

УДК 621.314.263

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДЖ. К МАКСВЕЛЛА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Забудский Евгений Иванович, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени И.Ф.Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева*

**Аннотация.** Разработан 3-фазный утроитель частоты для питания высокоскоростного электропривода, состоящий из 3-х одинаковых модулей. Исследовано распределение магнитного поля в пространственно-временном континууме, установлены рациональные соотношения размеров магнитной системы и приняты проектные решения, оптимизирующие устройство.

**Ключевые слова:** утроитель частоты, магнитное поле, метод конечных элементов, математическая модель, электропривод.

Разработан утроитель частоты, его активная часть состоит из магнитной системы и трехфазных совмещенной первичной обмотки (СО) и вторичной обмотки (Авт. свид. 1663721). Утроитель содержит 3 одинаковых модуля, связанных между собой гальванически. Модуль включает 3-стержневой магнитопровод и 5 катушек разных фаз СО и 3 катушки вторичной обмотки (рис. 1,а; катушки вторичной – не показаны). Каждая фаза СО состоит из 5 последовательно соединенных катушек, отношение чисел их витков составляет  $w_M:w_C:w_B:w_C:w_M = 0,395:0,743:1:0,743:0,395$ . Катушки с витками  $w_B$  и  $w_C$  являются основными,  $w_M$  – фазосдвигающими. Совмещенная обмотка выполняет функции двух обмоток: основной и фазосдвигающей. Принятые соотношения чисел витков катушек фаз СО, схема соединения катушек в фазе и расположение их на стержнях обуславливают создание симметричной 9-лучевой звезды векторов МДС стержней (рис. 1,б) и исключение из тока гармоник с номерами 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15. Это является существенно важным, так как утроитель работает на участке кривой намагничивания, расположенном за её «коленом». Устройство активной части обеспечивает выделение во вторичной обмотке третьей трёхфазной гармоники  $B_3$  магнитного поля (рис. 1,б и 2,д). Существенная нелинейность устройства определяет необходимость анализа на основе теории электромагнитного поля.

Модель электромагнитного поля Максвелла (Maxwell) при введении векторного потенциала  $\mathbf{A}$  и калибровки Кулона аналитически преобразуется к векторному уравнению в частных производных, используемому для расчёта поля:

$$\nabla \times ((1/\mu_a) \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} - \gamma \partial \mathbf{A} / \partial t, \quad (1)$$

где  $\nabla$  – вектор-оператор;  $\mu_a$  – магнитная проницаемость;

$\gamma$  – удельная электропроводимость;

$\mathbf{J}$  и  $\gamma \partial \mathbf{A} / \partial t$  – векторы плотности тока проводимости и вихревого;

символ « $\times$ » – знак операции векторного произведения [1].

Для решения (1) применен метод конечных элементов (КЭ). Согласно методу потенциал  $A(x,y,t)$  аппроксимирован дискретной моделью (рис. 1,а,з) и сформирована система нелинейных алгебраических уравнений; решена методом Ньютона на ПК по программе относительно значений потенциала (Рег. № 94698, ОФАП НИИВО Минобразования РФ).

Результаты решения: 1) рассчитаны значения магнитной индукции  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B$ , напряженности  $H$  и проницаемости  $\mu_a/\mu_0$  в КЭ на интервалах времени  $\Delta t$ ; 2) построены линии равного потенциала  $A(x,y) = \text{const}$  / линии поля (рис. 2,а); 3) реализован поиск зон с максимальной индукцией; 4) построены зависимости  $A = f(t)$ ,  $B = f(t)$ ,  $H = f(t)$  и  $\mu_a/\mu_0 = f(t)$  для заданных КЭ и выполнен гармонический анализ (рис. 2,з,д); 5) построены двумерные поверхности  $A = f(x,y)$ ,  $B = f(x,y)$ ,  $H = f(x,y)$  и  $\mu_a/\mu_0 = f(x,y)$  (рис. 2,б,в); 6) установлены рациональные размеры магнитопровода; 7) приняты проектные решения, оптимизирующие активную часть утроителя частоты.

