости от сдвига фаз  $\varphi_\Delta$  между ЭДС  $\underline{E}_\Delta$  и током  $\underline{I}_2$  может иметь любой знак. При  $P_\Delta > 0$  эта мощность передается ротору через контактные кольца извне; при  $P_\Delta < 0$  она отдается ротором во внешнюю цепь. При  $\varphi_\Delta = \pi/2$  мощность  $P_\Delta = 0$  и, следовательно, в цепь ротора вводится только реактивная мощность.

Если положить, что скольжение  $|s| \ll 1$ , то индуктивным сопротивлением ротора можно пренебречь по сравнению с активным и считать, что ток в цепи ротора при  $\underline{E}_\Delta = 0$  равен:

$$I_2 \approx E_2 s / r_2,$$

где  $E_2 s$  – ЭДС ротора при скольжении  $s$ ;  $r_2$  – активное сопротивление фазы ротора.

Момент вращения на валу машины при этом допущении

$$M = m_2 E_2 I_2 / \omega_1 = m_2 E_2^2 s / \omega_1 r_2, \quad (12.1)$$

где  $m_2$  – число фаз ротора;  $\omega_1$  – угловая скорость вращения магнитного поля.

Если в цепь ротора добавить ЭДС  $\pm \underline{E}_\Delta$  частоты скольжения в фазе (+) или противофазе (–) с  $\underline{E}_2$ , то ток ротора будет равен:

$$I_2 = (E_2 s \pm E_\Delta) / Z_2;$$

при малых скольжениях индуктивное сопротивление в цепи ротора можно не учитывать, полагая  $Z_2 \approx r_2$ . Момент вращения при этих допущениях равен:

$$M = m_2 E_2 I_2 / \omega_1 = m_2 (E_2^2 s \pm E_2 E_\Delta) / \omega_1 r_2. \quad (12.2)$$

Если при добавлении ЭДС  $\pm \underline{E}_\Delta$  момент сопротивления  $M_c$  на валу не изменяется ( $M_c = M$ ), то, как следует из сопоставления равенств (12.1) и (12.2), будет изменяться скольжение ротора.

Если до введения ЭДС  $\pm \underline{E}_\Delta$  скольжение было равно  $s_1$ , а после введения добавочной ЭДС оно стало равным  $s_2$ , то при  $M = \text{const}$

$$E_2^2 s_1 / r_2 = (E_2^2 s_2 \pm E_2 E_\Delta) / r_2,$$

откуда следует, что  $E_2 s_1 = E_2 s_2 \pm E_\Delta$ , или

$$s_2 = s_1 \mp \frac{E_\Delta}{E_2}, \quad (12.3)$$

причем здесь знак “–” в (12.3) соответствует совпадению по фазе ЭДС  $E_2$  и  $E_\Delta$ , а знак “+” – сдвигу их на  $180^\circ$ . Следовательно, при введении в цепь ротора ЭДС  $+E_\Delta$ , что соответствует подведению извне к ротору дополнительной активной мощности  $P_\Delta = m_2 E_\Delta I_2$ , скольжение уменьшается, т. е. скорость вращения ротора возрастает. При  $E_\Delta = s_1 E_2$  скольжение  $s_2 = 0$ ; при  $E_\Delta > s_1 E_2$  скольжение  $s_2 < 0$  и ротор вращается со скоростью выше синхронной.

При введении в цепь ротора ЭДС  $-E_\Delta$ , что соответствует отдаче ротором активной электрической мощности  $P_\Delta = -m_2 E_\Delta I_2$  в сеть, скольжение  $s_1$  возрастает, т. е. скорость вращения ротора уменьшается (рис. 12.1).

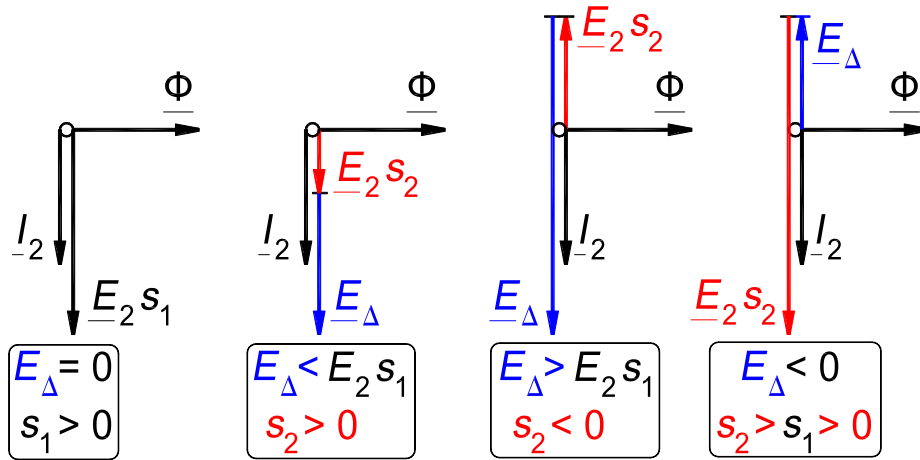


Рис. 12.1. Векторные диаграммы цепи ротора при введении в нее ЭДС  $E_\Delta$ , находящейся в фазе или противофазе с ЭДС  $E_2 s$  при  $M_c = \text{const}$

Таким образом путём добавления в цепь ротора ЭДС  $\pm E_\Delta$  частоты скольжения, находящейся в фазе или противофазе с ЭДС  $E_2 s_1$ , можно экономично, без потерь, регулировать скорость вращения (скольжение) ротора асинхронной машины в обе стороны от синхронной скорости.

Предположим теперь, что в цепь ротора добавляется ЭДС  $E_\Delta$ , находящаяся в квадратуре с ЭДС  $E_2 s_1$  (рис. 12.2). Эта ЭДС создаст в цепи ротора дополнительный ток  $I_{2\Delta}$ , сдвинутый относительно ЭДС  $E_2 s$  на угол  $90^\circ$  и не создающий поэтому никакого момента вращения. Следовательно, скольжение  $s_1$  останется при этом неизменным, но изменится первичный ток, который получит дополнительную слагающую  $-I'_{2\Delta}$ . Как видно

из рис. 12.2, добавление в цепь ротора ЭДС  $\underline{E}_\Delta$ , находящейся в квадратуре с ЭДС  $\underline{E}_2 s_1$ , позволяет при неизменном скольжении регулировать коэффициент мощности ( $\cos \varphi_1$ ) первичной цепи машины (на рис. 12.2 магнитные потери не учитываются, поэтому векторы  $\underline{I}_0$  и  $\underline{\Phi}$  совпадают по фазе).

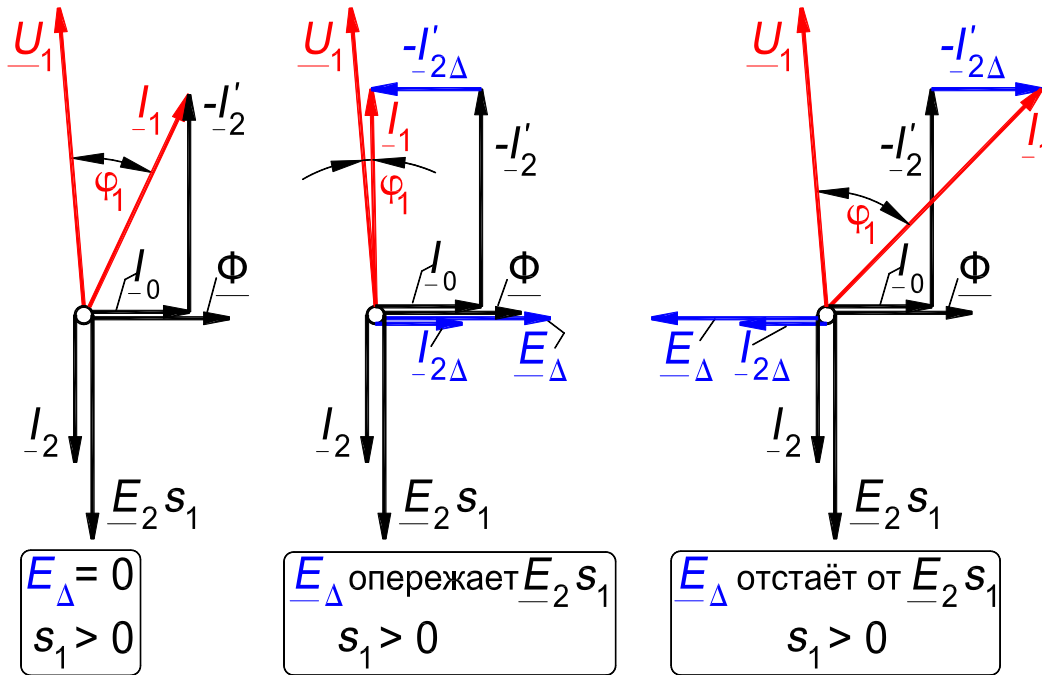


Рис. 12.2. Векторные диаграммы цепи ротора при введении в нее ЭДС  $\underline{E}_\Delta$ , находящейся в квадратуре с ЭДС  $\underline{E}_2 s$

В общем случае, когда ЭДС  $\underline{E}_\Delta$  сдвинута относительно ЭДС  $\underline{E}_2 s_1$  на угол  $\beta$  (рис. 12.3), ЭДС  $\underline{E}_\Delta$  следует разложить на две составляющие:  $\underline{E}'_\Delta$  и  $\underline{E}''_\Delta$ . Первая составляющая при неизменном моменте сопротивления изменит скольжение, сделав его равным  $s_2$ , а вторая изменит угол сдвига фаз  $\varphi_1$  между  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$ . Реактивные мощности, требуемые для создания вращающегося магнитного поля со стороны статора и ротора, соответственно равны:

$$\begin{aligned} P_{r1} &= m_1 I_0 E_1; \\ P_{r2} &= m_1 I_0 E'_2 s, \end{aligned} \quad (12.4)$$

где  $E'_2 = E_1$  – приведенная к обмотке статора ЭДС ротора.

При  $s < 1$  мощность  $P_{r2} < P_{r1}$ . Следовательно, при  $s < 1$  магнитное поле выгоднее создавать со стороны ротора, так как при этом требуется меньшая реактивная мощность.

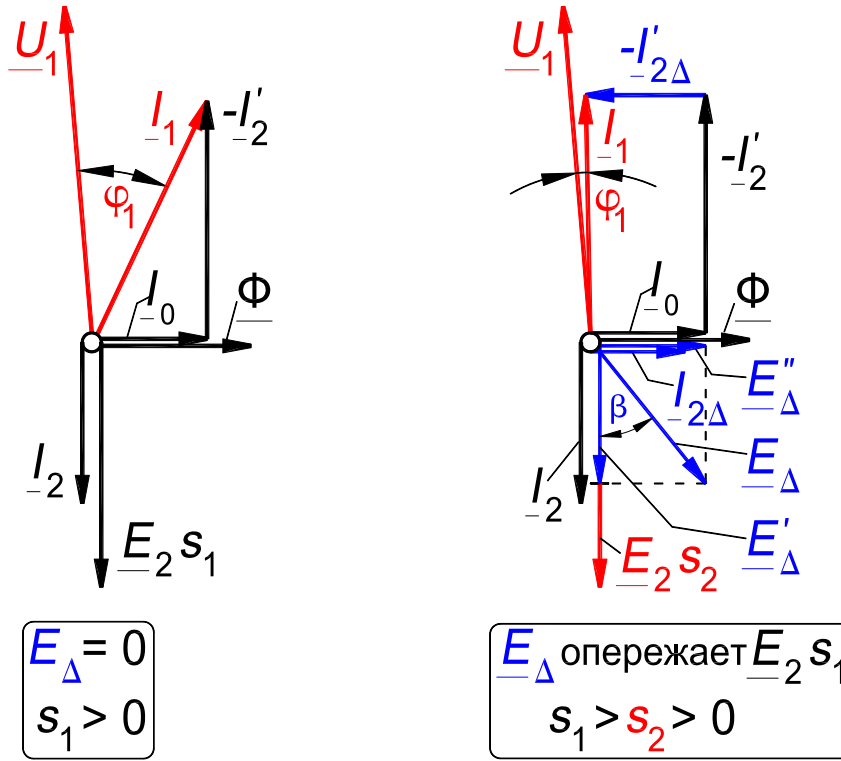


Рис. 12.3. Векторная диаграмма цепи ротора при введении в нее ЭДС  $\underline{E}_\Delta$  в общем случае при  $M_c = \text{const}$

Определим момент  $M$  на валу двигателя при любом скольжении  $s$  и наличии в цепи ротора дополнительной ЭДС  $\underline{E}_\Delta$ . Как в случае обычной асинхронной машины, момент выразится через напряжение  $U_1$ , параметры обмоток статора и ротора и скольжение  $s$ .

Для цепи статора имеем [2, § 4-3, е, с. 81, сл.]:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_0 \underline{Z}_0; \quad (12.5)$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0, \quad (12.6)$$

где  $\underline{I}_1$  – ток в фазе статора;  $\underline{Z}_1$  – полное сопротивление фазы статора;  $\underline{I}_0$  – намагничивающий ток;  $\underline{I}'_2$  – ток в фазе ротора, приведенный к обмотке статора;  $\underline{Z}_0$  – сопротивление цепи тока  $\underline{I}_0$  в схеме замещения, определяемое из равенства  $\underline{E}_1 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0$ ;  $\underline{E}_1$  – ЭДС фазы статора.

Уравнение ЭДС для цепи ротора, приведенное к цепи статора, может быть записано в следующем виде:

$$\underline{E}'_\Delta = s \underline{I}_0 \underline{Z}_0 + \underline{I}'_2 (r'_2 + jsx'_2),$$

или

$$\underline{E}'_{\Delta}/s = \underline{I}_0 \underline{Z}_0 + \underline{I}'_2 \underline{Z}'_{2\varnothing}, \quad (12.7)$$

где  $x'_2$  – приведенное индуктивное сопротивление фазы ротора при  $s = 1$ ;

$\underline{Z}'_{2\varnothing} = \frac{r'_2}{s} + jx'_2$ . Предположим, что

$$\underline{E}'_{\Delta} = k \underline{U}_1 = |k| e^{j\delta} \underline{U}_1 = (k_1 + jk_2) \underline{U}_1. \quad (12.8)$$

Тогда, решив совместно уравнения (12.5) – (12.8), найдем:

$$\underline{I}_1 = \underline{U}_1 \frac{1 + Y_0 \underline{Z}'_{2\varnothing} - \frac{k}{s}}{\underline{Z}_1 + C_1 \underline{Z}'_{2\varnothing}}, \quad (12.9)$$

$$-\underline{I}'_2 = \underline{U}_1 \frac{1 - \frac{kC_1}{s}}{\underline{Z}_1 + C_1 \underline{Z}'_{2\varnothing}}, \quad (12.10)$$

где  $Y_0 = 1/\underline{Z}_0$ ;  $C_1 = 1 + \underline{Z}_1/\underline{Z}_0$ . При  $k = 0$  выражения (12.9) и (12.10) переходят в выражения (4-37) и (4-38) [2, с. 82] для нормальной асинхронной машины.

Мощность, передаваемая от статора к ротору, равна:

$$P_{12} = m_1 E_1 I'_2 \cos(\underline{E}_1, \underline{I}'_2). \quad (12.11)$$

Предположим, что

$$\underline{E}_1 = \underline{I}'_2 Z = \underline{I}'_2 (r + jx), \quad (12.12)$$

где  $Z = r + jx$  – неизвестное пока сопротивление. Тогда

$$P_{12} = \frac{m_1 I'_2 Z I'_2 r}{Z} = m_1 I'^2_2 r \quad (12.13)$$

и момент вращения на валу

$$M = m_1 I'^2_2 r / \omega_1, \quad (12.14)$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость вращения магнитного поля.

Из уравнений (12.5) – (12.8) находим:

$$\underline{E}_1 = \underline{I}'_2 \left[ \frac{k \underline{Z}_1 + r'_2 + jkC_1 x'_2}{s - kC_1} + jx'_2 \right] = \underline{I}'_2 Z. \quad (12.15)$$

Принимая во внимание, что  $C_1 = c_1 e^{j\gamma} \approx c_1$  [2, § 4-3, е, с. 81, сл.], найдем из (12.8) и (12.15):

$$r = \frac{(k_1 r_1 + r'_2 - c_1 k_2 x'_{2к})(s - k_1 c_1) - k_2 c_1 (k_2 r_1 + c_1 k_1 x'_{2к})}{(s - k c_1)^2 + k_2^2 c_1^2}, \quad (12.16)$$



где  $x'_{2к} = \frac{x_1}{c_1} + x'_2$  – приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания при питании машины со стороны ротора.

Из равенства (12.10) получаем:

$$I'_2 = U_1 \frac{\sqrt{(s-k_1c_1)^2 + k_2^2c_1^2}}{s\sqrt{(r_1 + \frac{c_1r'_2}{s})^2 + (x_1 + c_1x'_2)^2}}. \quad (12.17)$$

Подставив найденные значения сопротивления  $r$  и тока  $I'_2$  в (12.14) для момента, найдем:

$$M = \frac{m_1U_1^2[a(s-k_1c_1)-b]}{\omega_1s^2[(r_1 + \frac{c_1r'_2}{s})^2 + (x_1 + c_1x'_2)^2]}, \quad (12.18)$$

где  $a = k_1r_1 + r'_2 - c_1k_2x'_{2к}$ ;  $b = k_2c_1(k_2r_1 + c_1k_1x'_{2к})$ .

При  $E_\Delta = 0$ ,  $k_1 = k_2 = 0$ ,  $a = r'_2$  и  $b = 0$ . В этом случае (12.18) переходит в (4-51) [2, с. 86] для обычной асинхронной машины:

$$M_0 = \frac{m_1U_1^2r'_2}{\omega_1s[(r_1 + \frac{c_1r'_2}{s})^2 + (x_1 + c_1x'_2)^2]}. \quad (12.19)$$

Сравнивая (12.18) и (12.19), получаем:

$$M = M_0 \frac{a(s-k_1c_1)-b}{r'_2s}. \quad (12.20)$$

Это выражение удобно для практических расчётов. Оно наглядно показывает, как влияет добавочная ЭДС  $E'_\Delta = kU_1$  на момент, развиваемый машиной.

При  $s = 0$  и  $b = 0$  (12.18) принимает вид:

$$M = -\frac{m_1U_1^2ak_1}{\omega_1c_1r_2'^2}. \quad (12.21)$$

Следовательно, при синхронизме момент положителен и машина работает двигателем, если  $k_1 < 0$  и  $a > 0$ . Последнее неравенство справедливо при  $r'_2 > r_1|k_1|$ . Этим определяются условия для сверхсинхронной работы асинхронного двигателя при введении в цепь его ротора добавочной ЭДС. На рис. 12.4 приведены кривые моментов двигателя 40 кВт,  $\frac{500}{\sqrt{3}}$  В, 750 об/мин. Кривая 1 соответствует  $k = -0,1 + j0,0$ , кривая 2 –  $k = 0$ , кривая 3 –  $k = 0,1 + j0,0$ . Кривая 1 показывает, что при  $k_1 = 0,1$  возможна сверхсинхронная работа двигателя при скольжениях от  $s = 0$  до  $s = -0,1$ .

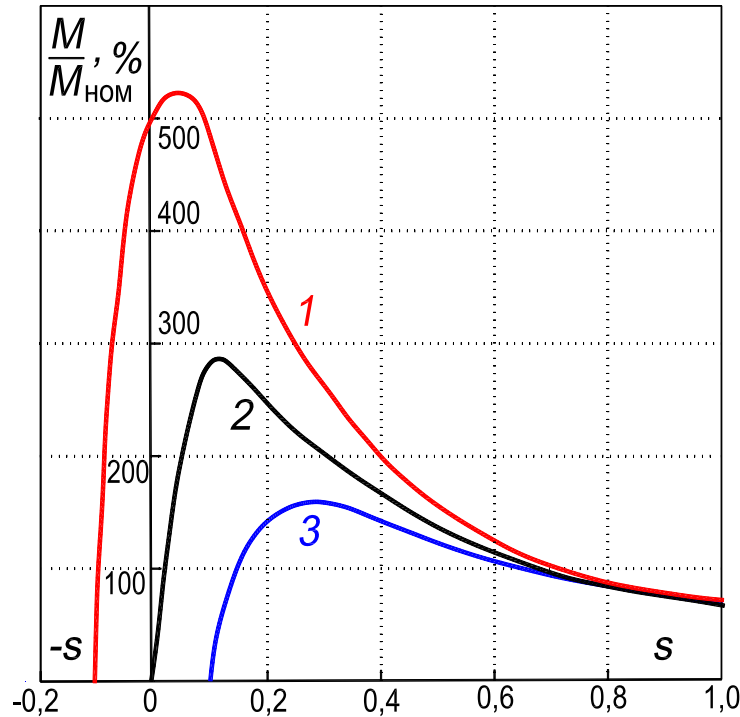


Рис. 12.4. Зависимость момента вращения от скольжения при разных значениях отношения  $k = \underline{E}_\Delta : \underline{U}_1$

## 12.2. Введение в цепь ротора асинхронной машины дополнительной ЭДС при помощи коллектора

В трёхфазных асинхронных коллекторных машинах введение в цепь ротора дополнительной ЭДС  $E_\Delta$  для регулирования скорости вращения и коэффициента мощности осуществляется с помощью коллектора. С этой целью обмотка ротора выполняется аналогично обмоткам машин постоянного тока двухслойной, обычно с диаметральной шагом, и выводится на коллектор (см. разд. 4.4, с. 51, сл.). Каждой паре полюсов в трёхфазной машине соответствуют три щеточных болта со щётками, наложенными на коллектор. Такой коллектор в дальнейшем называется трёхфазным.

Рассмотрим обмотку статора и трёхфазный коллекторный ротор, находящиеся в двухполюсном ( $p = 1$ ) вращающемся магнитном поле (рис. 12.5). Пусть угловая скорость вращения поля равна  $\omega_1$ , скорость вращения ротора  $\omega_2$ . В каждом витке ротора будет наводиться ЭДС частоты скольжения  $f_{2s} = (\omega_1 - \omega_2)/2\pi$ . Докажем, что ЭДС на щётках будет иметь постоянную частоту, не зависящую от скорости  $\omega_2$  вращения ротора и равную частоте ЭДС обмотки статора  $f_1 = \omega_1/2\pi$ . Как видно из рис. 12.5,а между любой парой неподвижных щеток, например  $a - b$  независимо

от того, вращается ли ротор или нет, всегда включено одно и то же число витков, определенным образом ориентированных в пространстве. Ось вращающегося магнитного поля проходит виток, соединённый со щёткой  $b$ , одновременно с первым витком фазы  $B-A$  статора, а последний виток этой фазы – одновременно с витком ротора, соединённым в этот момент со щёткой  $a$ . Следовательно, ЭДС на щётках  $a-b$  и в обмотке  $A-B$  статора совпадают по фазе и изменяются во времени с одной и той же частотой, определяемой скоростью  $\omega_1$  вращения поля. Таким образом, частота ЭДС на щётках не зависит от скорости вращения ротора, которая влияет лишь на амплитуду этой ЭДС. При синхронизме относительная скорость  $\omega_1 - \omega_2$  перемещения проводников обмотки ротора во вращающемся магнитном поле равна нулю, поэтому ЭДС на щётках также равна нулю. При всех других значениях  $\omega_1 - \omega_2$  ЭДС на щётках имеет конечное значение, пропорциональное скорости  $\omega_1 - \omega_2$ . При сверхсинхронной скорости вращения  $\omega_1 - \omega_2 < 0$  и фаза ЭДС на щётках изменяется на  $180^\circ$ .

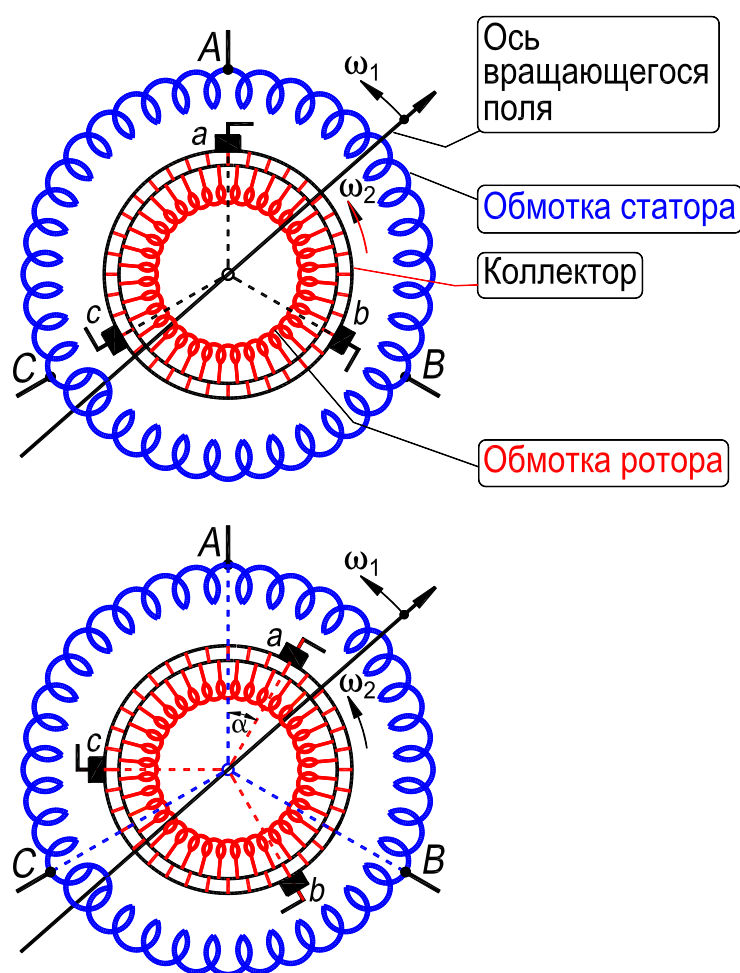


Рис. 12.5. Принцип устройства трёхфазной коллекторной машины

Таким образом, действующее значение ЭДС  $E_k$  на щётках может быть определено по обычной для цепи ротора формуле [4, с. 79]

$$E_k = 4,44f_1sw_2\Phi k_{2w} = E_2s, \quad (12.22)$$

где  $w_2$  – число витков между соседними щётками;  $k_{2w}$  – обмоточный коэффициент.