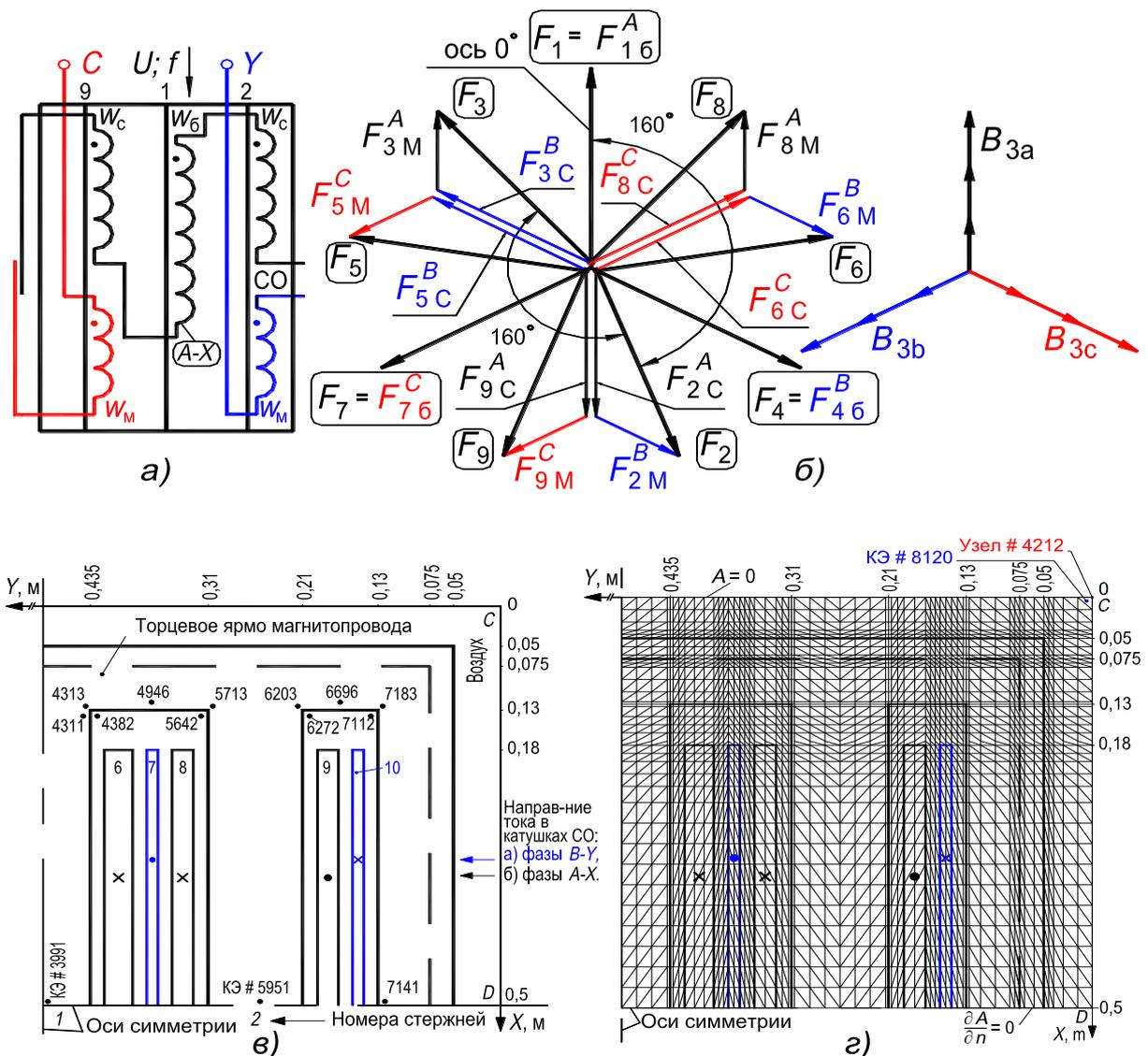
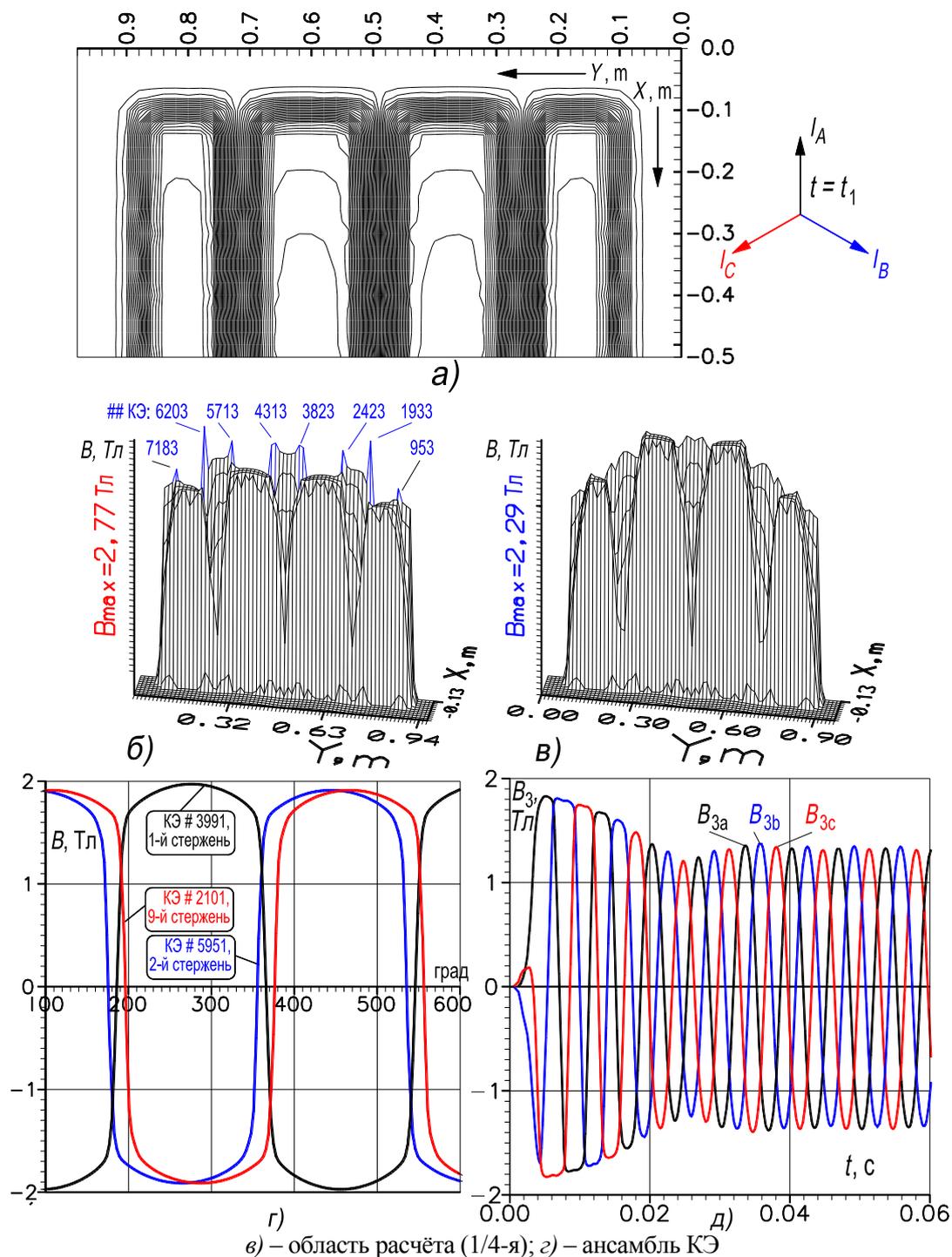