Если щётки на коллекторе сдвинуть на угол  $\alpha$  против направления вращения поля (рис. 12.5,б), то витки фазы ротора будут пересекаться магнитными линиями поля раньше соответствующих витков фазы статора и, следовательно, ЭДС на щётках ротора будет опережать ЭДС соответствующей фазы статора на временной угол  $\alpha$ . При сдвиге щеток в обратном направлении ЭДС на щётках ротора будет отставать от фазной ЭДС статора.

*Таким образом, коллектор в рассматриваемом случае является преобразователем частоты и фазы.* Он дает возможность соединять цепь вращающегося ротора, в витках обмотки которого действуют ЭДС частоты скольжения  $f_{2s} = s \cdot f_1$ , с внешней неподвижной цепью, имеющей частоту  $f_1$  и таким образом вводить в цепь ротора ЭДС  $E_\Delta$  требуемую для целей регулирования.

На рис. 12.6 представлены три случая введения в цепь ротора через коллектор добавочной ЭДС  $E_\Delta$  с помощью трансформатора. Случай *а* соответствует совпадению по фазе ЭДС  $E_k$  и  $E_\Delta$ . В случае *б* ЭДС  $E_\Delta$  с помощью соединения вторичных обмоток трансформатора в "зигзаг" повернута в сторону опережения на угол  $30^\circ$ . В этом случае коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  увеличивается (см. рис. 12.3). Тот же эффект в случае *в* достигается путём сдвига щеток против направления вращения поля на  $30^\circ$ .

Если внешняя цепь щеток коллектора разомкнута, то под действием ЭДС, наводимых в обмотке, в ней никаких токов не возникает. *Для того чтобы ток проходил по обмотке ротора, необходимо, чтобы внешняя цепь щеток была замкнута.* Как видно из рис. 12.6, при введении в цепь ротора дополнительной ЭДС  $E_\Delta$  замыкание внешней цепи щеток происходит через трансформатор или другое устройство, с помощью которого осуществляется введение ЭДС  $E_\Delta$ . При короткозамкнутой внешней цепи щеток  $E_\Delta = 0$ . Так как в цепи щеток действуют ЭДС частоты  $f_1$ , то токи, текущие в этой цепи внутри обмотки ротора и вне её, имеют также частоту  $f_1$ .

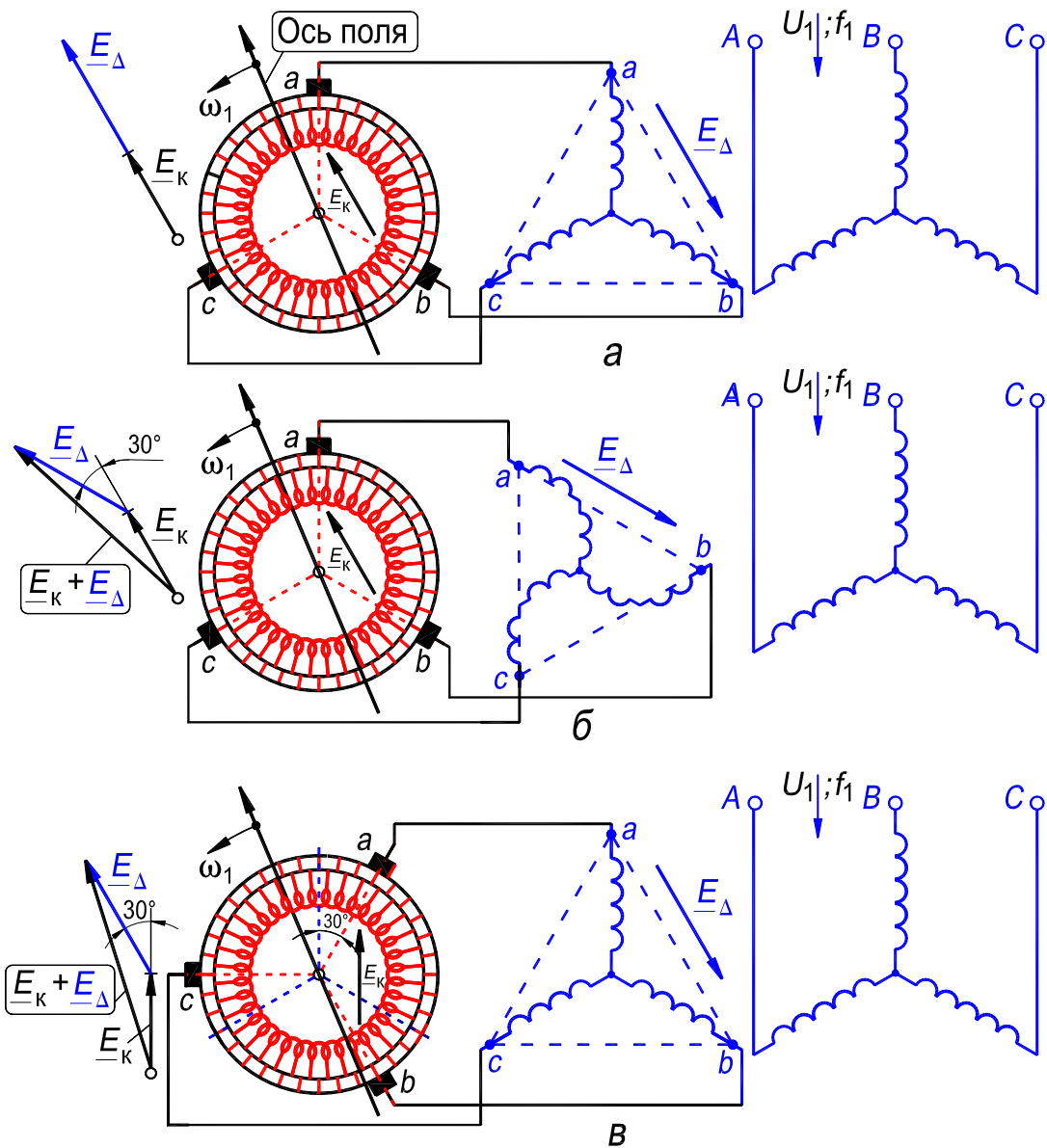


Рис. 12.6. Введение в цепь ротора ЭДС с помощью коллектора

Следует отметить, что в то время как внутри обмотки ротора между щётками проходит ток частоты  $f_1$ , ток в отдельных витках той же обмотки имеет частоту скольжения  $f_{2s} = s \cdot f_1$ . Рассмотрим это явление подробнее. Предположим, что ротор имеет скольжение  $s$  и, следовательно, виток обмотки ротора за время одного периода  $T = 1/f_1$  делает  $1 - s$  оборота при  $p = 1$ . На рис. 12.7 показан случай, когда  $s = 0,33$ . На оси абсцисс отложено время. Щётки  $a, b, c, \dots$  указывают интервалы времени, необходимые для прохождения одного витка между соседними щётками. Токи, текущие между щётками под действием трёхфазной системы ЭДС частоты  $f_1$  показаны в виде синусоид  $I, II, III, \dots$ . Пока виток обмотки

ротора передвигается между соседними щётками, он принадлежит определенной фазе, и ток в нём изменяется по синусоиде (например,  $I$ ) с частотой  $f_1$ . В момент коммутации виток переходит из одной фазы в другую. Ток в витке скачкообразно изменяет свое значение (с синусоиды  $I$  переходит на синусоиду  $II$ ), и пока он находится в системе другой фазы ( $II$ ), ток в нём снова изменяется синусоидально с частотой  $f_1$  и т. д. Ток в витке ротора имеет поэтому пульсирующий характер, но если выделить основную гармоническую, как это показано тонкой линией на рис. 12.7, то частота её, как нетрудно убедиться, будет соответствовать частоте скольжения. В рассматриваемом случае период  $T/s = 3T$ .

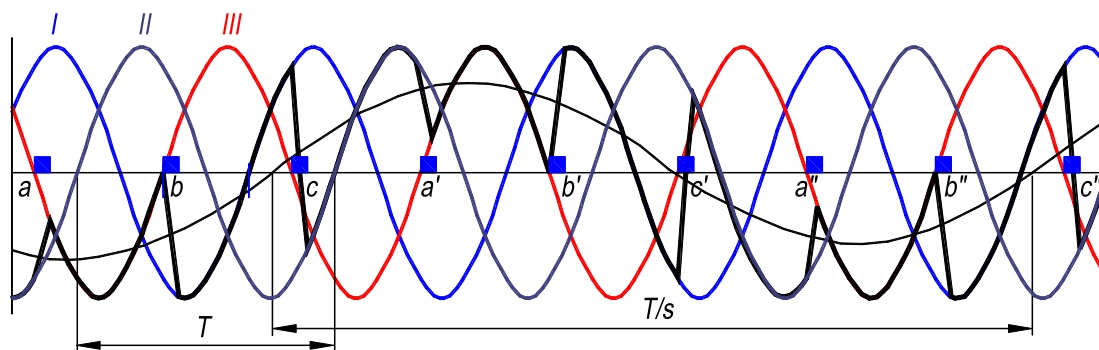


Рис. 12.7. Форма переменного тока в цепи ротора

Рассмотрим МДС создаваемые трёхфазной обмоткой ротора. Щётки на коллекторе делят обмотку на ряд неподвижных в пространстве цепей, сдвинутых между собой на  $2/3$  полюсного деления и обтекаемых трёхфазной системой токов с частотой  $f_1$ . При этих условиях обмотка создает вращающуюся МДС. Скорость вращения в пространстве МДС равна  $60f_1/p$ . Следовательно, в трёхфазной коллекторной машине, как и во всякой другой, МДС статора и ротора взаимно неподвижны.

Магнитодвижущая сила статора  $\underline{F}_1$  суммируясь с МДС ротора  $\underline{F}_2$  создает в пространстве результирующую МДС  $\underline{F}$  (рис. 12.8).

### 12.3. Коммутация тока в трёхфазном коллекторном роторе

Процесс коммутации тока в трёхфазных коллекторных машинах оказывает на их работу значительно большее ограничивающее влияние, чем в машинах постоянного тока (см. разд. 3.2, с. 90, сл.).

В короткозамкнутых секциях в процессе коммутации переменный ток частоты скольжения скачкообразно изменяет свое значение (рис. 12.7), так как секции переходят при этом из одной фазы обмотки ротора в другую. Изменение тока в секции

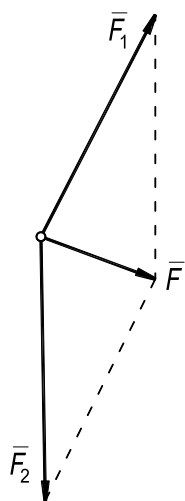


Рис. 12.8. Пространственная диаграмма МДС

получается тем большим, чем больше разность мгновенных значений тока в соседних фазах в момент коммутации. Если пренебречь временем коммутации  $T_k$  по сравнению с периодом тока  $T$ , то можно считать, что изменение тока определяется разностью мгновенных значений фазных токов, т. е. равно мгновенному значению линейного тока, проходящего через щётку в момент коммутации.

При коммутации в короткозамкнутой секции наводятся две ЭДС: реактивная  $e_R$  и ЭДС вращения  $e_B$ .

Реактивная ЭДС  $e_R$  равна сумме ЭДС самоиндукции и взаимоиנדукции одновременно коммутируемых секций и определяется скоростью изменения коммутируемого тока. Поэтому можно считать, что реактивная ЭДС  $e_R$  прямо пропорциональна мгновенному значению линейного тока, проходящего через рассматриваемую щётку (под словом "щётка" подразумеваются все щётки щеточного болта, см. рис. 4.7, с. 50).

В этом смысле говорят, что реактивная ЭДС  $e_R$  находится в фазе с линейным током. Чем большее число фаз имеет ротор, тем меньше при прочих равных условиях получается линейный ток и тем меньше реактивная ЭДС.

Электродвижущая сила вращения  $e_B$  наводится в короткозамкнутой секции вращающимся магнитным полем. Она пропорциональна относительной скорости вращения  $\omega_1 - \omega_2$  ротора в магнитном поле. При синхронизме  $e_B = 0$ ; ниже и выше синхронизма значение ЭДС вращения изменяется пропорционально скольжению.

Электродвижущая сила вращения неблагоприятно проявляется при пуске в ход, когда  $\omega_2 = 0$  и  $s = 1$ . Она в известной степени ограничивает также пределы возможного регулирования скорости вращения, так как при значительных положительных и отрицательных скольжениях ЭДС вращения может вызвать искрение щеток.

Рассмотрим, как суммируются ЭДС  $e_R$  и  $e_B$  в короткозамкнутой секции. Предположим (рис. 12.9), что коммутация происходит в момент, когда линейный ток щётки  $a$  проходит через максимальное значение и реактивная ЭДС  $e_R$

получается наибольшей. Пространственный вектор МДС  $\bar{F}_2$  будет в этот момент проходить через линию щётки  $a$ , так как он всегда совпадает с линией щётки, когда ток данной щётки имеет амплитудное значение [4, с. 71].

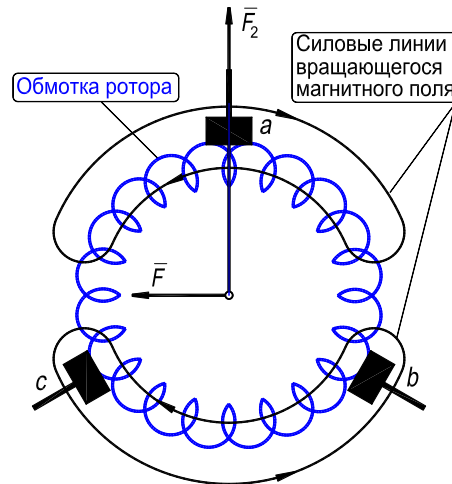


Рис. 12.9. К определению сдвига фаз между ЭДС  $e_R$  и  $e_B$

Примем, что вектор  $\bar{F}$  опережает вектор  $\bar{F}_2$  на угол, близкий к  $90^\circ$  (рис. 12.8). Следовательно, в рассматриваемый момент времени потокосцепление вращающегося поля с короткозамкнутой секцией щётки  $a$  будет максимальным и мгновенное значение ЭДС  $e_B = 0$ .

Таким образом, когда реактивная ЭДС  $e_R$  имеет наибольшее значение, ЭДС вращения  $e_B$  проходит через нуль. Исходя из этого, можно считать, что ЭДС  $e_R$  и  $e_B$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$  и поэтому результирующая ЭДС  $e_K$  в короткозамкнутой секции может быть определена путём геометрического сложения:

$$e_K \approx \sqrt{e_R^2 + e_B^2}.$$

Изменение тока в секциях при коммутации оказывает влияние на индуктивное сопротивление обмотки ротора. Согласно исследованиям для учета этого влияния индуктивное сопротивление  $x_{2K}$ , рассчитанное обычным способом для частоты  $f_1$  и  $s = 1$ , поскольку в цепи ротора между щётками всегда протекают токи этой частоты и коммутация при  $s = 1$  не имеет места, следует умножить на поправочный коэффициент, который можно принять равным  $(1 - 0,7\omega_2/\omega_1) = 0,3 + 0,7s$  [1, с. 166].

Таким образом, индуктивное сопротивление  $x_2$  фазы коллекторного ротора может быть принято равным:

$$x_2 \approx x_{2K}(0,3 + 0,7s) = 0,3x_{2K} + 0,7sx_{2K} = x_{20} + sx_{2v}, \quad (12.23)$$



где  $0,3x_{2к} = x_{20}$ ,  $0,7x_{2к} = x_{2v}$ .

Как видно из этого равенства, при *вращении ротора в направлении поля* ( $s < 1$ ) *токи коммутации уменьшают индуктивное сопротивление ротора, а при вращении его против поля* ( $s > 1$ ) – *увеличивают это сопротивление.*

Рассмотрим, в какой мере коммутация тока лимитирует мощность трёх-фазных коллекторных машин.

Мощность, передаваемая от статора к ротору машины, равна:

$$P_{12} = 3E_2I_2 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (12.24)$$

где

$$E_2 = 4,44f_1w_2\Phi k_{w2},$$

причем предполагается, что  $\underline{E}_2$  и  $\underline{I}_2$  практически совпадают по фазе.

Выразим ток  $I_2$  через линейную нагрузку ротора  $A$  А/см (термин 78, с. 26):

$$I_2 = \pi DA/3 \cdot 2w_2, \quad (12.25)$$

где  $D$  – диаметр ротора, см.

Предположим, что ротор неподвижен. Это соответствует тяжелым условиям коммутации, так как ЭДС вращения получается большой. При  $s = 1$ ,  $e_R = 0$  и если короткозамкнутая секция имеет один виток, то

$$e_k = e_v = 4,44f_1\Phi. \quad (12.26)$$

Окружная скорость ротора равна:

$$v = \pi Dn/6000, \text{ м/с.}$$

Из равенств (12.24) – (12.26), принимая во внимание, что нормально двигатель работает при скоростях вращения, близких к синхронной, и что  $f_1 = pn/60$ , находим:

$$P_{12}/p = k_{w2}Ae_kv/20f_1, \text{ кВт}. \quad (12.27)$$

Примем следующие предельные значения, установленные практикой:

$$A \approx 400 \text{ А/см}; v \approx 70 \text{ м/с.}$$

Обмоточный коэффициент из [4, с. 79, сл.] равен:

$$k_{p2} = \frac{\sin \frac{\epsilon}{2}}{\frac{\epsilon}{2}} = \frac{\sin \frac{2\pi}{3 \cdot 2}}{\frac{2\pi}{3 \cdot 2}} = 0,827.$$

Подставив эти значения в (12.27), получим при  $f_1 = 50$  Гц:

$$P_{12}/p \approx 23e_k, \text{ кВт.}$$

Это равенство показывает, в какой мере допустимое значение  $e_k$  (при неподвижном роторе) лимитирует предельно возможную мощность трёхфазной коллекторной машины, приходящуюся на пару полюсов. Если допустить предельное  $e_k=3 \text{ В}$ , то

$$P_{12}/p \approx 70 \text{ кВт.}$$

Следовательно, трёхфазные коллекторные машины при  $f_1 = 50 \text{ Гц}$ , могут быть построены на сравнительно небольшие предельные мощности.

В двигателях средней мощности мощность на пару полюсов обычно не превосходит 20 – 30 кВт.

#### 12.4. Трёхфазные коллекторные машины с параллельным соединением цепей статора и ротора (двигатель Шраге – Рихтера)

Трёхфазные коллекторные машины, у которых цепь ротора для введения в нее дополнительной ЭДС включается параллельно с цепью статора, носят название коллекторных машин с параллельным возбуждением или шунтовых коллекторных машин.

Так как коллектор рассчитывается обычно на напряжение, более низкое, чем напряжение статора, то коллектор присоединяется к сети через понижающий трансформатор или автотрансформатор.

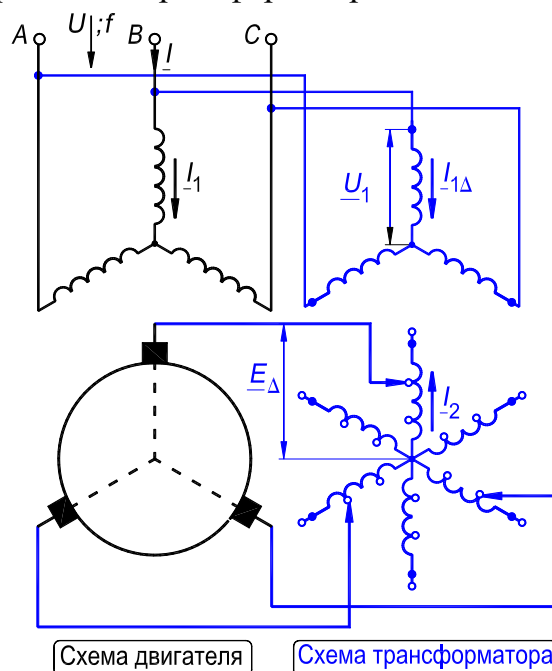


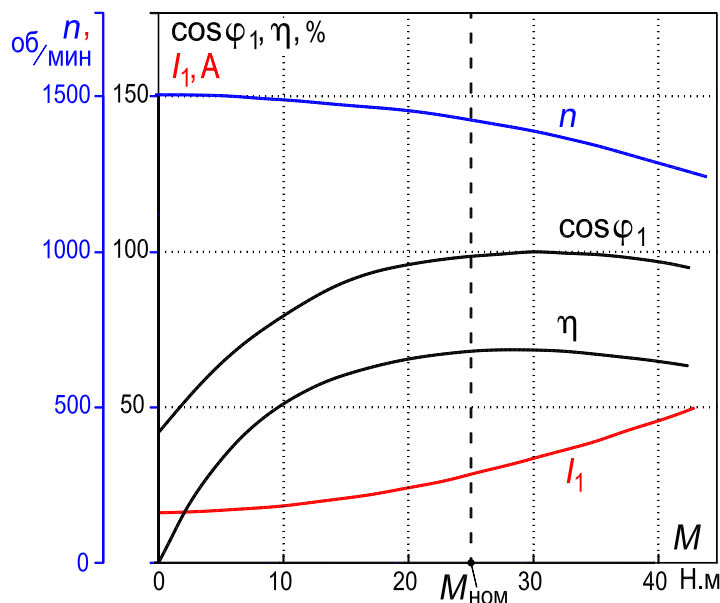
Рис. 12.10. Схема трёхфазного коллекторного двигателя с параллельным возбуждением

На рис. 12.10 показана принципиальная схема трёхфазной коллекторной машины с параллельным возбуждением и питанием цепи ротора через регулируемый трансформатор. В схеме амплитуда ЭДС  $E_{\Delta}$  регулируется изменением коэффициента трансформации трансформатора, а фаза – сдвигом щёток (разд. 12.2, с. 225, сл.).

В некоторых случаях трансформатор объединяют с обмоткой статора, причем трансформаторная связь заменяется иногда автотрансформаторной, допускающей одновременное изменение амплитуды и фазы ЭДС  $E_{\Delta}$  [1].

Если первичная обмотка располагается на роторе, то такие машины называют машинами, питаемыми со стороны ротора.

На рис. 12.11 приведены опытные характеристики трёхфазного двигателя с параллельным возбуждением с номинальной мощностью 3,7 кВт, 110 В,  $f_1 = 50$  Гц,  $2p = 4$ .

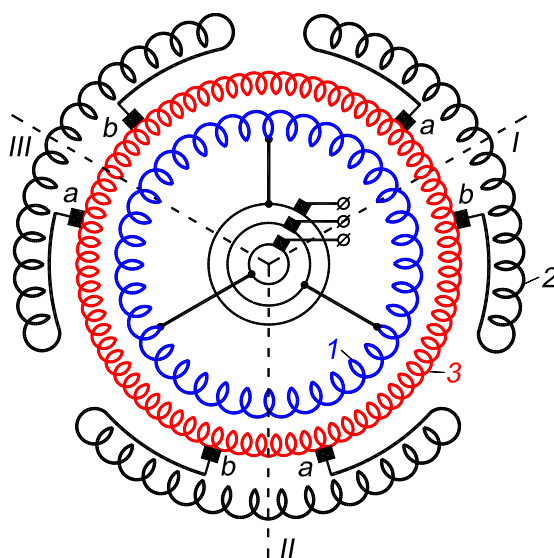


**Рис. 12.11. Рабочие характеристики трёхфазного коллекторного двигателя с параллельным возбуждением**

Теория трёхфазной шунтовой коллекторной машины может быть полностью сведена к теории асинхронной машины с дополнительной ЭДС  $E_{\Delta}$  в цепи ротора (разд. 12.1, с. 219, сл.).

Среди различных типов коллекторных двигателей с параллельным возбуждением особенно широкое распространение получил двигатель Шраге – Рихтера с питанием со стороны ротора. Схема этого двигателя представлена на рис. 12.12. Первичная обмотка  $I$  располагается на роторе и присоединяется

к сети через три контактных кольца. В верхней части тех же пазов ротора размещается вспомогательная обмотка 3, присоединенная к коллектору (на рис. 12.12 не показан). Вторичная обмотка 2 располагается на статоре. Концы каждой фазы статора присоединяются к двум системам щеток, установленных на коллекторе. С помощью вспомогательной коллекторной обмотки 3 во вторичную цепь 2 двигателя вводится дополнительная регулирующая ЭДС  $\underline{E}_\Delta$ .



**Рис. 12.12. Схема двигателя Шраге – Рихтера;**  
двигатель этого типа был предложен в 1910 г. независимо друг от друга  
инж. Г. Шраге и проф. Р. Рихтером

Если щётки каждой фазы симметрично раздвигать в обе стороны от осей *I*, *II*, *III*, то во вторичную цепь будет вводиться ЭДС  $\underline{E}_\Delta$ , находящаяся в противофазе или фазе с ЭДС  $s\underline{E}_2$  вторичной обмотки. Значение ЭДС  $E_\Delta$  определяется при этом углом раздвижения щеток. Как видно из рис. 12.13,а, при сдвиге щётки *a* влево от оси *I*, а щётки *b* – на тот же угол вправо, ЭДС  $E_\Delta$  и  $sE_2$  действуют в контуре вторичной обмотки навстречу друг другу, что соответствует снижению скорости вращения ротора. Если считать, что при холостом ходе и  $E_\Delta \approx 0$ , и  $s_1 \approx 0$ , то согласно (12.3) при холостом ходе и  $E_\Delta \neq 0$  скольжение будет равно  $s_2 = \mp E_\Delta / E_2 = \mp E'_\Delta / E_1$ . Для получения отрицательных скольжений, т. е. для работы при скоростях вращения выше синхронной, необходимо щётку *a* передвигать вправо, а щётку *b* – влево от оси *I* (рис. 12.13,б). В этом случае в контуре вторичной обмотки ЭДС  $E_\Delta$  и  $sE_2$  будут действовать вначале при  $s > 0$  согласно, а затем навстречу друг другу, потому что ЭДС  $sE_2$

при  $s < 0$  изменяет свое направление. Таким образом, в двигателе Шраге – Рихтера регулирование скорости вращения осуществляется двусторонним симметричным раздвижением щеток относительно осей I, II, III.

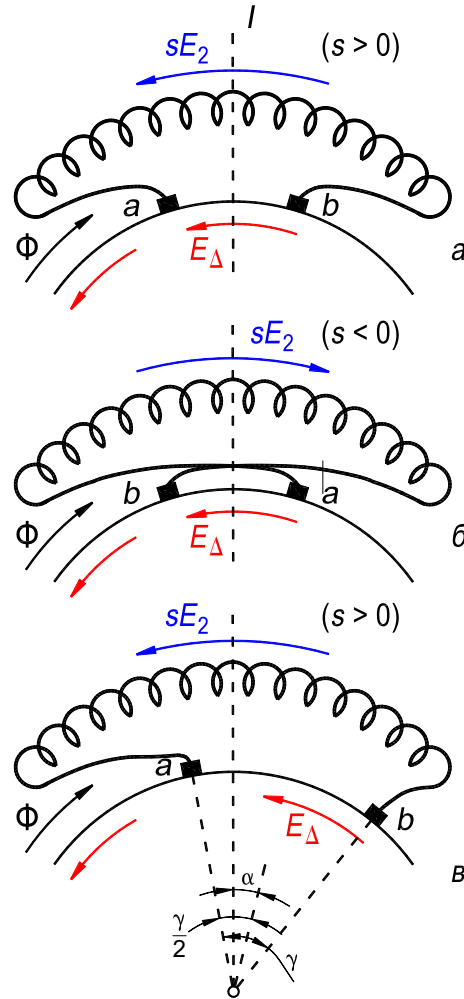


Рис. 12.13. Различные случаи расположения щеток на коллекторе двигателя Шраге – Рихтера и регулирование скорости вращения

На рис. 12.14 представлены пространственные диаграммы МДС для трёх случаев расположения щеток на коллекторе двигателя Шраге – Рихтера:  $a$  – МДС обмотки статора  $\bar{F}_{22}$  и вспомогательной обмотки ротора  $\bar{F}_{23}$  направлены навстречу друг другу;  $б$  – они действуют согласнo;  $в$  – МДС  $\bar{F}_{23}$  отстает от МДС  $-\bar{F}_{22}$  на угол  $\alpha$ , что соответствует рис. 12.13,в. Результирующая вторичная МДС  $\bar{F}_2$  представляет собой геометрическую сумму МДС  $\bar{F}_{22}$  и  $\bar{F}_{23}$ . Следовательно,  $\bar{F}_0 = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 = \bar{F}_1 + \bar{F}_{22} + \bar{F}_{23}$ .

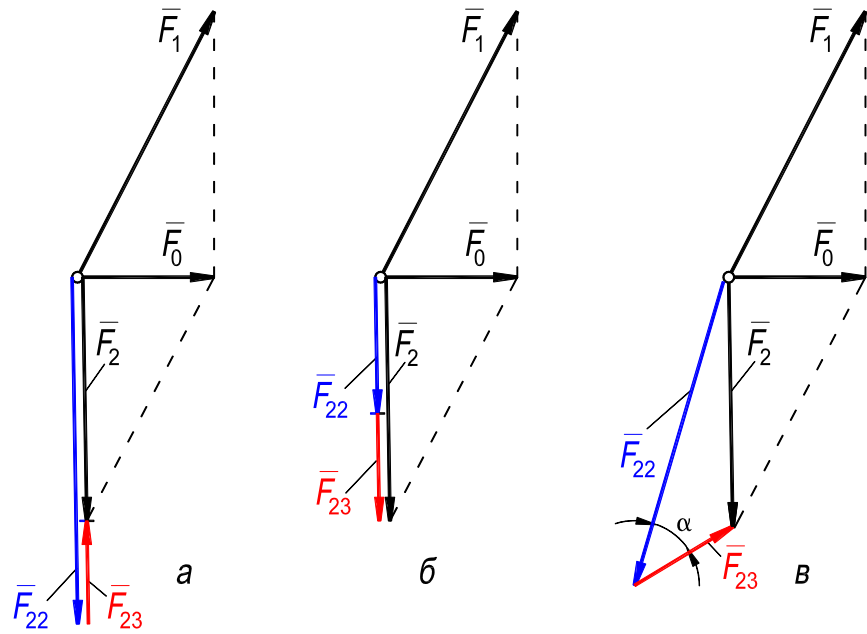


Рис. 12.14. Пространственные векторные диаграммы МДС обмоток ротора и статора двигателя Шраге – Рихтера для трёх случаев расположения щеток на коллекторе

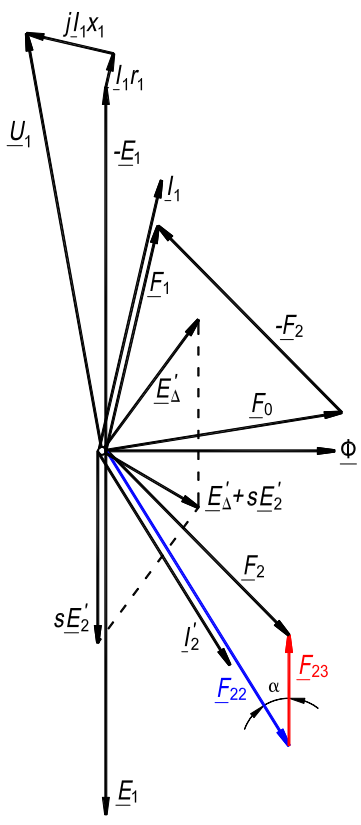
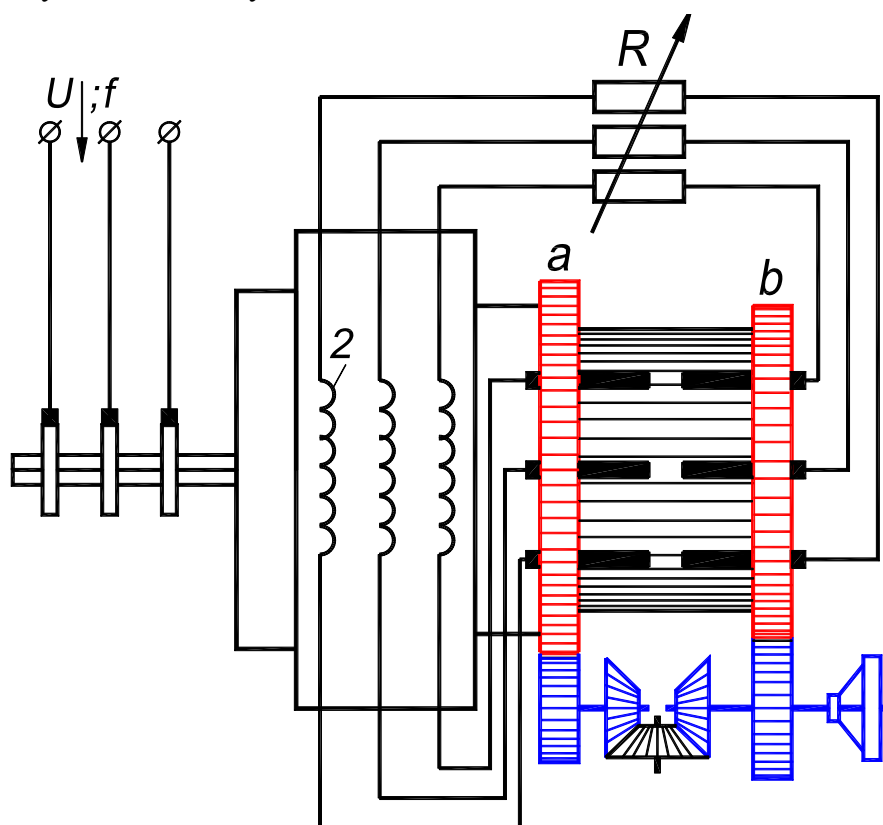


Рис. 12.15. Векторная диаграмма двигателя Шраге – Рихтера

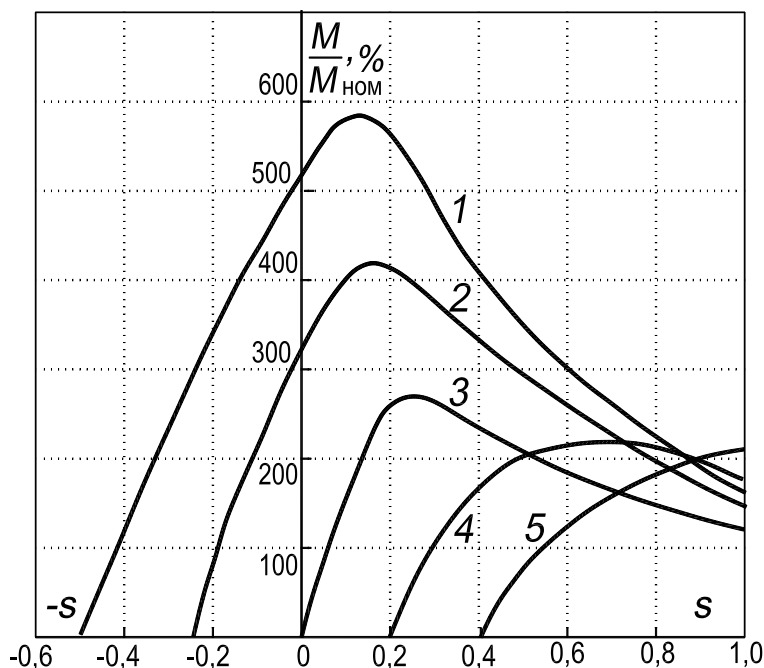
Так как взаимному расположению векторов МДС в пространственной диаграмме соответствует такое же расположение их во временной диаграмме, то последняя для двигателя Шраге – Рихтера имеет вид, представленный на рис. 12.15. Эта диаграмма соответствует случаю, изображенному на рис. 12.14,в. Как видно из диаграммы, вектор МДС  $E_2$  в общем случае может не совпадать по фазе с вектором тока  $I_2$ . В остальном диаграмма не требует особых пояснений.

На рис. 12.16, схематически изображающем двигатель Шраге – Рихтера, показан один из возможных способов передвижения щеток. При разном передаточном числе на зубчатых зацеплениях щеточных траверс  $a$  и  $b$  раздвижение щеток сопровождается односторонним сдвигом их относительно осей  $I, II, III$  (см. рис. 12.12), что обеспечивает одновременное регулирование скорости вращения двигателя и изменение коэффициента мощности. Реостат  $R$  предназначен для уменьшения пускового тока.



**Рис. 12.16.** Схема устройства для передвижения щеток в двигателе Шраге – Рихтера; обмотка 2 расположена на статоре, см. рис. 12.18 и 12.19

На рис. 12.17 показаны кривые момента вращения в функции скольжения при различных значениях отношения  $E'_\Delta/E_1$  для двигателя 40 кВт. Пределы регулирования скорости вращения этого двигателя 2,5...1.



**Рис. 12.17.** Характеристики момента вращения в функции скольжения двигателя Шраге – Рихтера при различных значениях отношения  $E'_\Delta/E_1$ :  $-0,5$  (кривая 1),  $-0,25$  (кривая 2),  $0$  (кривая 3),  $0,2$  (кривая 4),  $0,4$  (кривая 5)

Коммутация двигателей, питаемых со стороны ротора, имеет некоторые особенности. В этих двигателях поле вращается относительно коллекторной обмотки с постоянной скоростью, поэтому ЭДС вращения  $e_v$  в коммутируемых секциях не зависит от скорости вращения ротора и не уменьшается при приближении к синхронизму. В этом отношении двигатели, питаемые со стороны ротора, уступают двигателям, питаемым со стороны статора. Реактивная ЭДС  $e_R$  в коммутируемых секциях в двигателях, питаемых со стороны ротора, обычно бывает более низкой, так как линейная нагрузка коллекторной обмотки в таких двигателях меньше.

Двигатели Шраге – Рихтера используются главным образом для нереверсивного электропривода, так как при реверсах мощность двигателя необходимо снижать по условиям коммутации.

Двигатели Шраге – Рихтера находят применение в текстильной, бумажной, полиграфической, сахарной и цементной промышленности в нереверсивных электроприводах с широким и плавным регулированием скорости вращения в пределах 3:1 – 4:1. В некоторых случаях пределы регулирования скорости вращения при холостом ходе и нагрузке доходят до 50 : 1.

Эти двигатели применяются главным образом в зарубежной технике.



## 12.5. Трёхфазные коллекторные машины с последовательным соединением цепей статора и ротора

Трёхфазные коллекторные машины, у которых цепь ротора включается последовательно с цепью статора, носят название машин с последовательным возбуждением или серийных машин. Так как по условиям коммутации коллектор трёхфазного последовательного двигателя рассчитывается на напряжение не более 70...80 В, то цепь ротора двигателя обычно питается через понижающий трансформатор.

Если напряжение сети выше 500 В, то обычно применяют схему, показанную на рис. 12.18. В этом случае к цепи статора и ротора подводится пониженное напряжение, причем понижающий трансформатор рассчитывается на полную мощность машины.

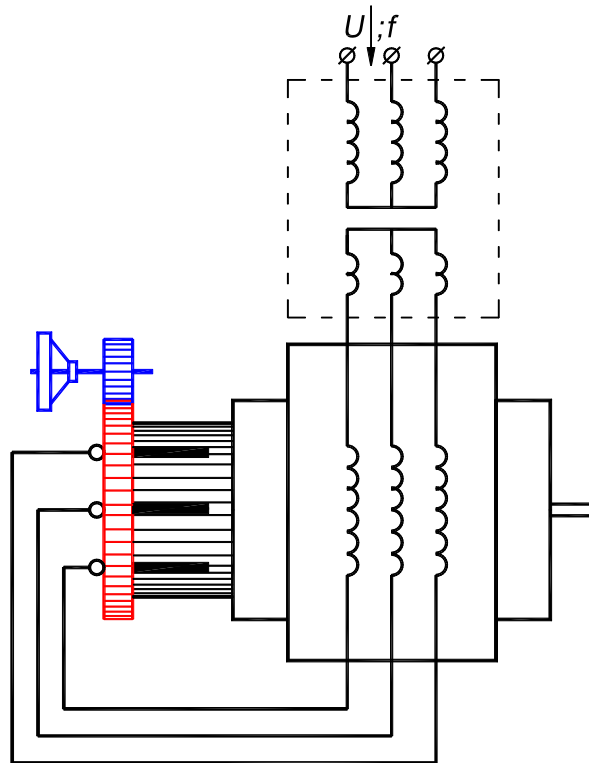
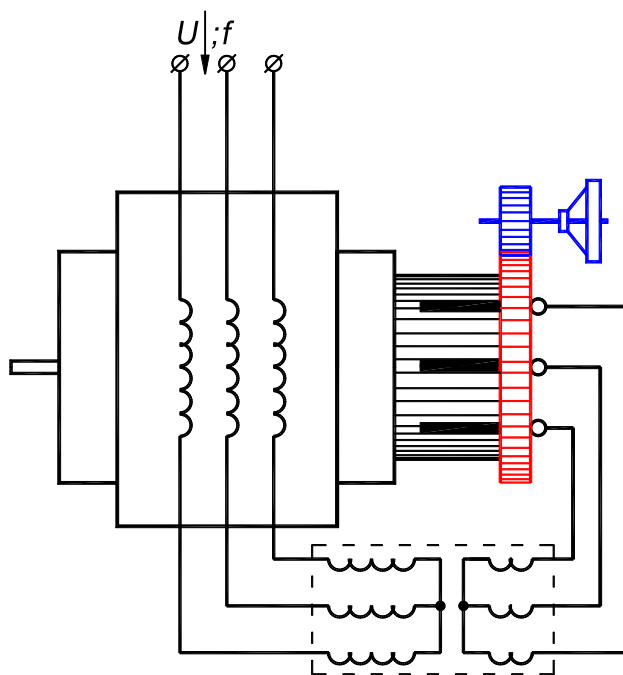


Рис. 12.18. Схема включения коллекторного двигателя последовательного возбуждения с понижением напряжения на обмотках статора и ротора

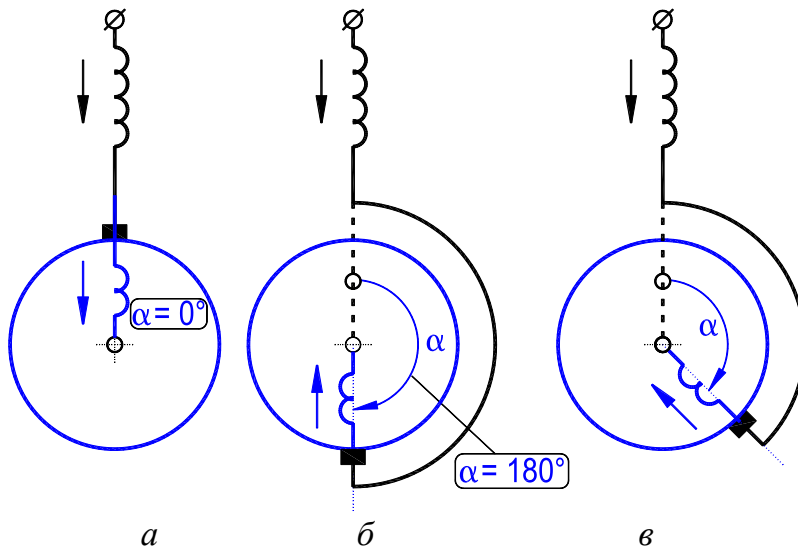
При напряжениях сети 500 – 220 В применяют схему, приведенную на рис. 12.19. В этом случае пониженное напряжение подводится только к цепи ротора, а трансформатор рассчитывается на мощность, которая дополнительно передается ротору или отдается им при регулировании скорости вращения двигателя (разд. 12.1, с. 219,сл.).



**Рис. 12.19.** Схема включения коллекторного двигателя последовательного возбуждения с понижением напряжения на обмотке ротора

Как и во всяком регулируемом трёхфазном асинхронном двигателе, в трёхфазном коллекторном двигателе последовательного возбуждения электрическая мощность, поглощаемая статором из сети, за вычетом потерь в статоре передается вращающимся магнитным полем ротору. Часть этой мощности, пропорциональная  $(1 - s)$ , превращается в механическую мощность на валу двигателя, а оставшаяся часть, пропорциональная скольжению  $s$ , за вычетом электрических потерь в роторе отдается через трансформатор в сеть. При скоростях выше синхронной скольжение  $s < 0$  и  $1 - s > 1$ . Следовательно, механическая мощность на валу в этом случае больше мощности, передаваемой ротору вращающимся магнитным полем. Недостающая часть мощности, пропорциональная  $s$ , передается ротору из сети через трансформатор.

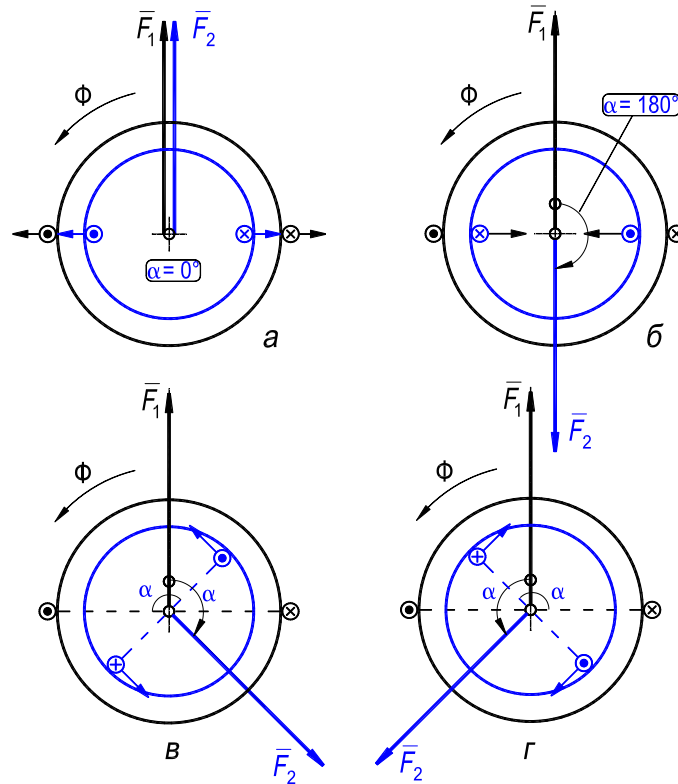
*Регулирование скорости вращения в трёхфазных двигателях последовательного возбуждения можно осуществлять или изменением подводимого к статору напряжения, или сдвигом щеток на коллекторе.* На практике применяется главным образом второй способ регулирования, так как при нём отпадает необходимость применения более дорогого трансформатора с регулируемым напряжением. Если щётки на коллекторе установить так, чтобы оси соответствующих фаз обмоток статора и ротора совпадали и чтобы их МДС были направлены согласно (рис. 12.20,а), то машина будет представлять собой трёхфазную реактивную катушку [4, с. 289, сл.]. Момент вращения ротора будет равен нулю.



**Рис. 12.20.** Различное взаимное расположение осей обмоток статора и ротора; обмотка ротора, соединенная треугольником, заменена на рисунке для большей наглядности эквивалентной звездой

Если щётки сдвинуть на  $180^\circ$  (рис. 12.20,б), то оси соответствующих фаз статора и ротора снова совпадут, но МДС будут действовать навстречу. При таком расположении щеток машина будет уподобляться короткозамкнутому трансформатору. Момент вращения, развиваемый ротором, в этом случае также равен нулю. Для того чтобы момент стал больше нуля и ротор пришел во вращение, необходимо сдвинуть щётки на угол  $\alpha$ , лежащий в пределах  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$  (рис. 12.20,в). Рисунок 12.21 поясняет это. На этом рисунке для большей наглядности принято, что МДС  $\bar{F}_1$  статора и  $\bar{F}_2$  ротора создаются в рассматриваемый момент времени одним витком. При  $\alpha = 0^\circ$  (рис. 12.21,а) и  $\alpha = 180^\circ$  (рис. 12.21,б) силы взаимодействия токов статора и ротора направлены радиально и не создают момента вращения. При сдвиге щеток на угол  $\alpha < 180^\circ$  возникает момент, вращающий ротор в направлении, противоположном сдвигу щеток. Следовательно, ротор двигателя последовательного возбуждения может вращаться как в направлении вращения поля (рис. 12.21,в), так и против него (рис. 12.21,г). Обычно щётки сдвигают против направления вращения магнитного поля. В этом случае ротор вращается по полю, частота перемагничивания его получается небольшой и ЭДС вращения в коммутируемых секциях не выходит за допустимые пределы.

Пуск в ход двигателя осуществляется постепенным сдвигом щеток из положения, при котором  $\alpha = 0^\circ$ , или путём постепенного повышения напряжения при сдвинутых щётках.



**Рис. 12.21. Зависимость направления вращения ротора от направления сдвига щеток**

Трёхфазный двигатель последовательного возбуждения имеет сравнительно ограниченное распространение и применяется главным образом в тех приводах, в которых момент сопротивления резко изменяется с изменением скорости вращения (вентиляторы, центробежные насосы и т. п.).

Пределы регулирования могут быть большими и достигать до 1 : 4. Верхний предел ограничивается условиями коммутации и обычно не превышает синхронную скорость более чем на 20 – 30 %. Нижний предел ограничивается охлаждением.

## 13. Однофазные коллекторные машины

### 13.1. Применение, устройство и основные определения

Однофазные коллекторные машины получили довольно широкое распространение в качестве двигателей, благодаря их ценному свойству – возможности плавного и экономичного регулирования скорости вращения. Они используются для бытового электропривода и для целей электрической тяги. Условия коммутации ограничивают возможность построения однофазных коллекторных двигателей значительной мощности при промышленной частоте 50 – 60 Гц. Поэтому электрифицированные железные дороги, работающие на однофазном токе (США, ФРГ, Швейцария, Швеция и др.), имеют частоту 25 или  $16^{2/3}$  Гц.

При пониженной частоте процесс коммутации протекает лучше. Мощность тяговых однофазных коллекторных двигателей достигает до 2500 кВт.

С однофазными тяговыми двигателями конкурируют тяговые двигатели постоянного тока, питаемые от контактной сети переменного тока 50 Гц через полупроводниковые вентильные выпрямители (термин 6, с. 17).

Для промышленных и бытовых целей и в установках связи применяются однофазные коллекторные двигатели, главным образом малой мощности. Частота их тока 50 – 60 Гц. Наибольшее распространение имеют однофазные двигатели последовательного возбуждения. Цепи статора и ротора этих двигателей или соединены электрически последовательно, или имеют только трансформаторную связь. Двигатели с другими системами возбуждения почти не применяются.