Рис.1. Утроитель частоты:

а) – схема модуля; б) – звезды векторов МДС и индукции

На рис. 1 представлены схема модуля утроителя, звезды векторов, область расчёта поля и ансамбль КЭ. На рис. 2 – результаты расчёта поля.



**Рис. 2. Результаты расчёта магнитного поля:**  
 а) – картина поля; б), в) – пространственное распределение индукции; г) – кривые индукции в стержнях;  
 д) – кривые третьей трёхфазной гармонике индукции

Получены результаты: 1) установлено рациональное соотношение сечений ярм и стержня (0,52 – 0,55), что определяет снижение материалоемкости (рис. 2,а); 2) предложено заполнять углы окон магнитопровода магнитным материалом (рис. 1,в и 2,а,б,в) для снижения потерь; 3) определены значения амплитуд гармоник индукции в магнитопроводе (рис. 2,г,д) и в зонах рассеяния и вытеснения потока (рис. 2,а), используемые для проектирования утроителя частоты.

### **Библиографический список**

1. Забудский, Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов / Е.И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2018. – 355 с.

УДК 621.313.04

### **ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕЩЕННЫХ ОБМОТОК**

*Забудский Евгений Иванович, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени И.Ф.Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева*

*Бычков Сергей Александрович, аспирант кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени И.Ф.Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева*

*Аннотация. В статье приведены результаты сравнительных испытаний двигателей со стандартными и совмещенными обмотками, произведен расчет экономического эффекта от повсеместной модернизации асинхронных электрических машин на территории г. Москвы по технологии совмещенных обмоток.*

*Ключевые слова: энергосбережение, совмещённая обмотка, асинхронный электродвигатель, энергоэффективность, технология, модернизация.*

Технология совмещенных обмоток представляет собой систему обмотки электрической машины, которая состоит из двух комплектов катушек: один комплект соединён по схеме «звезда», а другой по схеме «треугольник», между собой «звезда» и «треугольник» соединены параллельно (рис. 1). На практике также используются и другие схемы совмещённых обмоток [1-3].

Проведенные сравнительные испытания двигателя АИР100L6 заводского исполнения (ОК-2), и этого же двигателя, модернизированного по технологии совмещенных обмоток (ОКм-7), показали увеличение