Однофазный двигатель с последовательным электрическим соединением обмоток статора и ротора имеет конструкцию, близкую к конструкции двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Первое появление однофазных коллекторных двигателей последовательного возбуждения относится к середине 80-х годов XIX столетия. Статор целиком набирается из листовой электротехнической стали и обычно имеет неявнополюсную систему с дополнительными (коммутационными) полюсами (рис. 13.1). На главных полюсах размещается обмотка возбуждения, в пазах полюсов – компенсационная обмотка. Ротор имеет двухслойную обмотку, обычно петлевою с диаметральным шагом, выведенную на коллектор. Напряжение на щётках коллектора ограничивается условиями коммутации. При частоте 50 Гц оно имеет порядок 100 В,

при 25 Гц – 300 В и при  $16^{2/3}$  Гц – 500 В. По этой причине в тяговых установках, имеющих напряжение между троллейным проводом и землей 11 – 16 кВ, двигатели присоединяются к сети через понижающий трансформатор.

Индукционные однофазные коллекторные двигатели имеют на статоре неявнополюсную магнитную систему. Поскольку обмотка статора не связана с ротором, напряжение её ограничивается лишь условиями изоляции обмотки. Такие двигатели применяются главным образом в промышленных и бытовых установках и предназначаются для непосредственного присоединения к сети.

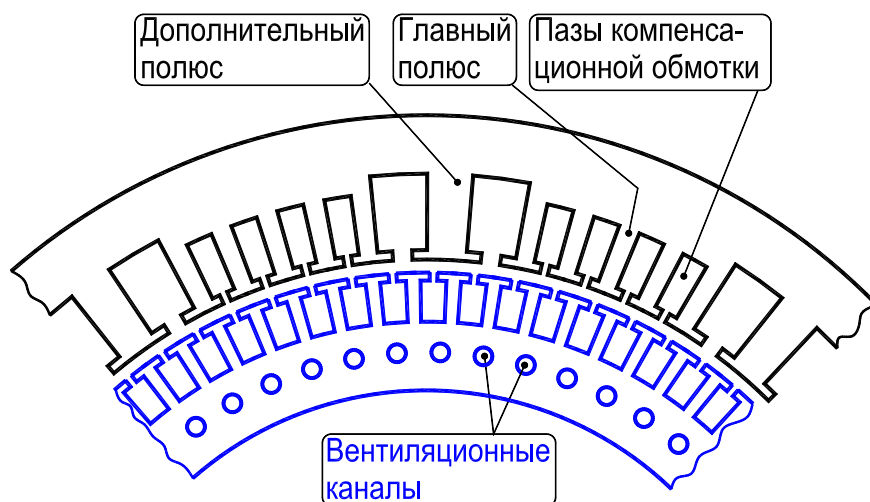


Рис. 13.1. Магнитная система (два полюсных деления) однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения

Рассмотрим некоторые общие свойства однофазных коллекторных двигателей, которыми обладают роторы этих двигателей, находящиеся в переменном магнитном поле.

### 13.2. Электродвижущие силы, наводимые в обмотке ротора однофазного коллекторного двигателя

Рассмотрим ротор (якорь) с коллекторной обмоткой, находящийся в пульсирующем магнитном поле, создаваемом переменным током, проходящим по обмотке статора однофазного двигателя.

Предположим, что ротор вращается с постоянной скоростью  $n$ , об/мин, и щётки расположены в геометрической нейтрали (рис. 13.2). Электродвижущая сила на щётках коллектора не будет в этом случае постоянной, как в машине постоянного тока. Она будет пульсировать в фазе с магнитным потоком

и с той же частотой. Её амплитуда может быть определена по формуле (4.11), с. 59, выведенной для машин постоянного тока:

$$E_{\text{вм}} = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \Phi_m = 4f_{\text{в}} w \Phi_m, \quad (13.1)$$

где  $f_{\text{в}} = pn/60$  – частота вращения, не зависящая от частоты пульсации магнитного потока;  $w = N/2 \cdot 2a$  – число последовательно соединённых витков в параллельной цепи обмотки;  $\Phi_m$  — амплитудное значение магнитного потока.

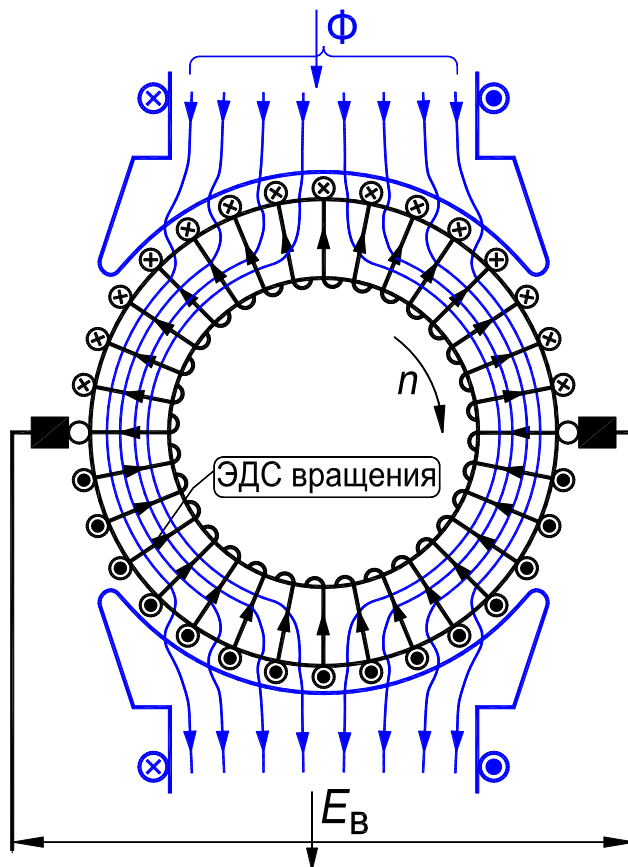


Рис. 13.2. Образование в обмотке якоря ЭДС вращения

Действующее значение ЭДС на щётках будет равно:

$$E_{\text{в}} = \frac{E_{\text{вм}}}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2}f_{\text{в}} w \Phi_m. \quad (13.2)$$

Эту ЭДС называют ЭДС вращения, так как её значение при заданном магнитном потоке зависит только от скорости вращения ротора и не зависит от частоты  $f$  пульсаций магнитного потока.

При изменении направления вращения ротора фаза ЭДС вращения изменяет свой знак.

Допустим теперь, что щётки на том же коллекторе расположены по оси магнитного поля (рис. 13.3). Амплитуда ЭДС вращения, как известно, в этом случае будет равна нулю ( $E_{вм} = 0$ ), однако ЭДС на щётках не будет равна нулю. Объясняется это тем, что в заключенных между щётками витках обмотки, образующих в данном случае как бы вторичную обмотку трансформатора, будет наводиться ЭДС, равная:

$$E_T = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_w f w \Phi_m, \quad (13.3)$$

где  $k_w$  – обмоточный коэффициент, учитывающий, что не все витки обмотки сцеплены с полным потоком  $\Phi_m$ . При синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре  $k_w = 2/\pi$ , поэтому

$$E_T = 2\sqrt{2} f \Phi_m. \quad (13.4)$$

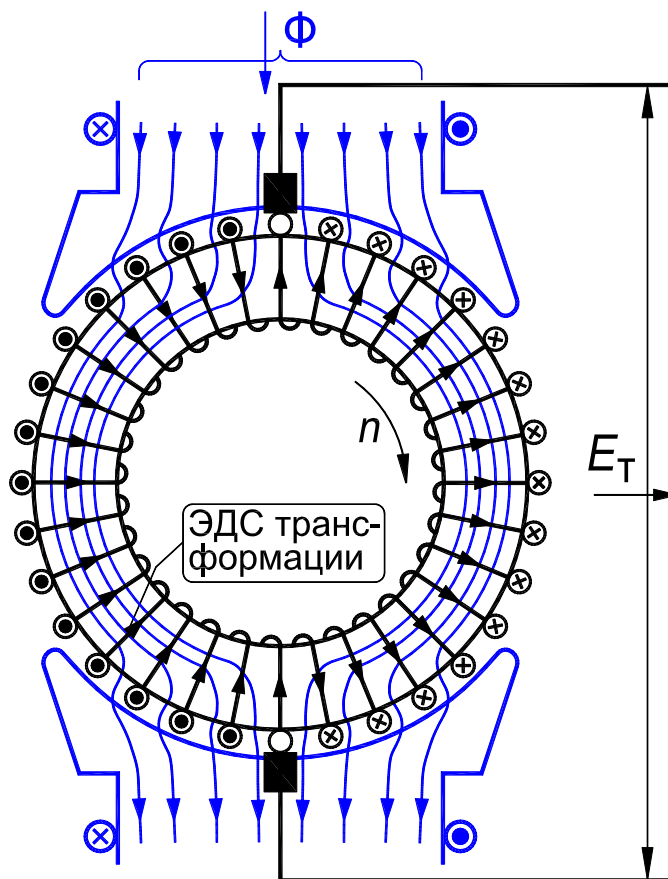


Рис. 13.3. Образование в обмотке якоря ЭДС трансформации

Эту ЭДС называют ЭДС трансформации, так как она обусловлена только трансформаторной связью между обмотками статора и ротора и не зависит от скорости вращения якоря.



Электродвижущая сила трансформации отстает по фазе от магнитного потока на угол  $\pi/2$ .

Из формул (13.2) и (13.4) следует, что

$$\frac{E_B}{E_T} = \frac{f_B}{f}. \quad (13.5)$$

Из сопоставления рис. 13.2 и 13.3 видно, что при расположении щеток на геометрической нейтрали ЭДС вращения во всех витках, последовательно включенных между щётками, направлены одинаково и суммируются. В противоположность этому при том же расположении щеток ЭДС трансформации в тех же витках в сумме равна нулю.

При расположении щеток по оси полюсов (рис. 13.3) имеют место обратные соотношения: ЭДС трансформации во всех витках между щётками направлены одинаково, а ЭДС вращения в сумме равны нулю.

Предположим, что в общем случае щётки сдвинуты относительно нейтрали на угол  $\alpha$  (рис. 13.4). Тогда магнитное поле и МДС статора можно разложить по двум направлениям: по линии щеток будет действовать МДС  $F_q = F_1 \sin \alpha$ , а перпендикулярно ей – МДС  $F_d = F_1 \cos \alpha$ .

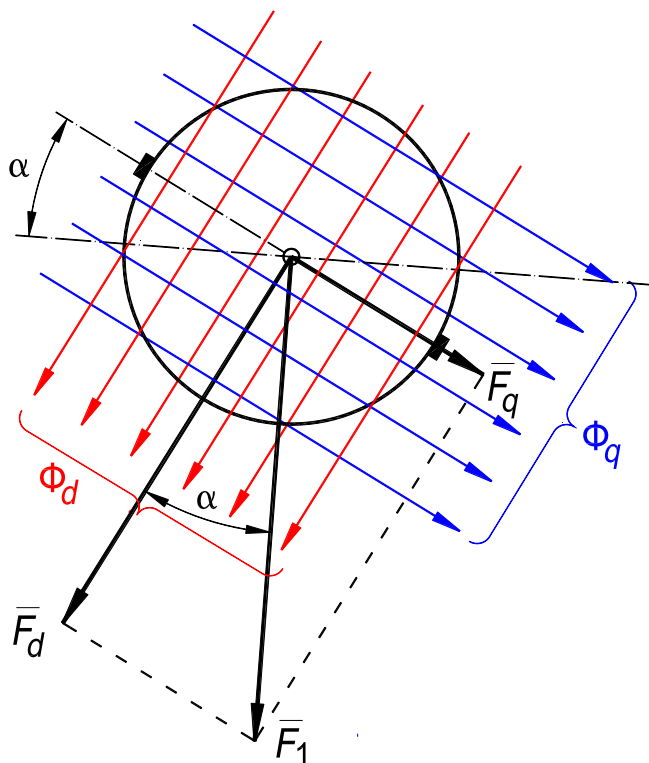


Рис. 13.4. Пространственное разложение МДС и магнитного потока на продольные и поперечные составляющие

Магнитодвижущая сила  $F_d$  создает в воздушном зазоре поток  $\Phi_d$ , который наведет на щётках только ЭДС вращения

$$E_B = 2\sqrt{2}f_B w \Phi_{md}. \quad (13.6)$$

Магнитодвижущая сила  $F_q$  создает соответственно поток  $\Phi_q$ , который наведет на щётках только ЭДС трансформации

$$E_T = 2\sqrt{2}f w \Phi_{mq}. \quad (13.7)$$

Обе ЭДС имеют одинаковую частоту  $f$  и сдвинуты между собой на угол  $\pi/2$  (рис. 13.5). Результирующая ЭДС на щётках будет поэтому равна:

$$E = \sqrt{E_B^2 + E_T^2}. \quad (13.8)$$

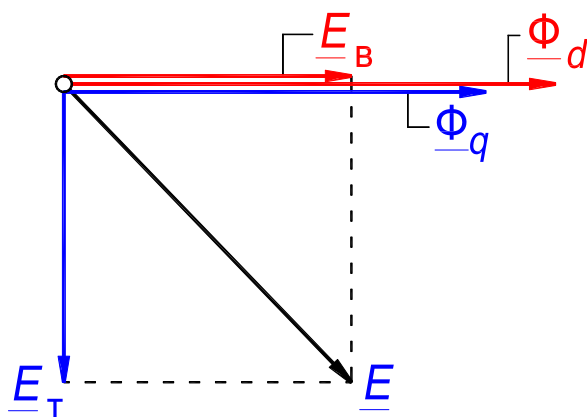


Рис. 13.5. Векторная диаграмма магнитных потоков и ЭДС

Отметим, что в векторной диаграмме ЭДС вращения  $E_B$  может или совпадать, или находиться в противофазе с вектором  $\Phi_d$  магнитного потока в зависимости от выбора положительного направления вращения ротора (см. разд. 13.4, с. 252, сл.).

### 13.3. Вращающий момент, действующий на ротор однофазного коллекторного двигателя

Если по обмотке ротора, находящегося в пульсирующем магнитном поле, проходит переменный ток, то в результате взаимодействия тока с полем образуется момент вращения.

Предположим, что ток ротора  $I_1$  сдвинут по фазе относительно потока  $\Phi$  на угол  $\beta$  (рис. 13.6) и что щётки расположены в геометрической нейтрали.

Из теории машин постоянного тока известно, что при токе якоря и магнитном потоке  $\Phi$  момент вращения равен (см. разд. 4.8, с. 64):

$$M = \frac{E_1 I_1}{\omega} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} N I_1 \Phi, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

В рассматриваемом случае ток  $I_1 = I_{1m} \sin \omega t$  и магнитный поток  $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \beta)$ , поэтому, учитывая, что

$$\sin \omega t \sin(\omega t - \beta) = \frac{1}{2} [\cos \beta - \cos(2\omega t - \beta)],$$

получим:

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{p}{a} N I_{1m} \Phi_m \cos \beta - \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{p}{a} N I_{1m} \Phi_m \cos(2\omega t - \beta) = \\ &= M_{\text{ср}} + M_{\text{пер}}. \end{aligned} \quad (13.9)$$

Из этого равенства следует, что *момент вращения, действующий на ротор однофазной коллекторной машины, изменяется во времени с двойной частотой* (рис. 13.7).

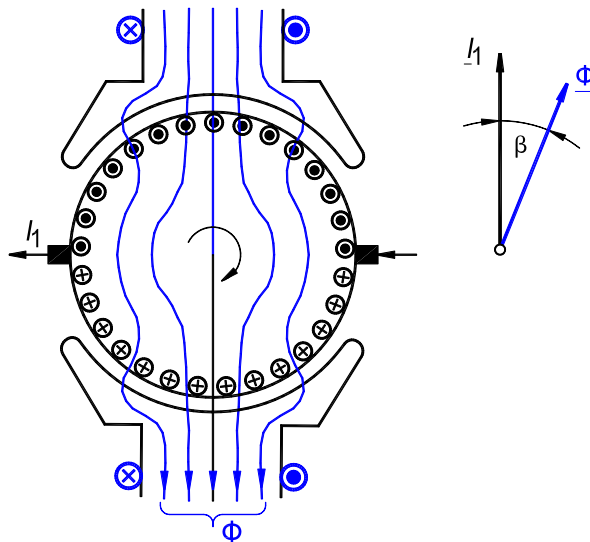


Рис. 13.6. Образование момента вращения в однофазном двигателе

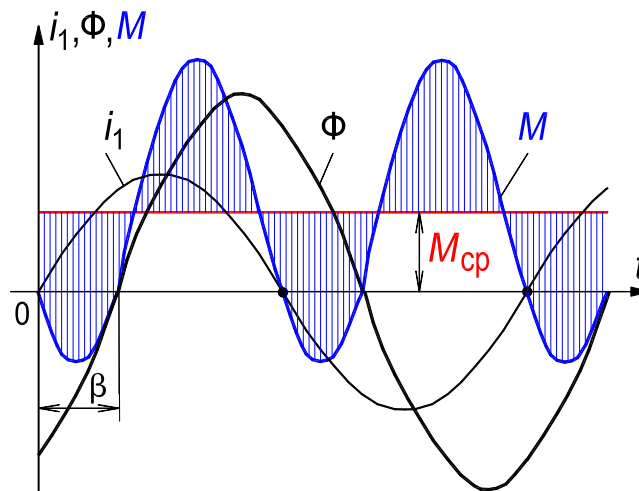


Рис. 13.7. Мгновенное и среднее значения момента вращения однофазного двигателя

Среднее значение момента вращения, определяющее механическую работу ротора, равно:

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{p}{a} N I_{1m} \Phi_m \cos \beta, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (13.10)$$

Наиболее благоприятные условия возникают при  $\beta = 0$ ; при  $\beta = \pi/2$  момент  $M_{\text{ср}} = 0$ .

Направление момента вращения определяется правилом *левой* руки (рис. 13.6 и рис. 4.1,б, с. 38), причем учитывается только составляющая тока  $I_1 \cos \beta$ , совпадающая по фазе с магнитным потоком  $\Phi$ .

На средний постоянный момент вращения  $M_{\text{ср}}$  накладывается переменный момент

$$M_{\text{пер}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{p}{a} N I_{1m} \Phi_m \cos(2\omega t - \beta). \quad (13.11)$$

Теоретически этот момент должен создавать неравномерность вращения ротора, однако практически с этим не приходится считаться, так как за время одного полупериода изменения момента ротор вследствие инерции не успевает заметно ускорить или замедлить свое вращение.

Выражение (13.10) может быть преобразовано, если учесть, что согласно (13.5)

$$\frac{p}{a} N \Phi_m = \frac{\sqrt{2} \cdot 60 E_B}{n}.$$

Подставив это значение в (13.10) и полагая  $I_{1m} = \sqrt{2} I_1$ , получим:

$$M_{\text{ср}} = \frac{E_B I_1 \cos \beta}{\frac{2\pi n}{60}}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (13.12)$$

Электродвижущая сила вращения  $E_B$  совпадает по фазе с потоком  $\Phi$ , поэтому угол  $\beta$  является углом сдвига фаз между векторами  $\underline{I}_1$  и  $\underline{E}_B$ .

Мощность  $P_B = E_B I_1 \cos \beta$  называется электромагнитной мощностью вращения.

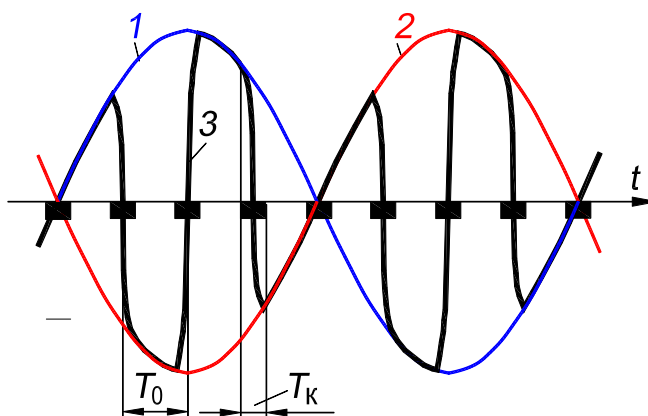
Из формулы (13.12) следует, что *момент вращения однофазной коллекторной машины равен электромагнитной мощности вращения, деленной на угловую скорость ротора.*

В случае сдвига щеток с геометрической нейтрали на угол  $\alpha$  (рис. 13.4) момент вращения образуется только за счет составляющей магнитного поля,

создаваемой МДС  $F_d = F_1 \cos \alpha$ . Поэтому при расчёте  $M_{ср}$  в (13.10) вместо  $\Phi_m$  следует подставлять  $\Phi_{md}$ , а в (13.12) – значение  $E_B$ , определенное по (13.6).

### 13.4. Коммутация тока в обмотке однофазного ротора

Процесс коммутации тока в однофазной коллекторной машине оказывает на её работу столь же большое лимитирующее влияние, как и в трёхфазной машине.



**Рис. 13.8.** Изменение тока в коммутируемой секции однофазного коллекторного двигателя

Во время коммутации ток в секции обмотки ротора меняет свое направление, так как секция переходит из одной параллельной цепи в другую (рис. 13.8). Время  $T_K$  между двумя последовательными коммутациями изменяется в зависимости от скорости вращения ротора, поэтому коммутация происходит при различных мгновенных значениях тока. Если пренебречь временем  $T_K$  коммутации по сравнению со временем  $T_0$ , то можно считать, что изменение тока в процессе коммутации равно удвоенному значению тока в параллельной цепи обмотки или, что то же, мгновенному значению тока, проходящему в момент коммутации через щётку.

При коммутации в короткозамкнутой секции наводятся три ЭДС: реактивная  $e_R$ , ЭДС вращения  $e_B$  и ЭДС трансформации  $e_T$  (рис. 13.9).

Реактивная ЭДС  $e_R$  равна сумме ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции одновременно коммутируемых секций и определяется скоростью изменения коммутируемого тока (на рис. 13.9 поток самоиндукции и взаимоиндукции обозначен через  $\Phi_{LM}$ ). Поэтому можно считать, что реактивная ЭДС  $e_R$  при данной скорости вращения ротора, определяющей время  $T_K$ , прямо про-

порциональна мгновенному значению тока, проходящего в момент коммутации через щётку. В этом смысле можно считать, что ЭДС  $e_R$  совпадает по фазе с током ротора, и ввести понятие о действующем значении ее.

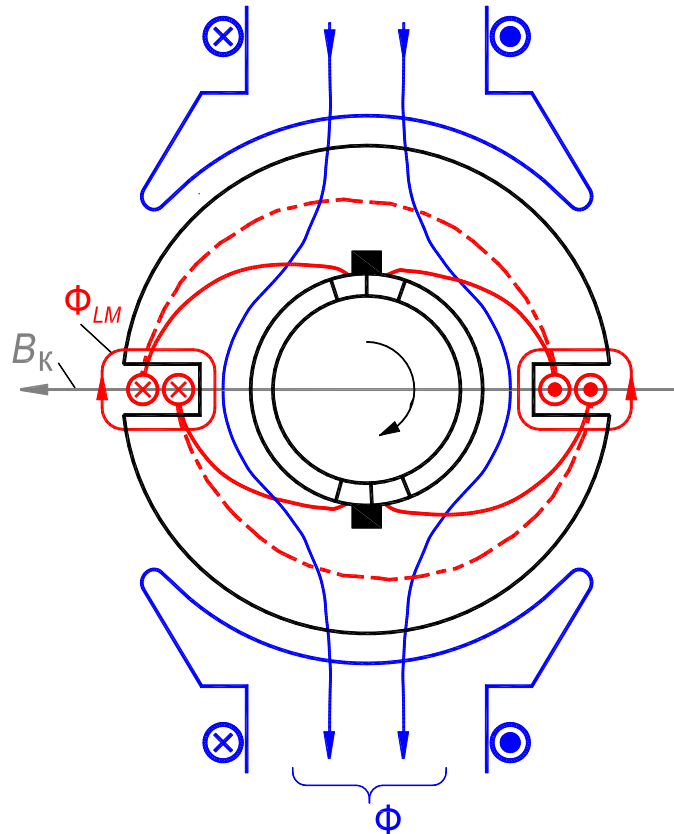


Рис. 13.9. Потокосцепление с коммутируемой секцией

Среднее значение реактивной ЭДС за время коммутации может быть определено так же, как и в машинах постоянного тока:

$$e_R = 2w_k l_i v_1 A \zeta \cdot 10^{-6}, \text{ В}, \quad (13.13)$$

где  $w_k$  — число витков в коммутируемой секции (обычно  $w_k = 1$ );  $v_1$  — линейная окружная скорость ротора, м/с,  $l_i$  — расчётная длина ротора, см;  $A$  — линейная нагрузка, А/см, определенная по мгновенному значению тока в момент коммутации;  $\zeta \approx 6$  [1, с. 58, сл.]. Если  $A$  отнести к действующему значению тока, то обычно ЭДС  $e_R$  будет не больше 5 – 6 В. Электродвижущая сила вращения  $e_B$  зависит от внешнего поля в зоне коммутации. Если мгновенное значение средней (по пространству) индукции этого поля равно  $B_K$ , Гс, то среднее значение ЭДС вращения  $e_B$  за время коммутации равно:

$$e_B = 2w_k l_i v_1 B_K \cdot 10^{-6}, \text{ В}. \quad (13.14)$$

Если щётки установлены в геометрической нейтрали, то, как видно из рис. 13.9, коммутируемая секция сцеплена с полным потоком полюса  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ; поэтому ЭДС трансформации, наводимая в ней при коммутации, будет равна:

$$E_T = 2\pi f w_k \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (13.15)$$

где время  $t$  должно соответствовать моменту коммутации.

Для безыскровой коммутации необходимо, чтобы для любого момента времени

$$e_R + e_B + e_T \approx 0. \quad (13.16)$$

Выполнение этого равенства встречает на практике значительные трудности по двум причинам. Во-первых, ЭДС  $e_R$  и  $e_T$  сдвинуты по фазе на угол  $\pi/2$  (рис. 13.10), поэтому для соблюдения (13.16) требуется, чтобы ЭДС  $e_B$  была сдвинута по фазе относительно ЭДС  $e_R$  и  $e_T$  на строго определенный угол. Во-вторых, компенсация ЭДС в коммутируемой секции может быть получена только при определенной скорости вращения ротора, так как ЭДС  $e_R$  и  $e_B$  изменяются прямо пропорционально линейной скорости  $v_1$ , а ЭДС  $e_T$  от нее не зависит. Особенно неблагоприятные условия возникают при пуске в ход, когда  $v_1 = 0$ ;  $e_R + e_B = 0$  и ЭДС  $e_T$  трансформации не может быть компенсирована. Это заставляет ограничивать допускаемое действующее значение ЭДС трансформации и брать  $e_T < 3$  В. Для соблюдения этого условия, как видно из (13.15), приходится или понижать частоту тока до  $(16^{2/3} - 25)$  Гц, или снижать произведение  $w_k \Phi_m$ , что приводит к снижению рабочего напряжения на коллекторе (см. разд. 13.1, с. 244, 245).

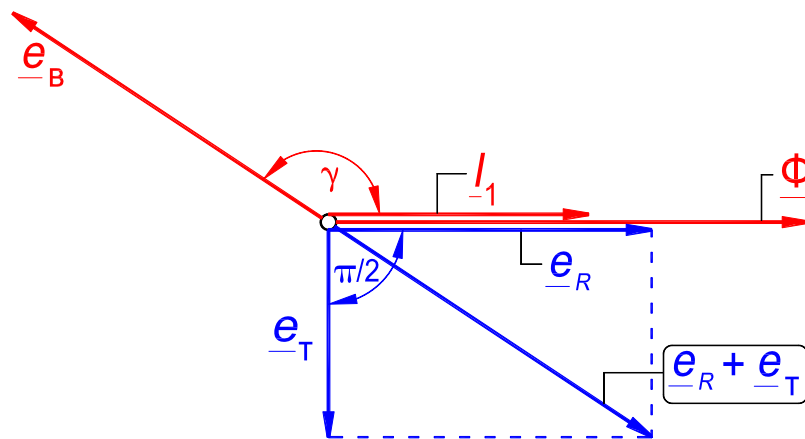


Рис. 13.10. Векторная диаграмма ЭДС, действующих в коммутируемой секции

Как и в машинах постоянного тока, для процесса коммутации большое значение имеет правильный выбор сорта щеток. В однофазных коллекторных машинах для ограничения тока в коммутируемых секциях приходится применять твердые щётки с большим переходным сопротивлением.

Для компенсации ЭДС  $e_R$  и  $e_T$  с помощью ЭДС  $e_B$  применяют дополнительные полюсы, которые создают в зоне коммутации магнитное поле с требуемым значением индукции  $B_K$ . Как видно из рис. 13.10, действие добавочных полюсов будет эффективным только тогда, когда возбуждающий их ток с помощью специальных схем (см. далее разд. 13.5) сдвинут относительно тока  $I$  ротора на угол  $\gamma$ . Но и в этом случае соблюдение (13.16) возможно только при определенных нагрузках машины (см. разд. 13.5).

Рассмотрим, в какой мере условия коммутации лимитируют мощность однофазной коллекторной машины. Электромагнитная мощность вращения машины равна по (13.12) при  $\beta = 0$

$$P_B = E_B I \cdot 10^{-3}, \text{ кВт.} \quad (13.17)$$

Согласно (13.1) действующее значение ЭДС

$$E_B = \frac{pn}{2 \cdot 60} \frac{N}{a} \Phi_m; \quad (13.18)$$

действующее значение ЭДС трансформации по (13.15)

$$E_T = 4,44 f w_K \Phi_m. \quad (13.19)$$

Принимая во внимание, что

$$\pi D A = \frac{I}{2a} N; \quad (13.20)$$

$$v = \pi D n / 6000, \text{ м/с,} \quad (13.21)$$

и, полагая  $e_T = 3 \text{ В}$ ,  $w_K = 1$ , получим из совместного решения (13.17) – (13.21):

$$\frac{P_B}{p} \approx \frac{A v_1}{10}.$$

Если допустить  $A = 400 \text{ А/см}$  и  $v_1 = 40 \text{ м/с}$  (с учетом возможности повышения этой скорости на 50 % при регулировании), то получим:

$$\frac{P_B}{p} \approx \frac{1600}{f}, \text{ кВт.} \quad (13.22)$$



Из этого равенства следует, что мощность однофазной коллекторной машины, приходящаяся на пару полюсов, нормально не должна быть больше 32 кВт при 50 Гц, 64 кВт при 25 Гц и 100 кВт при  $16^{2/3}$  Гц.

### 13.5. Двигатели с последовательным соединением цепей статора и ротора

Схема такого двигателя показана на рис. 13.11,а. На статоре располагаются три обмотки: возбуждения  $B$ , компенсационная обмотка  $K$  и обмотка добавочных полюсов  $D$ . Все три обмотки включаются последовательно и размещаются в пазах различных размеров (см. рис. 13.1). Компенсационная обмотка, как и в машинах постоянного тока, предназначена для компенсации поля ротора, поэтому ось этой обмотки располагается по линии щеток и её МДС устанавливается равной и обратно направленной МДС обмотки ротора. При отсутствии компенсационной обмотки индуктивное сопротивление цепи ротора получается чрезмерно большим, что снижает момент вращения и коэффициент мощности двигателя. Назначение сопротивления  $R_d$  шунтирующего обмотку добавочных полюсов, будет рассмотрено ниже (см. с. 259).

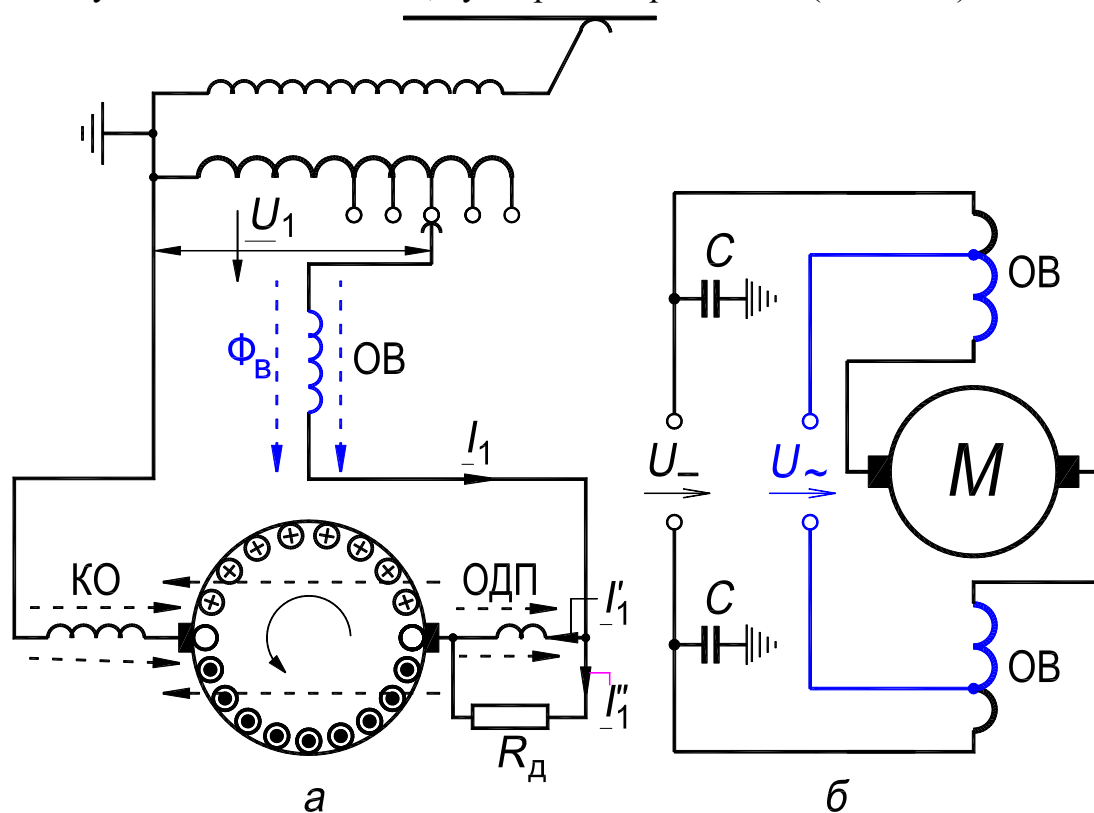


Рис. 13.11. Схема коллекторного двигателя последовательного возбуждения:

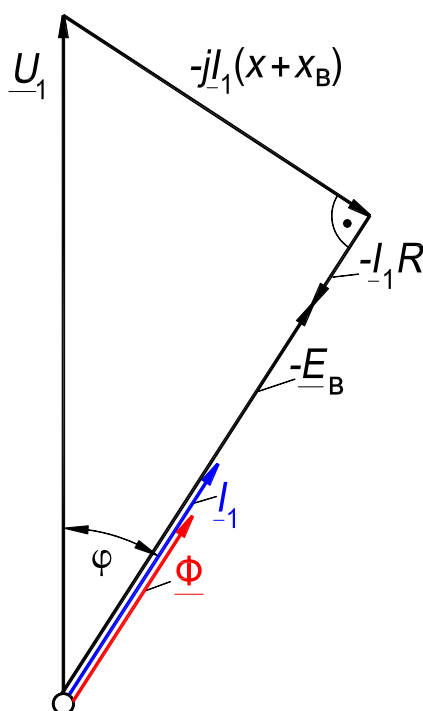
а – однофазного; б – универсального

Однофазный двигатель последовательного возбуждения, как правило, питается через понижающий трансформатор. Пуск в ход и регулирование скорости вращения производятся путём изменения напряжения  $U_1$  на зажимах двигателя.

Уравнение ЭДС в цепи двигателя может быть записано в следующем виде:

$$\underline{U}_1 - \underline{I}_1 [R + j(x + x_B)] = -\underline{E}_B, \quad (13.23)$$

где  $R$  – активное сопротивление всей цепи двигателя (сопротивление  $R$  может учитывать также приближенно магнитные потери, не зависящие от скорости вращения ротора);  $x_B$  – индуктивное сопротивление обмотки возбуждения;  $x$  – суммарное индуктивное сопротивление компенсационной обмотки, обмотки ротора и обмотки дополнительных полюсов. Сопротивление  $x$  обычно невелико, так как МДС всех трёх обмоток взаимно почти уравновешены.



**Рис. 13.12. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения**

Уравнению (13.23) соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 13.12. Электродвижущая сила вращения  $E_B$ , наводимая в обмотке ротора, пропорциональна произведению магнитного потока на скорость вращения ротора. С другой стороны, магнитный поток зависит от тока двигателя, поэтому, пренебрегая сдвигом фаз между током и магнитным потоком, можно написать:

$$\underline{E}_B = -\underline{I}_1 r_0 v, \quad (13.24)$$

где относительная скорость вращения  $v = f_B/f$ ; при  $f_B \approx f$  скорость вращения  $v = 1$ ;  $r_0$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления и зависящий от насыщения. Знак минус в (13.24) учитывает направление вращения ротора, которое в режиме двигателя таково, что ЭДС  $\underline{E}_B$  направлена против тока  $\underline{I}_1$ .

Из уравнений (13.23) и (13.24) находим:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{R+r_0v+j(x+x_B)}. \quad (13.25)$$

Исследуем характеристики двигателя. Из равенства (13.25) имеем:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(R+r_0v)^2+(x+x_B)^2}}. \quad (13.26)$$

Из равенств (13.12), (13.24) и (13.26), полагая  $\beta = 0$ , получим:

$$M_{cp} = \frac{E_B I_1}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{U_1^2 r_0 p}{2\pi f [(R+r_0v)^2+(x+x_B)^2]}, \quad (13.27)$$

так как  $60v/2\pi n = p/2\pi f$ .

Как видно из (13.27), при любых значениях  $v$  момент вращения  $M_{cp}$  остается положительным; следовательно, однофазный двигатель последовательного возбуждения не может быть переведен в генераторный режим и не может рекуперировать энергию в сеть путём ускорения вращения ротора, подобно бесколлекторной асинхронной машине.

Уравнение (13.27) показывает, что  $M_{cp}$  имеет максимум при  $R + r_0v = 0$ , когда  $v = -R/r_0$ , что соответствует тормозному режиму противовключения. При этом режиме ротор за счет извне приложенного момента вращается против направления действия электромагнитного момента самой машины.

Из формулы (13.26) может быть найден угол сдвига фаз между током и напряжением машины:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x+x_B}{R+r_0v}. \quad (13.28)$$

Из этого равенства следует, что чем выше скорость вращения ротора, тем выше коэффициент мощности двигателя.

При  $R + r_0v = 0$  угол  $\varphi_1 = \pi/2$ ; при  $v < -R/r_0$  угол  $\varphi_1 > \pi/2$  и машина переходит в генераторный режим, отдавая энергию в сеть.

Пуск в ход двигателя для уменьшения пускового тока осуществляется при пониженном напряжении. Для получения пускового тока и момента, равных их номинальным значениям, требуется понижение напряжения до (45...50) %  $U_{ном}$ .

Реверсирование двигателя производится изменением направления тока в цепи обмотки возбуждения или якоря.

Торможение двигателя может быть осуществлено двумя способами (разд. 3.10, с. 160, сл.): 1) противоклещением с рекуперированием энергии, рассмотренным выше; 2) замыканием цепи двигателя на активное сопротивление (реостатное торможение). В последнем случае машина самовозбуждается и становится генератором постоянного тока. Возможны также модификации этих методов при параллельном и независимом питании обмотки возбуждения от источников постоянного или переменного тока.

Как было отмечено выше (разд. 13.4, с. 252, сл.), коммутация тока в однофазных коллекторных двигателях осложняется возникновением в коммутируемых секциях ЭДС трансформации. Как видно из рис. 13.10, для создания ЭДС  $e_{\text{в}}$ , компенсирующей сумму реактивной ЭДС и ЭДС трансформации  $e_R + e_{\text{т}}$ , необходимо МДС  $F_{\text{д}}$  дополнительных полюсов сдвинуть по фазе на угол  $\gamma$  относительно МДС обмотки ротора. С этой целью можно, например, обмотку добавочных полюсов шунтировать активным сопротивлением  $R_{\text{д}}$  (см. рис. 13.11,а). Однофазные коллекторные двигатели последовательного возбуждения большой мощности с электрическим соединением цепей статора и ротора применяются исключительно для целей электрической тяги.

Маломощные двигатели с последовательным возбуждением часто изготавливаются для питания как от сети переменного, так и от сети постоянного тока, и в этом случае их называют **универсальными двигателями с последовательным возбуждением** (термин 102, с. 29). При питании постоянным током индуктивное падение напряжения в двигателе отсутствует, и поэтому при одинаковых питающих напряжениях и нагрузках на валу скорость вращения при постоянном токе будет значительно больше, чем при переменном. Поэтому для получения приблизительно одинаковых механических характеристик при питании от сети постоянного и переменного тока обмотка возбуждения универсального двигателя изготавливается с отводами и при переменном токе часть обмотки возбуждения отключается (рис. 13.11,б). На рис. 13.11,б показано также включение конденсаторов для уменьшения радиопомех. В этом случае обмотка возбуждения разбивается на две части, которые присоединяются с разных сторон якоря. Конденсаторы включаются между выводными зажимами и корпусом, который заземляется.

### 13.6. Двигатели с трансформаторной связью цепей статора и ротора (репульсионные)

Двигатель такого типа был впервые предложен Л. Аткинсоном [1]. Его схема показана на рис. 13.13. В отличие от ранее рассмотренного двигателя (см. рис. 13.11,*a*) статор не имеет электрической связи с ротором. Щётки ротора замкнуты накоротко, и передача энергии ротору происходит только посредством магнитного поля трансформаторным путём.

В 1892 г. Э. Арнольд предложил объединить обе обмотки (*B* и *K*) статора, располагая по оси их результирующей МДС  $F_1$  одну обмотку. После ряда усовершенствований такие двигатели получили довольно широкое распространение под названием "репульсионных". В отличие от двигателей последовательного возбуждения обычной конструкции с довольно громоздкими и дорогими регулировочными и пусковыми понижающими трансформаторами репульсионные двигатели допускают непосредственное присоединение к сети, а также регулирование скорости вращения и пуск в ход только с помощью передвижения щёток. Это и определило распространение их в установках, где требуются однофазные двигатели переменного тока небольшой мощности с широким регулированием скорости вращения.

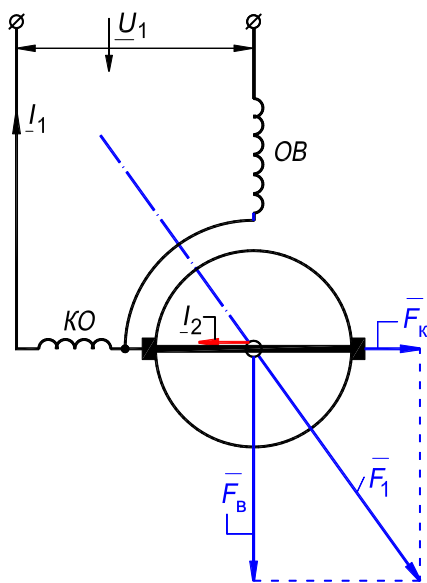
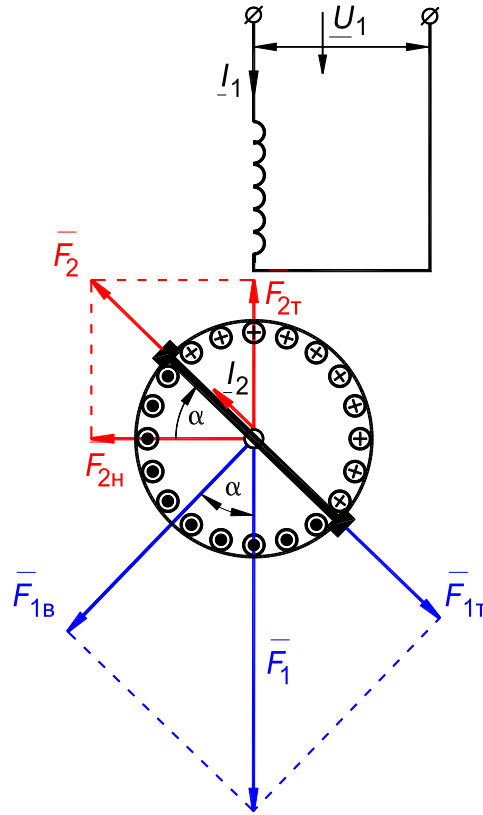


Рис. 13.13. Схема однофазного коллекторного двигателя Аткинсона

Исследуем рабочий процесс репульсионного двигателя. Схема двигателя дана на рис. 13.14. Статор имеет неявнополюсную магнитную систему. На роторе располагается двухслойная обмотка, выведенная на коллектор. Щётки короткозамкнуты и могут передвигаться по коллектору с помощью специального приспособления [1, рис. 8-110, с. 210].



**Рис. 13.14.** Схема однофазного коллекторного репульсионного двигателя

Для более удобного анализа работы двигателя МДС  $\bar{F}_1$  статора разложим на две составляющие:  $F_{1T} = F_1 \sin \alpha$ , действующую по линии щеток, и  $F_{1B} = F_1 \cos \alpha$ , действующую по перпендикулярному к этой линии направлению. Магнитодвижущую силу ротора  $\bar{F}_2$  также разложим на две составляющие;  $F_{2T} = F_2 \sin \alpha$ , направленную по оси обмотки статора, и  $F_{2H} = F_2 \cos \alpha$ , направленную по геометрической нейтрали машины.

Уравнения ЭДС для цепей статора и ротора могут быть записаны в следующем виде:

$$\underline{U}_1 - I_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_{1T}; \quad (13.29)$$

$$\underline{E}'_{2T} + \underline{E}'_{2B} = I'_2 \underline{Z}'_2, \quad (13.30)$$

где  $\underline{U}_1$  – приложенное напряжение;  $I_1$  – ток статора;  $I'_2$  – ток ротора, приведенный к обмотке статора;  $\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$ ;  $\underline{Z}'_2 = r'_2 + jx'_2$  – полные сопротивления обмотки статора и приведенное сопротивление обмотки ротора, обусловленные активным сопротивлением и магнитным полем рассеяния;  $\underline{E}_{1T}$  – ЭДС, наведенная в обмотке статора магнитным полем, созданным МДС  $\bar{F}_1 + \bar{F}_{2T}$ ;  $\underline{E}'_{2T}$  – приведенное значение ЭДС трансформации, наведенной на щётках магнитным полем взаимоиндукции,

созданным МДС  $\bar{F}_{1T} + \bar{F}_2$ ;  $\underline{E}'_{2B}$  – приведенное значение ЭДС вращения, наведенной на щётках магнитным полем взаимоиндукции, созданным МДС  $\bar{F}_{1B}$ .

Исходя из пропорциональности МДС и соответствующих токов, можно написать:

$$\underline{E}_{1T} = -j(I_1 + I'_2 \sin \alpha)x_0; \quad (13.31)$$

$$\underline{E}'_{2T} = -j(I_1 \sin \alpha + I'_2)x_0; \quad (13.32)$$

$$\underline{E}'_{2B} = I_1 x_0 v \cos \alpha, \quad (13.33)$$

где  $x_0$  – индуктивное сопротивление взаимоиндукции;  $v = f_B/f$  – относительная скорость вращения ротора.

Векторная диаграмма двигателя, соответствующая уравнениям (13.29) – (13.33), показана на рис. 13.15.

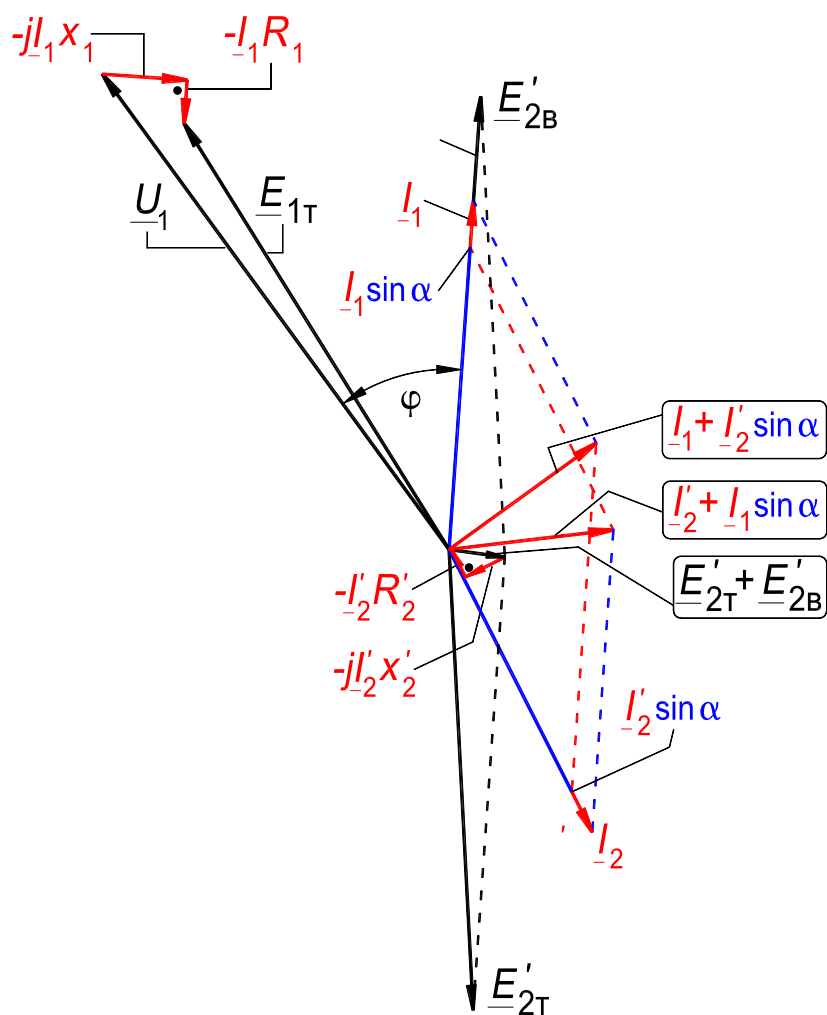


Рис. 13.15. Векторная диаграмма репульсионного двигателя

Из совместного решения (13.29) – (13.33) находим:

$$\underline{U}_1 = I_1 \left( Z_1 + \frac{Z_2'}{c} + \frac{x_0 v}{c} \sin \alpha \cos \alpha + j \frac{x_0}{c} \cos^2 \alpha \right); \quad (13.34)$$

$$I_2' = -I_1 \frac{\sin \alpha + j v \cos \alpha}{c}, \quad (13.35)$$

где  $C = 1 + \frac{Z_2'}{x_0}$  — комплексный коэффициент, мнимой частью которого ввиду её малости можно пренебречь при практических расчётах и считать  $C \approx c$ .

При коротком замыкании машины, т. е. при  $v = 0$  и  $\alpha = \pi/2$ , имеем из (13.34):

$$\underline{U}_1 = I_1 \left( Z_1 + \frac{Z_2'}{c} \right) = I_1 Z_k = I_1 (r_k + j x_k). \quad (13.36)$$

Полагая  $C \approx c$ , из (13.34) и (13.36) получим:

$$I_1 = \frac{U_1}{r_k + \frac{x_0 v}{c} \sin \alpha \cos \alpha + j \left( x_k + \frac{x_0}{c} \cos^2 \alpha \right)}. \quad (13.37)$$

Момент вращения двигателя может быть определен по (13.12).

Из (13.33) и (13.35), полагая  $C \approx c$ , находим:

$$M_{cp} = \frac{E_{2B}' I_2' \cos \beta}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{|E_{2B}' I_2'|_d}{\frac{2\pi n}{60}} = -\frac{I_1^2 p x_0}{2\pi f c} \sin \alpha \cos \alpha, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (13.38)$$

Знак ”–» перед правой частью обусловлен тем, что угол между векторами  $E_{2B}'$  и  $I_2'$  больше, чем  $\pi/2$  (см. рис. 13.15). Подставив в (13.38) значения тока из (13.37), получим, опустив знак минус:

$$M_{cp} = \frac{U_1^2 p}{2\pi f c} \frac{x_0 \sin \alpha \cos \alpha}{\left( r_k + \frac{x_0 v}{c} \sin \alpha \cos \alpha \right)^2 + \left( x_k + \frac{x_0}{c} \cos^2 \alpha \right)^2}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (13.39)$$

Примерные зависимости  $I_1 = f(M_{cp})$  и  $v = \varphi(M_{cp})$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $\alpha = \text{const}$  показаны на рис. 13.16. Как видно из этих кривых, механические характеристики репульсионного двигателя аналогичны характеристикам двигателей с последовательным возбуждением. При  $v < 0$  имеет место тормозной режим противовключения с рекуперацией энергии в сеть..

Пуск в ход двигателя осуществляется поворотом щеток из пускового положения, при котором  $\alpha = 0$ . Из формулы (13.39) следует, что при пуске в ход ( $v = 0$ ) момент вращения равен:

$$M_{\Pi} = \frac{U_1^2 p x_{12} \sin \alpha \cos \alpha}{2\pi f c \left[ r_k^2 + \left( x_k + \frac{x_0}{c} \cos^2 \alpha \right)^2 \right]}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (13.40)$$

и соответственно пусковой ток из (13.37)

$$I_{\Pi} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + \left( x_k + \frac{x_0}{c} \cos^2 \alpha \right)^2}}. \quad (13.41)$$



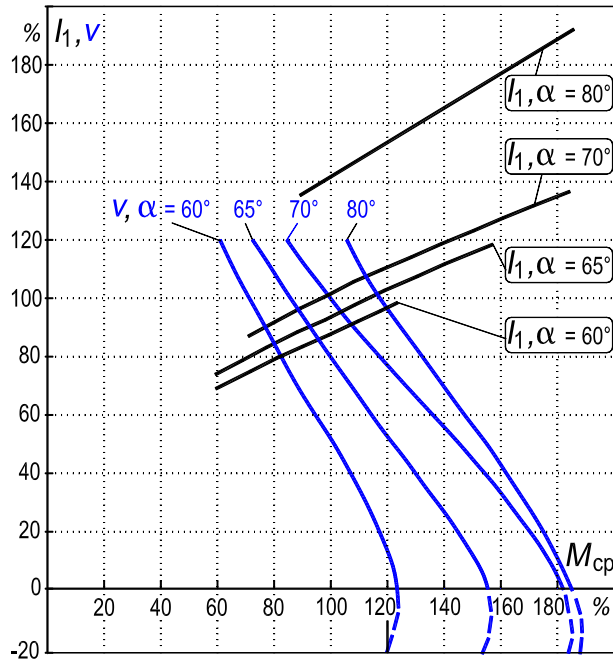


Рис. 13.16. Характеристики репульсионного двигателя

Зависимости пусковых момента и тока от угла  $\alpha$  поворота щеток показаны на рис. 13.17. Максимальный пусковой момент возникает при  $\alpha \approx 75 \dots 80^\circ$ .

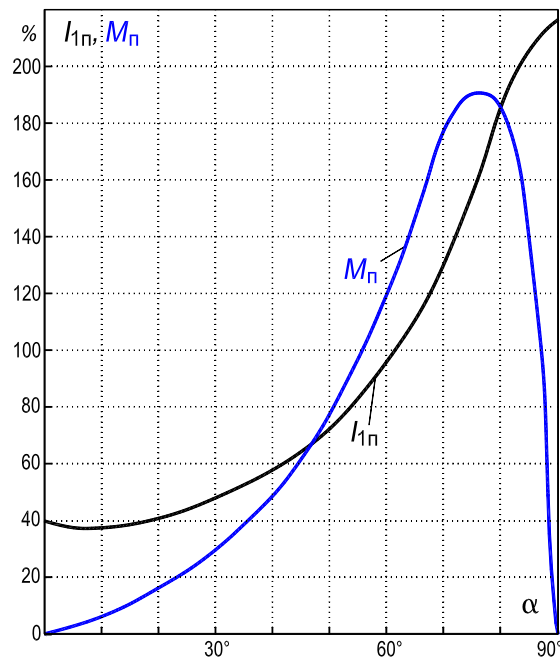


Рис. 13.17. Пусковые характеристики репульсионного двигателя

Направление вращения ротора обратно направлению поворота щеток относительно их пускового положения ( $\alpha \approx 0$ ). При повороте щеток в обмотке неподвижного ротора возникает ток, стремящийся размагнитить поле статора.

Этот ток, взаимодействуя с магнитным полем, создает момент вращения, всегда направленный в сторону, обратную повороту щеток (рис. 13.18). Эта особенность ротора как бы "отталкиваться" в сторону, противоположную повороту щеток, дала основание назвать двигатели этого типа "репульсионными". Рабочие характеристики репульсионного двигателя при  $U_1 = \text{const}$  и  $\alpha = \text{const}$  показаны на рис. 13.19. При номинальных условиях угол поворота щеток устанавливается равным  $\alpha \approx 65 \dots 75^\circ$ . Пределы регулирования скорости вращения двигателя обычно лежат в пределах 30 – 110% синхронной скорости ( $v = 1$ ).

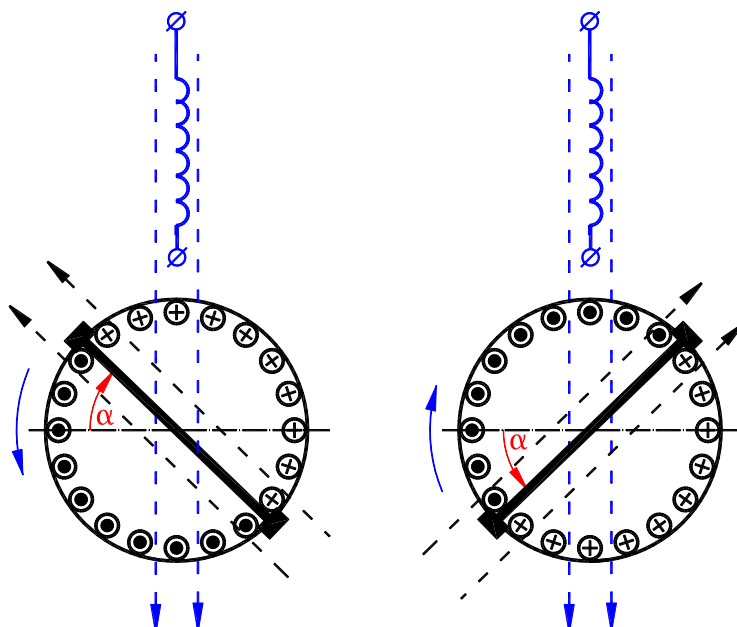
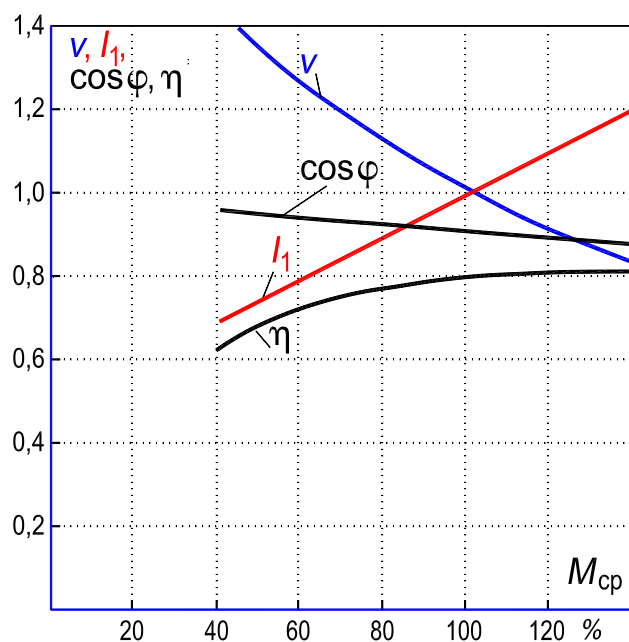


Рис. 13.18. Направление вращения репульсионного двигателя

Важной особенностью репульсионного двигателя является наличие в нём вращающегося поля. В двигателе действуют МДС (см. рис. 13.14)  $\bar{F}_{1T} + \bar{F}_2$  по линии щеток и  $\bar{F}_{1B}$  по перпендикулярному к ней направлению. Первая МДС совпадает по фазе с результирующим током  $I_1 \sin \alpha + I_2'$ , вторая – с током  $I_1$  (см. рис. 13.15). Так как эти токи сдвинуты по времени на угол, близкий к  $90^\circ$ , то магнитное поле двигателя получается вращающимся и при  $v = 1$  (синхронизме) близким к круговому. В двигательном режиме ротор вращается в направлении вращения магнитного поля.

Вращающееся поле оказывает существенное влияние на коммутацию тока. В коммутируемой секции наводятся две ЭДС: реактивная  $e_R$  и ЭДС вращения  $e_v$ , пропорциональная скорости  $1 - v$  относительного перемещения ротора во вращающемся магнитном поле. При синхронизме  $1 - v = 0$ , и, следова-

тельно,  $e_b = 0$ . Поэтому вблизи синхронизма коммутация тока протекает спокойнее. Дополнительные полюсы для компенсации реактивной ЭДС в репульсионных двигателях не устанавливаются, так как применение их целесообразно при фиксированном положении щеток. Ток в коммутируемых секциях ограничивается только переходным сопротивлением щеток.



**Рис. 13.19.** Рабочие характеристики репульсионного двигателя

Впервые однофазные коллекторные машины появились в период 80-х годов XIX столетия. Трёхфазные коллекторные машины появились несколько позже – в начале 90-х годов. Они изготавливаются в разных странах мира. Коллекторные машины использовались только в двигательном режиме. Хотя коллекторные двигатели были более дорогими и более сложными в изготовлении, чем асинхронные [4], они обеспечивали возможность широкого и экономичного регулирования скорости вращения рабочих механизмов, что во многих случаях являлось решающим фактором.

С коллекторными машинами переменного тока конкурируют машины, в которых механический коллектор заменяется блоком управляемых полупроводниковых вентилях. В регулируемом электроприводе существуют рациональные области применения как коллекторных двигателей переменного тока, так и двигателей с полупроводниковыми преобразователями тока – вентильными двигателями (термины 4 и 6, с. 17).

## 14. Вентильные двигатели

Вентильные электрические двигатели, в которых коммутация фаз (секций) обмотки осуществляется полупроводниковой схемой по сигналам от датчика положения ротора, определяют собой быстро и эффективно развивающееся научно-техническое направление. Электропривод на основе вентильных двигателей все более широко используется в таких областях техники и промышленности, как приборная автоматика, станкостроение и робототехника, автоматизированные технологические линии, транспорт, аэрокосмическая техника, насосное и компрессорное оборудование и др. [19].

### 14.1. Сопоставление механических характеристик электродвигателей общепромышленного назначения

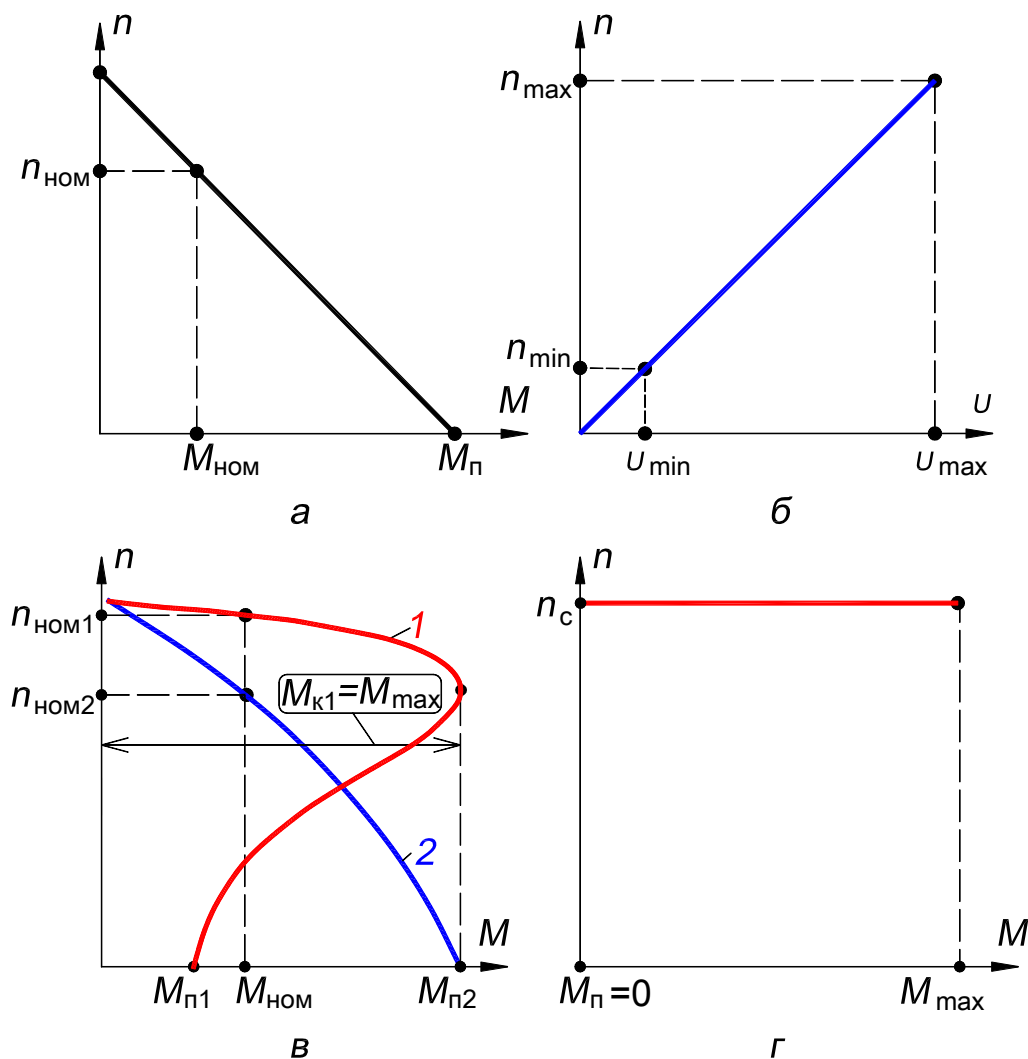
#### 14.1.1. Коллекторный двигатель постоянного тока

Лучшими механической  $n = f(M)$  и регулировочной характеристиками  $n = f(U)$  обладают коллекторные двигатели постоянного тока независимого возбуждения (см. прил. П7.1, с. 174, сл.), обладающие большой кратностью пускового момента, линейной регулировочной характеристикой, обеспечивающей возможность достижения большого диапазона регулирования  $n_{\max} : n_{\min}$ , где  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  – максимальная и минимальная частоты вращения в процессе регулирования. Для современных высокоточных и ответственных приводов диапазон регулирования должен иметь порядок  $10^3 - 10^4$ . Типичный вид механической и регулировочной характеристик коллекторного двигателя независимого возбуждения показан на рис. 14.1, а, б.

Из рис. 14.1, а видно, что, если двигатель работает в точке механической характеристики с номинальным моментом  $M_{\text{ном}}$  при номинальной скорости вращения  $n_{\text{ном}}$ , то кратность пускового момента  $M_{\text{п}}$  по отношению к номинальному ( $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$ ) может быть достаточно большой, в особенности, если допустим прямой пуск.

Из регулировочной характеристики рис. 14.1, б видно, что изменение подводимого к двигателю напряжения  $U$  в диапазоне  $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$  позволяет в том же диапазоне  $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$  изменять скорость по линейному закону  $n = k \cdot U$ . Это свойство, хотя и обусловлено некоторыми упрощающими предположениями (например, об отсутствии нелинейности в характере нагрузки и др.), все же в главных чертах отражает поведение двигателя

в процессе регулирования и является весьма удобным в построении регулируемых систем электропривода.



**Рис. 14.1. Механическая характеристика:**

*a* – коллекторного двигателя постоянного тока независимого возбуждения;  
*в* – асинхронного двигателя; *г* – синхронного двигателя.

**Регулировочная характеристика коллекторного двигателя независимого возбуждения – б**

Однако в коллекторном двигателе постоянного тока уязвимым звеном является щеточно-коллекторный узел, что делает необходимым его частый осмотр, периодический ремонт и замену. В отдельных случаях, таких как высокоскоростной ( $10^4$  об/мин) и сверхвысокоскоростной ( $10^5$  об/мин) привод, применение механического коллектора для сколько-нибудь длительной работы является вообще недопустимым. То же самое можно сказать о работе в агрессивной среде, воздействие которой на коллектор и щётки резко

снижает надежность и долговечность двигателя. Таким образом, двигатель с механическим коллектором не может рассматриваться как современный элемент автоматизированного электропривода, к которому предъявляются повышенные требования по надежности.

#### 14.1.2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Двигатели переменного тока (асинхронные [4] и синхронные [5]), не содержащие скользящих электрических контактов, наилучшим образом удовлетворяют требованиям надёжности и минимума ухода в процессе эксплуатации. Единственными элементами их конструкции, влияющими на долговечность, являются подшипники и обмотки. Однако эти элементы в принципе присущи всем видам электрических машин и, кроме того, современные конструктивные и технологические усовершенствования довели их уровень до степени, удовлетворяющей, как правило, требованиям, предполагающим работу без осмотров и обслуживания на весь срок эксплуатации.

Тем не менее двигатели переменного тока не обладают видом механических и регулировочных характеристик, благоприятным с точки зрения регулирования частоты вращения и условий пуска. В этом они существенно уступают двигателям постоянного тока.

На рис. 14.1,б показаны две механические характеристики асинхронных двигателей с различными активными сопротивлениями обмотки ротора. Кривая 1 соответствует меньшему активному сопротивлению ротора, или меньшему критическому скольжению ротора  $s_k$ , а кривая 2 – большему сопротивлению и, соответственно, большему критическому скольжению. Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет рабочую точку с координатами номинальный момент  $M_{ном}$  и номинальная частота вращения (скорость)  $n_{ном}$ , а также точки пускового момента  $M_{п}$  и критического (максимального) момента  $M_k = M_{max}$ . Кривая 1 существенно нелинейна, причем пусковой момент  $M_{п}$  может быть меньше номинального момента нагрузки  $M_{ном}$ . Если момент нагрузки постоянен по величине (не зависит от скорости), то асинхронный двигатель, имеющий механическую характеристику вида 1, не может быть пущен из неподвижного состояния  $n = 0$ .

Для улучшения пусковых свойств и придания механической характеристике "падающего" вида), свойственного двигателю постоянного тока (см. рис. 14.1,а, увеличивают активное сопротивление ротора (кривая 2

на рис. 14.1,в. Увеличение активного сопротивления ротора приводит к увеличению критического скольжения и возрастанию пускового момента  $M_{п.}$  Пусковые свойства двигателя улучшаются, но одновременно возрастают потери в роторе и ухудшается тепловое состояние двигателя. Имеются в виду асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, увеличение активного сопротивления которого достигается либо за счет применения материалов с повышенным удельным электрическим сопротивлением, либо за счет специальных конструктивных мероприятий.

Регулирование скорости асинхронных двигателей достигается изменением частоты первичного напряжения, когда наряду с изменением напряжения  $U$ , подводимого к фазам, изменяется по определенному закону частота питания  $f$  [4, с. 149, сл.].

Применительно к асинхронным двигателям существуют более совершенные системы управления, например, *векторное управление* [19]. При этом можно обеспечить механические и регулировочные характеристики асинхронного двигателя, аналогичные изображенным на рис. 14.1,а,б для двигателя постоянного тока.

### 14.1.3. Синхронный двигатель

Использование синхронного двигателя в условиях автоматизированного электропривода с глубоким регулированием, частыми разгонами и торможениями, особенно в режиме повышенных требований к динамике и плавности вращения, без некоторых конструктивных дополнений невозможно [5].

На рис. 14.1,г изображена механическая характеристика синхронного двигателя в виде отрезка горизонтальной прямой.

На характеристике  $n_c = 60f/p$  – синхронная скорость двигателя, определяемая частотой сети  $f$  и числом пар полюсов  $p$ .

Характеристика двигателя идеально жесткая вплоть до некоторого момента нагрузки  $M_{max}$  после превышения которого двигатель выпадает из синхронизма и останавливается. Электромагнитный момент неявнополюсного синхронного двигателя с одинаковыми индуктивными сопротивлениями фазы по продольной  $x_d$  и поперечной  $x_q$  оси и в пренебрежении активным сопротивлением статора, определяется в виде [5, с. 209, сл.]

$$M = m \frac{E_0 U}{\Omega_c x_c} \sin \theta,$$

где  $m$  – число фаз обмотки якоря;  $E_B$  – ЭДС, наводимая в фазе обмотки якоря потоком возбуждения;  $x_c$  – полное синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря;  $\Omega_c$  – угловая синхронная частота вращения ротора;  $\theta$  – угол нагрузки между векторами  $\underline{U}$  и  $\underline{E}_B$ .

С увеличением момента нагрузки  $M_{HT}$  возрастает угол нагрузки  $\theta$ . При максимальном моменте нагрузки этот угол становится равен  $90^\circ$  и дальнейшее даже незначительное увеличение нагрузки нарушает устойчивость синхронного режима вращения и приводит к остановке двигателя [5, рис. 11.8, с. 228].

Пуск синхронного двигателя невозможен без применения вспомогательного устройства или специального приема. К первому относится обычно пусковая обмотка на роторе, обеспечивающая асинхронный пуск, с последующим втягиванием ротора в синхронизм, а ко второму плавное увеличение частоты питания в процессе пуска (частотный пуск) [5, с. 214, сл.]. И то и другое неприемлемо для высокодинамичных регулируемых приводов.

В таблице 14.1 представлены преимущества и недостатки электрических двигателей общепромышленного назначения с точки зрения возможности их использования в составе современного регулируемого привода.

**Таблица 14.1. Свойства электрических двигателей общепромышленного назначения**

Тип двигателя	Преимущества	Недостатки
Коллекторный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Хорошая управляемость.</li> <li>2. Линейность механической и регулировочной характеристик.</li> <li>3. Большая кратность пускового момента.</li> <li>4. Отсутствие потерь на возбуждение</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Наличие механического коллектора и щеток, снижающих надежность и долговечность.</li> <li>2. Невозможность работать в агрессивных и взрывоопасных средах без дополнительных устройств герметизации.</li> <li>3. Затрудненный теплоотвод при естественном охлаждении</li> </ol>



Продолжение табл. 14.1

Тип двигателя	Преимущества	Недостатки
Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отсутствие скользящих контактов и высокая надежность.</li> <li>2. Простота конструкции.</li> <li>3. Относительно невысокая стоимость.</li> <li>4. Удовлетворительные условия теплоотвода</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая кратность пускового момента на естественной характеристике.</li> <li>2. Сложная система управления скоростью, обеспечивающая хорошую динамику в сочетании с глубоким диапазоном регулирования.</li> <li>3. Дополнительные потери на создание потока</li> </ol>
Синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отсутствие скользящих контактов и высокая надежность.</li> <li>2. Отсутствие потерь на возбуждение.</li> <li>3. Улучшенные условия теплоотвода</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Невозможность прямого пуска.</li> <li>2. Ограниченные возможности регулирования скорости без внесения конструктивных изменений.</li> <li>3. Повышенная стоимость по сравнению с асинхронным двигателем</li> </ol>

Из анализа таблицы следует, что оптимальное решение по созданию электродвигателя для современного, высокودинамичного, точного и надежного привода заключается в следующем – в одном устройстве совмещаются преимущества коллекторного двигателя постоянного тока и синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Это решение позволяет создать электродвигатель, обладающий следующей совокупностью преимуществ.

1. Отсутствие скользящих электрических контактов, высокая надежность и долговечность.

2. Благоприятные механические и регулировочные характеристики, простота управления моментом и скоростью.

3. Высокая кратность пускового момента, малая механическая постоянная времени, хорошая динамика.

4. Хорошие энергетические показатели, благодаря применению современных постоянных магнитов.

5. Улучшенные условия теплоотвода.
6. Высокие удельные показатели по развиваемому длительному моменту на единицу массы двигателя.

#### **14.2. Двигатель постоянного тока с полупроводниковым коммутатором – вентильный двигатель**

Коллектор и щеточный аппарат машины постоянного тока составляют узел, вызывающий трудности при проектировании, изготовлении и эксплуатации машины (см. разд. 4.3, с. 45, сл.). Этот узел возможно заменить бесконтактным коммутатором тока, выполненным на основе управляемых полупроводниковых электрических вентилей.

Возможны два исполнения двигателей постоянного тока с полупроводниковым коммутатором.

В обоих исполнениях обмотка якоря вместе с полупроводниковым коммутатором располагается на неподвижной части машины (статоре), а индуктором является ротор машины. Но в первом варианте исполнения на роторе размещаются полюсы в виде постоянных магнитов; во втором – размещаются электромагниты с обмоткой, подключённой к источнику постоянного тока через контактные кольца.

Активная часть такого двигателя с полупроводниковым коммутатором подобна обращённой активной части двигателя постоянного тока независимого возбуждения общепромышленного назначения.

Двигатель с полупроводниковым коммутатором возбуждаемый полем, создаваемым постоянными магнитами, полностью лишен скользящих электрических контактов – это бесконтактный двигатель. Именно такой двигатель схематически изображён на рис. 14.2.

Для наглядности рассматривается двухполюсный двигатель, то есть на роторе  $1$  расположена одна пара постоянных магнитов  $6$  (**N-S**). Обмотка якоря  $2$ , расположена на статоре и состоит из двенадцати секций, образующих замкнутую систему. Точки соединений секций (на рис. 14.2 они выделены красным цветом) подключены к бесконтактным переключателям  $3$ , выполняющим функцию пластин механического коллектора и щёток. Каждый из переключателей  $3$  состоит из пары транзисторов (например,  $VT1'$  и  $VT1''$ ,  $VT2'$  и  $VT2''$  и т. д.). Эти переключатели соединяют обмотку якоря с источником постоянного тока.

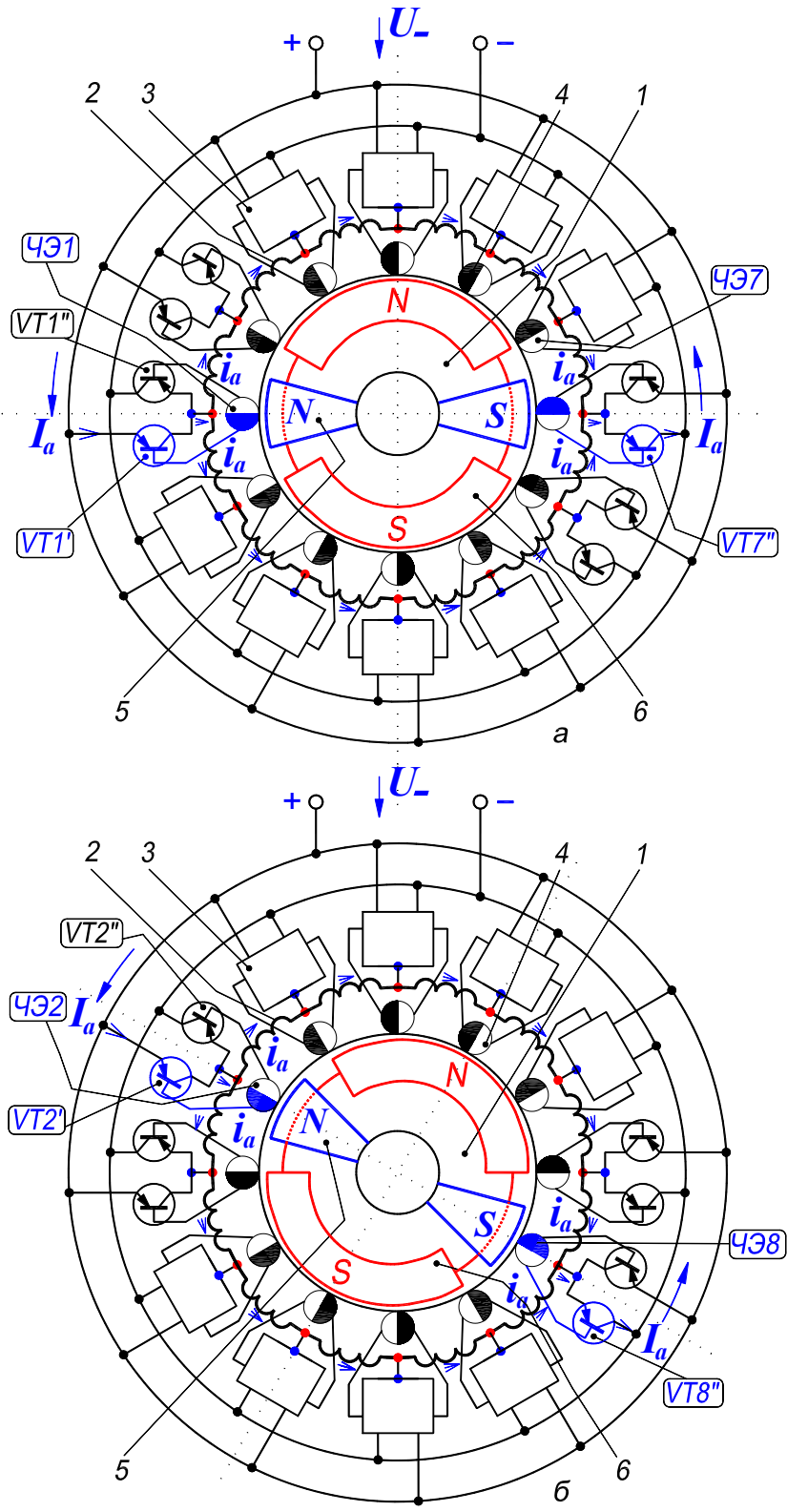


Рис. 14.2. Схема двигателя постоянного тока с полупроводниковым коммутатором:  
 а – открыты транзисторы  $VT1'$  и  $VT7''$ ; б – открыты транзисторы  $VT2'$  и  $VT8''$

Эмиттер одного из транзисторов (например,  $VT1'$ ,  $VT2'$  и т. д.) каждого переключателя 3 подключен к положительной шине источника питания, а коллектор другого (например,  $VT1''$ ,  $VT2''$  и т. д.) – к отрицательной шине. Общая точка переключателя (коллектор первого транзистора  $VT1'$  и эмиттер второго транзистора  $VT1''$ ; на рис. 14.2 эти точки выделены синим цветом) соединена с точкой соединения соответствующих секций обмотки (красный цвет точек). Каждый из переключателей 3 управляется своим чувствительным элементом 4, закрепленным неподвижно на статоре. Чувствительные элементы 4 возбуждаются от намагниченных секторов ротора 5. При этом, например, если к чувствительному элементу ЧЭ1 приближен сектор с намагниченностью  $N$  (положение ротора на рис. 14.2,а), то сигнал с чувствительного элемента открывает транзистор  $VT1'$ , эмиттер которого соединён с положительной шиной источника питания. В том же положении ротора к чувствительному элементу ЧЭ7 приближен сектор, имеющий намагниченность  $S$ , и сигнал с чувствительного элемента ЧЭ7 открывает транзистор  $VT7''$ , коллектор которого подсоединён к отрицательной шине. Тогда по обмотке якоря протекает ток  $i_a = I_a/2$ , создающий поток реакции якоря  $\Phi_a$  (на рис. 14.2 не показан). За счёт взаимодействия поля якоря и поля полюсов ротора  $N-S$  возникнет электромагнитный момент  $M$ , под действием которого ротор будет поворачиваться по часовой стрелке на  $1/12$  оборота и перейдёт в положение, показанное на рис. 14.2,б. При этом в открытом состоянии уже будут транзисторы  $VT2'$  и  $VT8''$ , а транзисторы  $VT1'$  и  $VT7''$  – в закрытом. Опять под действием момента  $M$  ротор поворачивается далее на  $1/12$  оборота. В результате такого согласованного с вращением ротора переключения транзисторов рассматриваемая машина работает подобно нормальному двигателю постоянного тока и имеет практически такие же характеристики.

Включение и отключение транзисторов производится посредством устройства, обеспечивающего подачу на их управляющие электроды импульсов электрического напряжения с соответствующей длительностью. Эти импульсы вырабатываются чувствительными элементами (ЧЭ), реагирующими на положение ротора. В простейшем случае, представленном на рис. 14.2, такое устройство состоит из вспомогательного постоянного магнита 5 (секторы  $N$  и  $S$ ), укрепленного на роторе 1 в его торце, и из укреп-

ленных на статоре, по его окружности, катушек (чувствительные элементы 4), число которых равно числу секций обмотки якоря 2. Постоянный магнит (секторы **N** и **S**) при вращении ротора индуцирует поочередно в катушках ЭДС, которые подаются на управляющие электроды тиристоров.

Таким образом, система, состоящая из неподвижных чувствительных элементов 4, равномерно распределенных по окружности, переключателей 3 и двух симметричных сигнальных секторов 5 (**N** и **S**), выполняет функцию механического коллектора и щеток коллекторного двигателя. Угловое взаимное расположения чувствительных элементов в данном случае соответствует  $30^\circ$  ( $2\pi/S$ , где  $S$  – число секций обмотки якоря 1). Для того чтобы исключить "мертвые" положения ротора, когда обмотка не может быть подключена к источнику питания, угловой размер каждого сигнального сектора 5 должен быть равен также  $30^\circ$ . В рассмотренном случае магниты 6 (**N-S**) ротора 1 ориентированы по отношению к осям секторов 5 (**N** и **S**) так, как это показано на рис. 14.2.

Выше рассмотрены основные вопросы, связанные с бесконтактным двигателем постоянного тока с полупроводниковым коммутатором; он называется вентильным двигателем (термины 4 и 6, с. 17). Детальное рассмотрение теоретических и практических вопросов изложено в [13,19].

Практика использования вентильных двигателей определила целесообразные области их применения.

Вентильные двигатели малой мощности с постоянными магнитами и транзисторным инвертором напряжения нашли широкое распространение в приводах устройств автоматики, робототехники, приборов магнитной записи и звуковоспроизведения, механизмов подачи станков и в другой аппаратуре.

Разработаны серии вентильных двигателей средней мощности с преобразователями со звеном постоянного тока и инвертором тока и с непосредственными преобразователями частоты.

Вентильные двигатели большой мощности нашли применение там, где ранее использовались нерегулируемые асинхронные или синхронные двигатели [4,5], – для приводов насосов и компрессоров, для разгона мощных синхронных двигателей и гидрогенераторов.

## Литература

1. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 3. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. Изд. 2-е, переработ. и доп. М., “Энергия”, 1968. – 224 с.
2. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины. Учебник для вузов – М.– Л.: Госэнергоиздат. 1963. – 416 с.
3. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ. 2002. – 166 с.  
[http://zabudsky.ru/Trans\\_UP1\\_end\\_ZEI.pdf](http://zabudsky.ru/Trans_UP1_end_ZEI.pdf) (готовится новое издание)
4. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях. Ч. 2. Асинхронные машины. Учебное пособие для вузов. – М.: ООО “Мегаполис”. 2017. – 304 с.  
[http://zabudsky.ru/AD\\_UP2/1-2\\_UP2-AD\\_T.pdf](http://zabudsky.ru/AD_UP2/1-2_UP2-AD_T.pdf) <http://zabudsky.ru/16.html>
5. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях Ч. 3. – Синхронные машины. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: ООО “Мегаполис”, 2019. – 295 с.  
<http://zabudsky.ru/SMedit2-10feb2019end-INT-T.pdf>
6. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 120 с. <http://zabudsky.ru/Up1.html>
7. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ. 1999. – 141 с. <http://zabudsky.ru/Up2.html>
8. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 436 с.  
<http://zabudsky.ru/regreak.html>
9. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: Монография. – М.: ООО “Мегаполис”, 2018. – 355 с.  
[http://zabudsky.ru/Monograph\\_March2018site.pdf](http://zabudsky.ru/Monograph_March2018site.pdf)
10. Забудский Е.И. Учебно-методический комплекс по дисциплине “Электрические машины” (Интернет-реализация, <http://zabudsky.ru>)
11. 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>
12. Забудский Е.И. Шаговый двигатель. Устройство, принцип действия, назначение. Видеофильм – Мультимедиа – Учебное пособие. – М.: МГАУ, 2012. – 11 МБ (среда разработки: Macromedia Flash; AutoCAD) /После запуска: в меню VIEW установить “100%” и кликнуть по кнопке “Развернуть”/  
[http://zabudsky.ru/Sin-M\\_RAnchor/ShagDvig.exe](http://zabudsky.ru/Sin-M_RAnchor/ShagDvig.exe)

13. 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).
14. ГОСТ IEC 60034-1-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики.
15. ГОСТ 27471-87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
16. ГОСТ Р 52157-2003. Щётки электрических машин. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
17. ГОСТ 10159-79. Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1999.
18. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 2014.
19. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И. Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб.: Корона-Век, 2007. - 336 с.

### **URL-адреса предприятий, производящих ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

<b>URL-адрес</b>	<b>Наименование предприятия</b>
<a href="http://www.power-m.ru/">http://www.power-m.ru/</a>	Завод “Электросила”, г. Санкт-Петербург
<a href="http://elektrozavod.ru">http://elektrozavod.ru</a>	ОАО “Электрозавод”, г. Москва
<a href="http://www.vemp.ru">http://www.vemp.ru</a>	Владимирский электромоторный завод, г. Владимир
<a href="http://www.eldin.ru">http://www.eldin.ru</a>	Ярославский электромашиностроительный завод, г. Ярославль
...	...
<a href="http://www2.viniti.ru/">http://www2.viniti.ru/</a>	Всероссийский институт научной и технической информации РАН (ВИНИТИ РАН), г. Москва
<a href="http://nd.gostinfo.ru/">http://nd.gostinfo.ru/</a>	Российский научно-технический центр по стандартизации (СТАНДАРТИНФОРМ), г. Москва
<a href="http://www.rsl.ru/">http://www.rsl.ru/</a>	Российская государственная библиотека, г. Москва: в окно поиска вставить текст – author:(забудский евгений иванович)

## П1.1. Паскаль-программа

### “Расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения”

{Эта Паскаль-программа обеспечивает расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Исходные данные (**см. табл. 7.1, графа Измерение; с. 167**)

считываются из файла `mpt_rx_d.dat`.

Файл `mpt_rx_d.dat` формируется (редактируется) пользователем.

Результаты расчёта (табл. 7.1, графа Расчёт; с. 167) помещаются в файл `mpt_rx_r.txt`. Файл `mpt_rx_r.txt` создается турбосредой.

Обозначения физических величин (переменных), которые приняты в учебной литературе по дисциплине Электрические машины и в Паскаль-программе, совпадают}

```

var i, j          : integer;
    fi, fo1, fo2  : text;
    Ia, Ifn, n, lat, omega, M, P1, P2, kpd : array[1..30] of real;
    Un            : real;
begin
assign(fi, 'd:\ mpt_rx_d.dat'); reset(fi);
assign(fo1,'d:\ mpt_rx_r.txt');  rewrite(fo1);
assign(fo2,'d:\ mpt_rx_r.txt');  rewrite(fo2);
writeln(fo1, ' Паскаль-программа обеспечивает расчёт рабочих');
writeln(fo1, ' характеристик двигателя постоянного тока');
writeln(fo1, ' параллельного возбуждения');
writeln(fo1, ' =====');
write('1. Введите число точек на экспериментальной зависимости j = ');
read(j);
{Считывание исходных данных из файла mpt_rx_d.dat}
for i := 1 to j do read(fi,Ia[i], Ifn[i], n[i], lat[i]);
                    read(fi,Un);
{Расчёт рабочих характеристик двигателя}
for i := 1 to j do begin
omega[i] := (n[i] * 2*Pi / 60);
M[i] := 1.285 * lat[i];
P1[i] := Un * (Ia[i] + Ifn[i]);
P2[i] := M[i] * omega[i];
kpd[i]:= P2[i] / P1[i] ;
                    end;
{Вывод результатов в файл mpt_rx_r.txt}

```



```

{Вывод результатов в файл mpt_rx_r.dat,
этот файл предназначен для геометрической интерпретации}
writeln(fo1,' ФАЙЛ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА');
writeln(fo1);
writeln(fo1, ' Таблица 7.1, графа "ИЗМЕРЕНИЕ");
writeln(fo1, '
                (исходные данные)');
writeln(fo1, '-----');
writeln(fo1, 'la      lfn      n      lat  ');
writeln(fo1, '-----');
writeln(fo1, ' A      A      об/мин  A  ');
writeln(fo1, '-----');
for i := 1 to j do
writeln(fo1, la[i]:3:1,' ',lfn[i]:4:2,' ', n[i]:4:0,' ',lat[i]:4:2 );
writeln(fo1, '-----');
writeln(fo1);
writeln(fo1, ' Продолжение табл. 7.1, графа "РАСЧЕТ");
writeln(fo1, '(результаты расчёта рабочих характеристик двигателя)');
writeln(fo1, '-----');
writeln(fo1, 'omega  M  P1  P2  kpd  ');
writeln(fo1, '-----');
writeln(fo1, ' рад/с  Н·м  Вт  Вт  –  ');
writeln(fo1, '-----');
for i := 1 to j do      begin
writeln(fo1,omega[i]:5:1,' ', M[i]:5:3,' ', P1[i]:4:0,' ',
                P2[i]:6:1,' ',kpd[i]:4:1);
writeln(fo2, P2[i],' ',omega[i],' ', M[i],' ',P1[i],' ',kpd[i]) end;
writeln(fo1, '-----');
writeln(fo1);
writeln(fo1,'Copyright, кафедра Электроснабжение ');
writeln(fo1,'
                и Электрические машины, МГАУ, Москва. ');
writeln(fo1,'Паскаль-программу составил профессор Е.И.Забудский ');
writeln(fo1,'19 ноября 2000 года. ');
close(fi); close(fo1); close(fo2)
end.

```

Паскаль-программа обеспечивает расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения  
=====

ФАЙЛ mpt\_rx\_r.txt С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА

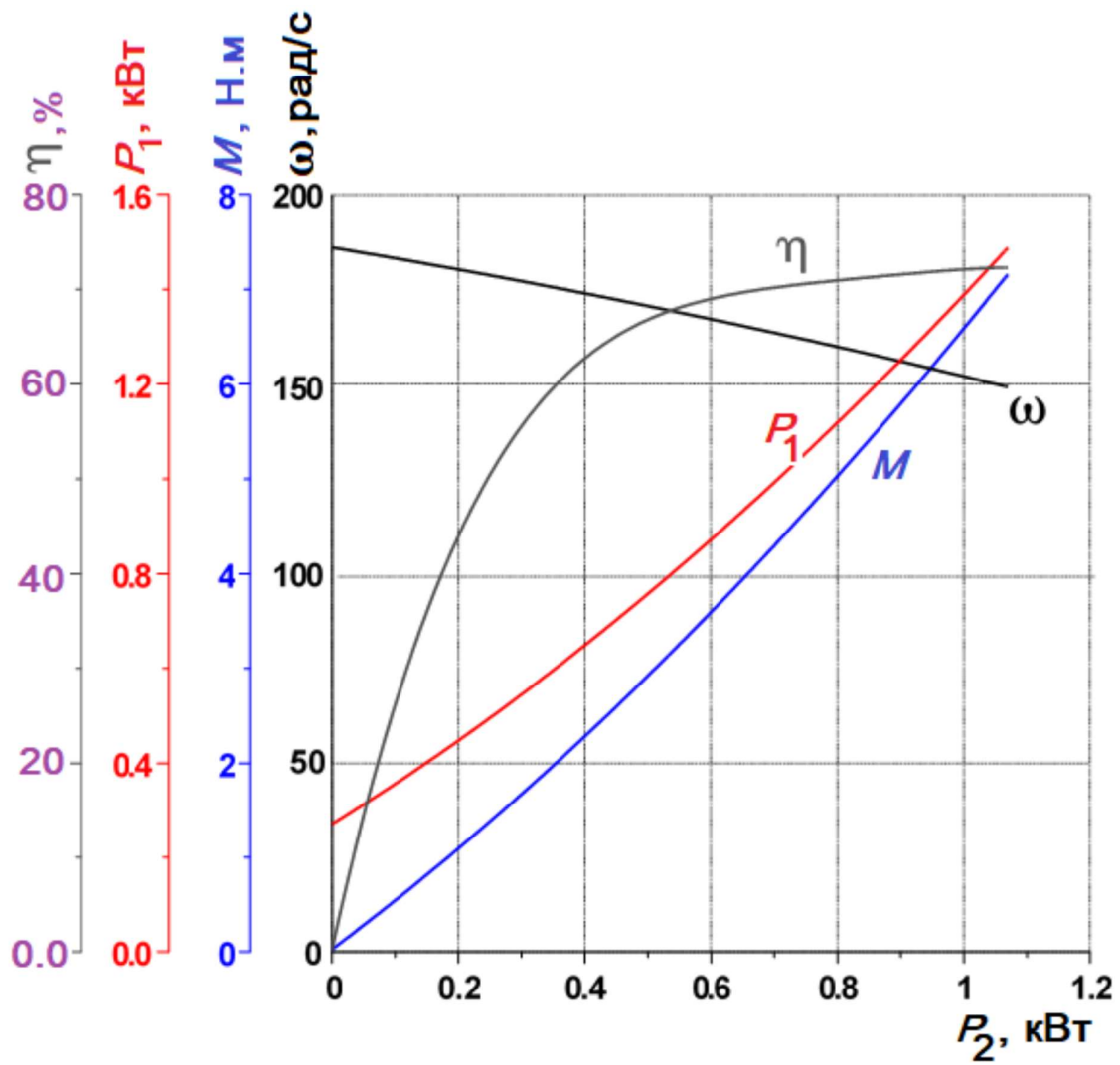
Таблица 7.1, графа "ИЗМЕРЕНИЕ"  
(исходные данные)

$I_a$	$I_{в.ном}$	$n$	$I_{a.т}$
А	А	об/мин	А
2.1	0.39	1780	0.00
4.3	0.39	1690	1.25
6.0	0.39	1640	2.00
8.1	0.39	1600	3.10
10.0	0.39	1500	4.00
11.8	0.39	1480	4.80
13.0	0.39	1420	5.60

Продолжение табл. 7.1, графа "РАСЧЕТ"  
(результаты расчёта рабочих характеристик)

$\omega$	$M$	$P_1$	$P_2$	$\eta$
рад/с	Н·м	Вт	Вт	%
186.4	0.000	274	0.0	0.0
177.0	1.606	516	284.3	55.1
171.7	2.570	703	441.4	62.8
167.6	3.983	934	667.4	71.5
157.1	5.140	1143	807.4	70.6
155.0	6.168	1341	955.9	71.3
148.7	7.196	1473	1070.1	0.726

© Кафедра Электроснабжение  
и Электрические машины, МГАУ, Москва.  
Паскаль-программу составил профессор Е.И. Забудский,  
19 ноября 2000 года.



Рабочие характеристики двигателя постоянного тока  
с параллельным возбуждением  
(графическая интерпретация результатов расчёта)

## **П1.2. Учебно-методический комплекс дисциплины “Электрические машины”.**

Интернет-ресурс (<http://zabudsky.ru>)

В этом приложении приводится текст доклада, сделанного проф. Забудским Е.И. на международной научной конференции:

Забудский Е.И. [Учебно-методический комплекс дисциплины “Электрические машины” /Интернет-реализация/](#) // International Conference “Modern (e-) Learning” (MeL 2011), June 20 - July 03, 2011, Varna (Bulgaria) / Сборник “Applicable Information Models”, ITHEA, Sofia, 2011. pp. 232-243.

URL-адрес – [http://zabudsky.ru/ZEI\\_Doklad\\_2011\\_BG.pdf](http://zabudsky.ru/ZEI_Doklad_2011_BG.pdf)

# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ ”ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ”

/ Интернет-реализация /

Е.И.Забудский

Россия, Москва, государственный агроинженерный университет

zei@inbox.ru

## Аннотация

Разработан учебно-методический комплекс дисциплины ”Электрические машины”. Комплекс включает программу дисциплины, учебные пособия с грифом УМО, описание и фотографии изготовленных лабораторных стендов, исходные тексты компьютерных программ, техническое задание и методические материалы по курсовой работе, слайд-фильм, гиперссылки на Интернет-ресурсы, etc.

Комплекс представлен в интернете ( <http://zabudsky.ru/> ).

## Введение

Электрические машины и трансформаторы представляют основную и важнейшую часть силового электрооборудования. Поэтому глубокое изучение их теории и практики является неотъемлемой составляющей процесса подготовки инженеров электриков и электроэнергетиков. Спецификой устройств, затрудняющей изучение, является сложность представления и понимания ”рабочего тела” устройств – магнитного поля. Кроме того, при относительной простоте конструкций, их представление на лекциях занимает много времени, и с помощью только традиционных средств не всегда является эффективным. Для устранения указанных проблем учебно-методический комплекс дисциплины включает среди прочего разработанные мультимедийные средства: компьютерные звуковые фильмы, в которых представлены в деталях конструкции устройств, дана интерпретация магнитного поля в пространственно-временном континууме, изложены элементы теории. Использование комплекса в учебном процессе преподавателями и студентами повышает эффективность изложения и усвоения дисциплины ”Электрические машины”.

## Учебно-методический комплекс

На рис. 1 представлен скриншот web-страницы с расположенным на ней учебно-методическим комплексом (УМК) дисциплины ”Электрические машины” (URL-адрес - <http://zabudsky.ru/index1.html>).

Далее приводится краткое описание и иллюстрации (рис. 2...6) некоторых методических материалов, к которым имеется доступ посредством гиперссылок на этой web-странице [1...8].

Спроектированы и изготовлены стенды к лабораторным работам по разделам курса ”Трансформаторы”, ”Синхронные машины”, ”Асинхронные машины” и ”Машины постоянного тока” (см. п. 7 УМК). Реализован фронтальный метод проведения работ.

Приведены фотографии и описание стендов (рис. 2). При *домашней подготовке* к занятиям, имея доступ к Интернету, студенты могут умозрительно и виртуально собрать соответствующую электрическую схему.

Опубликованы в электронном виде (и в твердом варианте) учебные пособия по указанным выше разделам курса, а также по разделу "Асинхронные машины", имеющие гриф УМО (см. п.п. 3...6 УМК). Приведены полные описания лабораторных работ, схемы, нормативные материалы, элементы теории, etc. (рис. 3).

Студенты имеют возможность просмотреть компьютерный слайд-фильм, в котором представлены результаты расчёта магнитного поля, выполненного методом конечных элементов в сильнонасыщенном устройстве трансформаторного типа – насыщающемся реакторе [8]. В фильме наглядно представлены изменение магнитных индукции, напряженности, проницаемости и векторного потенциала в пространстве и во времени, картина распределения силовых линий магнитного поля, результаты гармонического анализа, оформленные в виде гистограмм, etc. (рис. 4). В процессе работы студенты не только изучают характер распределения магнитного поля в пространстве и во времени, его зависимость от насыщения среды, от конфигурации области расчёта и пр., но и развивают абстрактное мышление, позволяющее мысленно представить и воссоздать картину распределения поля в различных типах электрических аппаратов и трансформаторов.

На web-странице имеются также ссылки на файлы с исходными текстами паскаль-программ (а также на *exe*-файлы) на основе которых осуществляется обработка эксперимента (см. п.п. 3...6 УМК), расчёт рабочих характеристик асинхронного двигателя (см. п. 7), выполняемый в рамках курсового проекта, etc. (рис. 5).

Ряд разработанных электронных материалов расположены в Интернете и непосредственно демонстрируются на лекциях и практических занятиях с помощью ноутбука и мультимедийного проектора. К ним относятся пять звуковых видеофильмов по конструкции и технологии сборки электрических машин (рис. 6) (см. п. 2.3 УМК); видеолекция по теме "Реакция якоря синхронной машины" (см. п. 2.7 УМК); видеоматериалы, иллюстрирующие в динамике создание вращающегося поля трёхфазной обмоткой (см. п. 2 УМК), процесс укладки и устройство якорной обмотки машины постоянного тока (см. п. 2.2 УМК) и др.

### **Заключение**

В результате использования преподавателями и студентами разработанного Учебно-методического комплекса дисциплины "Электрические машины" в его электронном варианте повышена эффективность изложения материала, достигнуто понимание студентами сложных вопросов теории и устройства электрических машин и трансформаторов.

## Литература

1. [Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств](#): Учебное пособие для вузов. - Ульяновск: УлГТУ, 1998.
2. [Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов](#): Учебное пособие для вузов. - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 1999.
3. [Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы](#). Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 2002. - 166 с.
4. [Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины](#). Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 2008. - 195 с.
5. [Забудский Е.И. Компьютерный фильм “Геометрическая интерпретация результатов расчёта магнитного поля в устройствах электромеханики”](#): Пакет компьютерных программ / Зарегистрирован в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Минобразования РФ. Регистр. № 94696, 16.02.94. [Сертификат № 3/93 от 10.09.93 г.](#)
6. Evgeny Zabudsky. [Lecturer’s web-site and its role in distance learning](#) // International Journal “Information Technologies and Knowledge” (IJ ITK), Vol. 1/2007, p. 279-281.
7. Забудский Е.И. [Учебно-методический комплекс дисциплины ”Объектно-ориентированный анализ и программирование на языке С#»](#) // Methodologies and Tools of the Modern (e-) Learning. International Book Series “INFORMATION SCIENCE & COMPUTING”, Number 8. Supplement to the International Journal “INFORMATION TECHNOLOGIES & KNOWLEDGE”. Volume 2 / 2008, p.117-122. Institute of Information Theories and Applications FOI ITHEA. Sofia, Bulgaria.
8. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 436 с. <http://zabudsky.ru/regreak.html>





## Продолжение скриншота (рис. 1)

10. **МОНОГРАФИИ, УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ, СТАТЬИ И ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ**, опубликованные на web-сайте ...
  - 10.1. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы: Учебное пособие – М.: МГАУ, 2002. - 168 с. (Полный текст пособия: [скачайте ...](#))
  - 10.2. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 2. Асинхронные машины: Учебное пособие – М.: РГАУ-МСХА, 2017. - 278 с.(Полный текст пособия: [скачайте ...](#))
  - 10.3. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины: Учебное пособие – М.: МГАУ, 2008. - 196 с.(Полный текст пособия: [скачайте ...](#))
  - 10.3а Забудский Е.И. Электрические машины: учебное пособие для вузов/ В 4 ч. Ч. 3. 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Синхронные машины: / Е.И. Забудский, ООО "Мегаполис", 2019. – 295 с. .
  - 10.4. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч.4. Машины постоянного тока: Учебное пособие – М.: МГАУ, 2011. - 217 с.(Полный текст: [скачайте ...](#))
  - 10.5. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. - Ульяновск: УлГТУ, 1998. - 120 с.
  - 10.6. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 1999. - 141 с.
  - 10.7. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. - Москва: Энергоатомиздат, МГАУ, 2003. - 436 с.
  - 10.7а. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. - Москва: Энергоатомиздат, МГАУ, 2003. - 436 с. (полный текст книги, pdf-формат)
  - 10.8. Забудский Е.И. Расчёт основных размеров трёхфазных трансформаторов: Учебное пособие для вузов. 3-е изд. Москва: РГАУ-МСХА им. К.С. Тимирязева, 2014. – 56 с.
11. Забудский Е.И. Комплекс математических моделей и компьютерных программ для расчета электромагнитных полей и режимов ферромагнитных устройств.
12. Забудский Е.И. Пакеты компьютерных программ, зарегистрированных в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Минобразования России.
13. Забудский Е.И. Компьютерный фильм "Геометрическая интерпретация результатов расчета магнитного поля в устройствах электромеханики" (сертификат №3/93).
14. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов вузов. - Л.: Энергия, 1974. - 840 с.
15. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики. Учебник для студентов вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 368 с.
16. Проектирование электрических машин. Учебник / И.П. Копылов и др. - М.: Высшая школа, 1980.
17. Кенно Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 200 с.
18. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 525 с.



Рис. 1. Учебно-методический комплекс дисциплины Электрические машины: скриншот web-страницы <http://zabudsky.ru/index1.html>

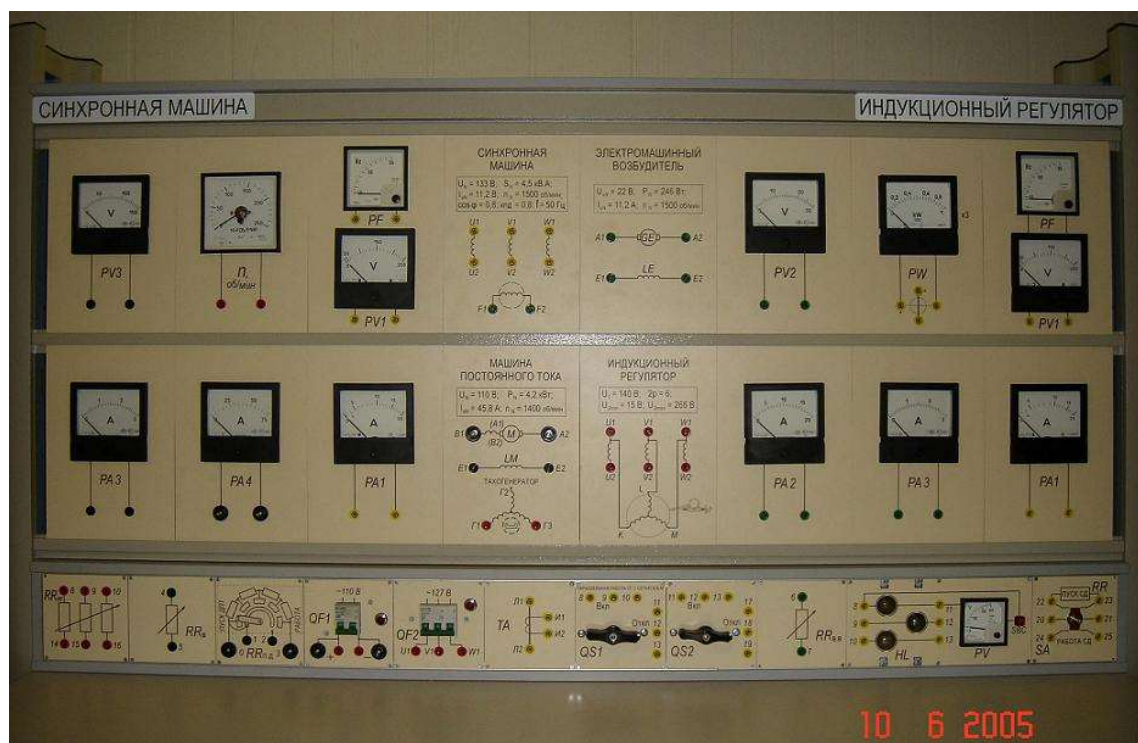
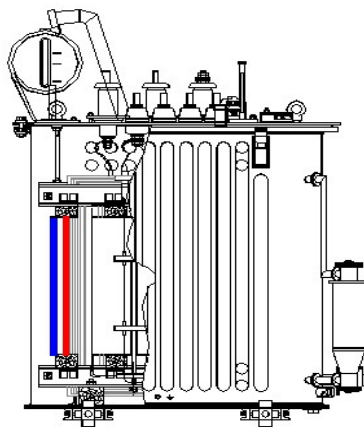


Рис. 2. Приборная панель лабораторного стенда "Синхронная машина" (<http://zabudsky.ru/CM.html>)

# Электрические машины

## Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

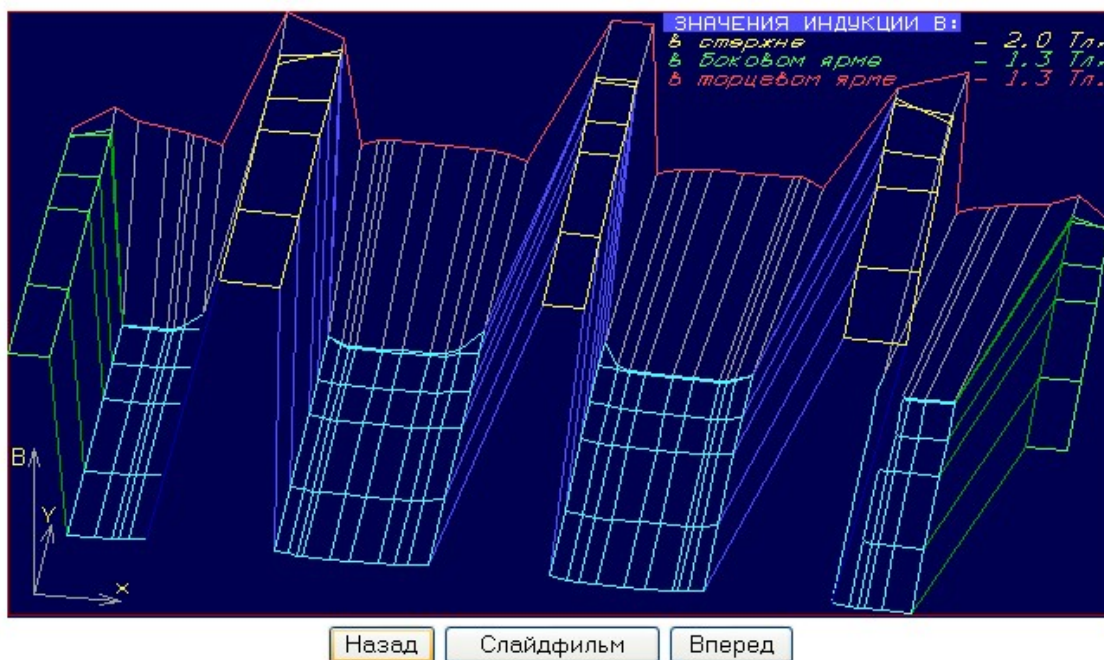


МОСКВА \* 2002 \* МГАУ

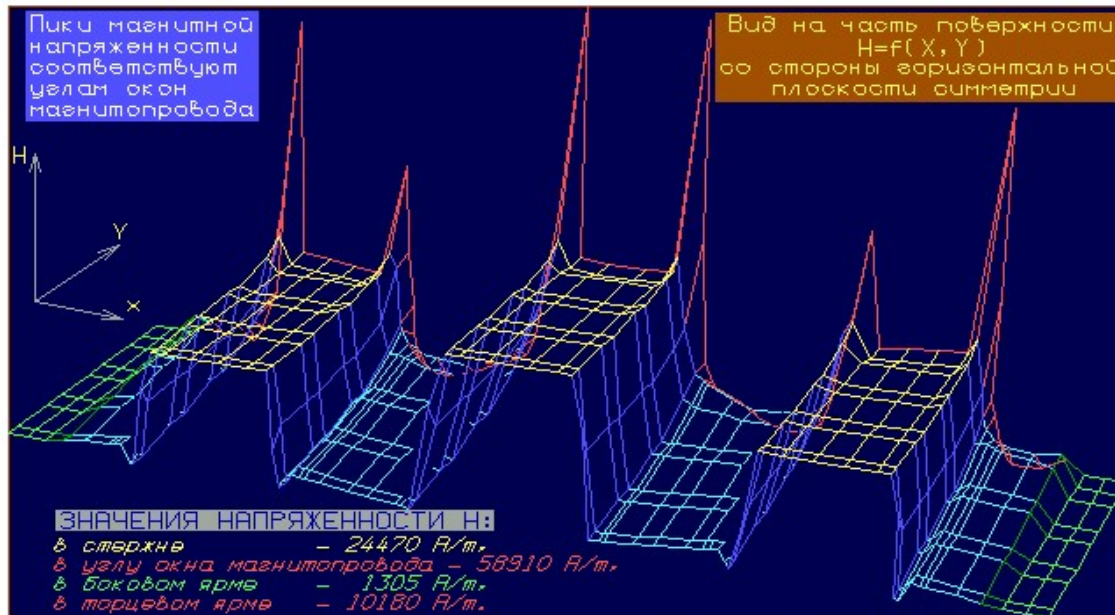
### Содержание

<u>ВВЕДЕНИЕ</u> .....	4
1. <u>Термины и определения</u> .....	6
2. <u>Буквенные обозначения элементов в электрических схемах</u> .....	13
3. <u>Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов</u> .....	14
4. <u>Условное обозначение трансформаторов</u> .....	16
5. <u>Номинальные данные и устройство исследуемого трансформатора</u> ...	18
6. <u>Работа №1</u>	
<u>ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБОМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР</u> .....	20
7. <u>Работа №2</u>	
<u>ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ</u> .....	37
8. <u>Работа №3</u>	
<u>НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ</u> .....	55
9. <u>Работа №4</u>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА .....	68
<u>ЛИТЕРАТУРА</u> .....	98
<u>URL-адреса предприятий, производящих электрические машины и трансформаторы</u> .....	98
<u>URL-адрес РАО ЕЭС "Россия"</u> .....	98
<b>Приложения:</b>	
1. Паскаль-программа "Расчет характеристик холостого хода трансформатора" .....	99
2. Трансформаторы специального назначения .....	102
3. <u>Форма отчета по Лабораторной работе (образец оформления)</u> .....	141

Рис. 3. Учебное пособие Электрические машины, ч.1, Трансформаторы: скриншот web-страницы <http://zabudsky.ru/soderghanie.html>

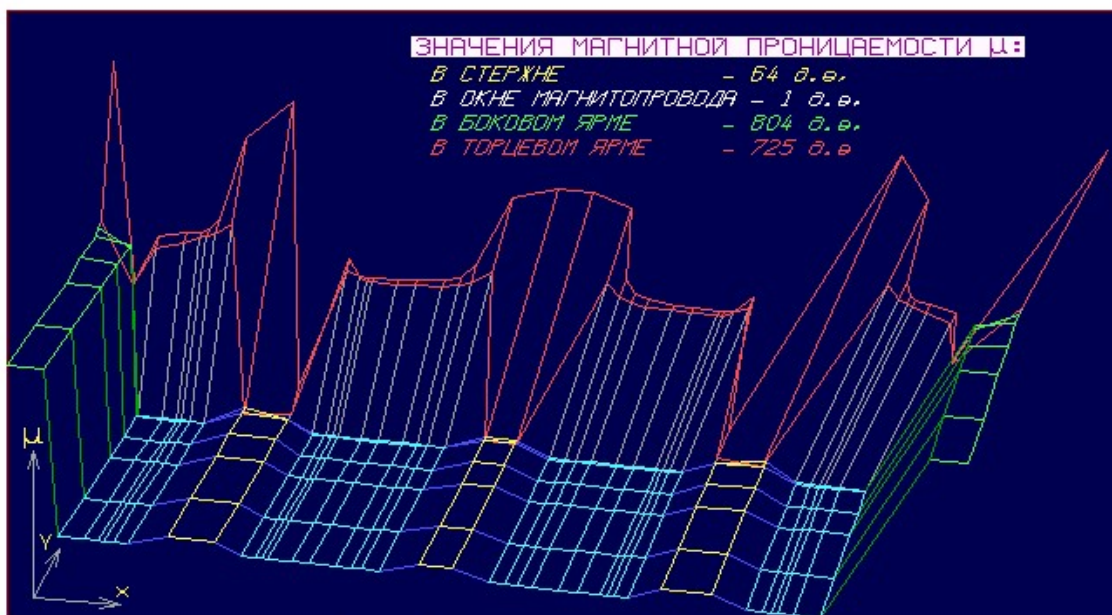


*a*

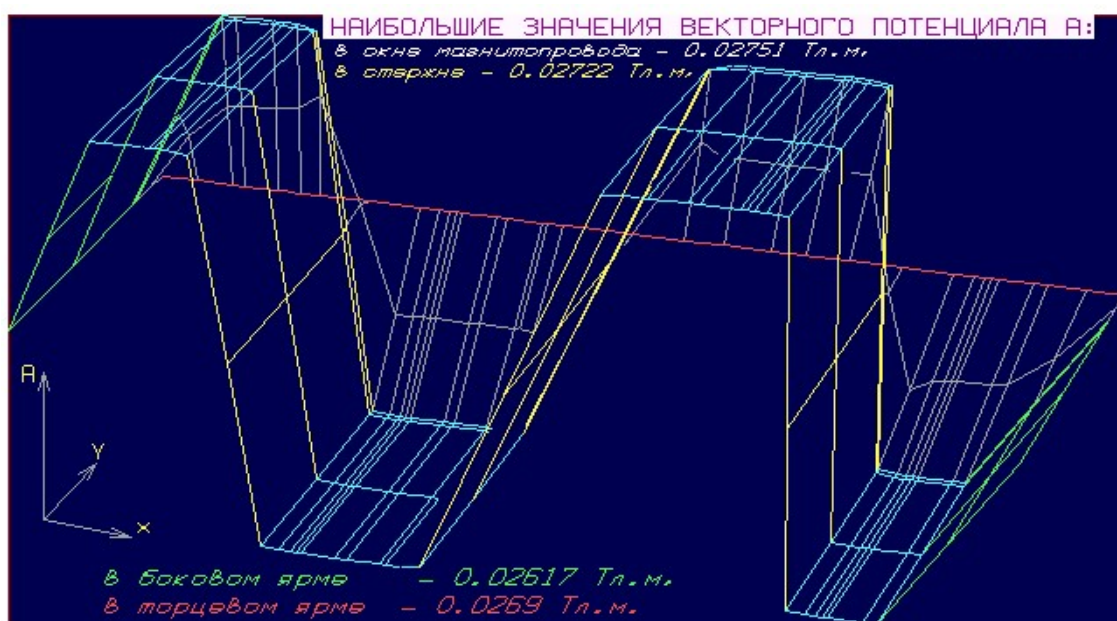


*б*

**Рис. 4, лист 1. Картины пространственного распределения:**  
*a* – индукции магнитного поля; *б* – напряженности магнитного поля  
 (кадры слайд-фильма)



*a*



*б*

**Рис. 4, лист 2. Картины пространственного распределения:**

*a* – магнитной проницаемости стали магнитопровода;

*б* – векторного магнитного потенциала (кадры слайд-фильма)

(<http://zabudsky.ru/filmr/film.html>)

**Результаты расчёта рабочих характеристик  $I_1, \eta, \cos \varphi, s = f(P_2)$   
асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

**Таблица 1. Исходные данные**

$P_{2,ном} = 15.00$ кВт	$U_{1,ном} = 220/380$ В	$I_{1,ном} = 28.40$ А
$P_{ст} = 0.369$ кВт	$P_{мех} = 0.117$ кВт	$I_{0a} = 0.520$ А
$I_{0p} = 7.910$ А	$r_1 = 0.355$ Ом	$r_2' = 0.186$ Ом
$c_1 = 1.025$	$a' = 1.051$	$a = 0.364$ Ом
$b' = 0.000$	$b = 1.650$ Ом	<b><math>s_{ном} = 0.024</math></b>

**Таблица 2. Результаты расчёта**

#	$s$	-	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	<b>0.024</b>
2	$R$	Ом	39.46	19.91	13.40	10.14	8.18	6.88	<b>8.51</b>
3	$X$	Ом	1.650	1.650	1.650	1.650	1.650	1.650	<b>1.650</b>
4	$Z$	Ом	39.50	19.98	13.50	10.27	8.35	7.08	<b>8.67</b>
5	$I_2''$	А	5.57	11.01	16.30	21.42	26.35	31.09	<b>25.38</b>
6	$\cos\varphi_2'$	-	0.999	0.997	0.993	0.987	0.972	0.980	<b>0.982</b>
7	$\sin\varphi_2'$	-	0.042	0.083	0.122	0.161	0.198	0.233	<b>0.190</b>
8	$I_{1a}$	А	6.09	11.49	16.70	21.66	26.35	30.76	<b>25.44</b>
9	$I_{1p}$	А	8.14	8.82	9.90	11.35	13.12	15.16	<b>12.74</b>
<b>10</b>	<b><math>I_1</math></b>	А	10.17	14.49	19.41	24.45	29.44	34.29	<b>28.45</b>
11	$I_2'$	А	5.71	11.29	16.71	21.95	27.01	31.87	<b>26.02</b>
12	$P_1$	кВт	4.02	7.59	11.02	14.30	17.39	20.30	<b>16.79</b>
13	$P_{\Sigma 1}$	кВт	0.11	0.22	0.40	0.64	0.92	1.25	<b>0.86</b>
14	$P_{\Sigma 2}$	кВт	0.02	0.07	0.16	0.27	0.41	0.57	<b>0.38</b>
15	$P_{доб}$	кВт	0.02	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	<b>0.08</b>
16	$\Sigma P$	кВт	0.63	0.82	1.10	1.46	1.90	2.41	<b>1.81</b>
<b>17</b>	<b><math>P_2</math></b>	кВт	3.38	6.77	9.92	12.83	15.49	17.89	<b>14.98</b>
<b>18</b>	<b><math>\eta</math></b>	-	0.842	0.892	0.900	0.898	0.891	0.881	<b>0.892</b>
<b>19</b>	<b><math>\cos\varphi</math></b>	-	0.599	0.795	0.860	0.886	0.895	0.897	<b>0.894</b>

**Номинальные данные спроектированного двигателя:**

$$P_{2,ном} = 15 \text{ кВт}, U_{1,ном} = 220/380 \text{ В}, I_{1,ном} = 28.4 \text{ А},$$

$$\cos \varphi_{ном} = 0.894, \eta_{ном} = 0.892.$$

**Рис. 5. Текст файла с результатами расчёта рабочих характеристик**

[/http://zabudsky.ru/Technical\\_Requirement\\_AD.pdf/](http://zabudsky.ru/Technical_Requirement_AD.pdf)

(в качестве теста приняты данные, изложенные в книге: Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 2002. – С.467)

Продолжение (к рис. 5)

**Методические рекомендации студенту-расчётчику по анализу результатов:**

- 1) сравнить рассчитанное значение мощности  $P_2$  на валу двигателя (см. в табл. 2 строку 17) с заданным значением  $P_2$  (см. Задание);
- 2) сравнить рассчитанные значения КПД и коэффициента мощности (см. в табл. 2 строки 18 и 19) с принятыми значениями (см. Задание).

Если рассчитанные величины отличаются от заданных более чем на 15 %, то необходимо внести коррективы в расчёт и выполнить его еще раз.



а



б

Рис. 6. Скриншоты кадров компьютерного видеофильма

“**Конструкция и технология электрических машин. Часть 1. Трансформаторы**”:

а – заставка фильма; б – фотография трансформатора, установленного на Асуанской ГЭС

*Учебное издание*

**Забудский Евгений Иванович**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Часть 4. Коллекторные машины  
постоянного и переменного тока**

Учебное пособие для вузов

В четырёх частях

Издается в авторской редакции

Дизайн обложки      *Полина Шапошникова*

Подписано в печать 05.02.2020. Формат 70x100/16  
Усл.-печ. л. 18,38. Тираж 150 экз. Заказ № 79

ООО “Мегаполис”  
[www.m-megapolis.ru](http://www.m-megapolis.ru)  
Тел.: 8 (495) 643-28-71  
E-mail: [zakaz@m-megapolis.ru](mailto:zakaz@m-megapolis.ru)  
127550, Москва, ул. Прянишникова, 23 А

Отпечатано в ПАО “Т8 Издательские Технологии”  
Тел.: +7 (499) 322-38-31  
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5