

УДК 621.314

В.Г. Титов¹, А.И. Байков¹, А.Б. Баландин¹, И.А. Батырев¹, Д.В. Умяров²АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫПРЯМИТЕЛЕ
ДЛЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО КБ «Вымпел»²

Представлены результаты применения математического моделирования для анализа электромагнитных процессов в мощном двенадцатипульсном выпрямителе судовой энергетической системы.

Цель: Отработка методики применения математического моделирования для анализа электромагнитных процессов в мощном выпрямителе судовой энергетической системы с трёхобмоточным трансформатором.

Методы: Матричные методы анализа электрических и магнитных цепей, аналитическая аппроксимация кривых намагничивания, программирование в среде МАТЛАБ.

Вывод (результаты): Применены методы формирования и интегрирования дифференциальных уравнений, описывающие электромагнитные процессы в выпрямителе с учётом возможного насыщения трансформатора; разработан интерфейс МАТЛАБ, обеспечивающий возможность использования программ моделирования сторонними пользователями.

Пример: Показано определение входного описания схемы выпрямителя на 5400 кВА, проведён анализ характерных аномальных режимов, подтверждающие необходимость учёта процессов насыщения трансформатора.

Применение: Анализ электромагнитных процессов блока преобразования переменного тока в постоянный судовой энергетической системы.

Ключевые слова: судовой энергетическая система, математическое моделирование, трансформатор, схема замещения, кривая намагничивания, аналитическая аппроксимация, среда программирования МАТЛАБ.

Математическое моделирование является необходимым востребованным инструментом анализа электромагнитных процессов в электроустановках, обеспечивая принятие технических решений по выбору силовых элементов, схем и алгоритмов управления. Объекты, задачи и методы этого моделирования составляют достаточно обширную предметную область или среду, в которой должны эффективно ориентироваться специалисты-разработчики основного оборудования, не вникая в особенности построения математических моделей и тонкости программирования.

В настоящей статье представляется раздел системы моделирования судовой энергетической системы (СЭС) [1], касающийся узла преобразования переменного тока в постоянный. В них используются трёхфазные трёхобмоточные трансформаторы, у которых вторичная обмотка состоит из двух секций, включаемых по схеме «звезда» и «треугольник». Напряжения секций оказываются сдвинуты относительно друг друга по фазе на 30 эл. градусов. Подсоединённые к зажимам секций схемы выпрямления имеют пульсации, также сдвинутые на этот угол. При их последовательном соединении получается выпрямленное напряжение с увеличенным вдвое числом пульсаций, что благоприятно сказывается на улучшении качества преобразования энергии.

Естественными этапами моделирования являются ввод исходных данных об объекте, или его входное описание, выбор математической модели требуемого уровня детализации, определение параметров и особенностей процесса, его воспроизведение и, наконец, представление временных диаграмм, графиков и их обработка. Далее рассматриваются основные результаты разработки средств выполнения этих этапов применительно к указанным объектам СЭС.

Ввод входного описания объекта

Наиболее сложным звеном преобразования переменного напряжения уровня 6-10 кВ в напряжение постоянного тока, уровня 2200 В, в СЭС является трансформатор, который может представляться схемами замещения различной степени детализации процессов намагничивания. Эти схемы дополняются цепями замещения питающей сети, параллельно подключённых потребителей на стороне высокого напряжения и вентильной схемой выпрямления с подключёнными к ней фильтрами и цепями нагрузки на стороне низкого напряжения. На рис. 1 представлена схема замещения для одного из анализируемых вариантов исполнения объекта.

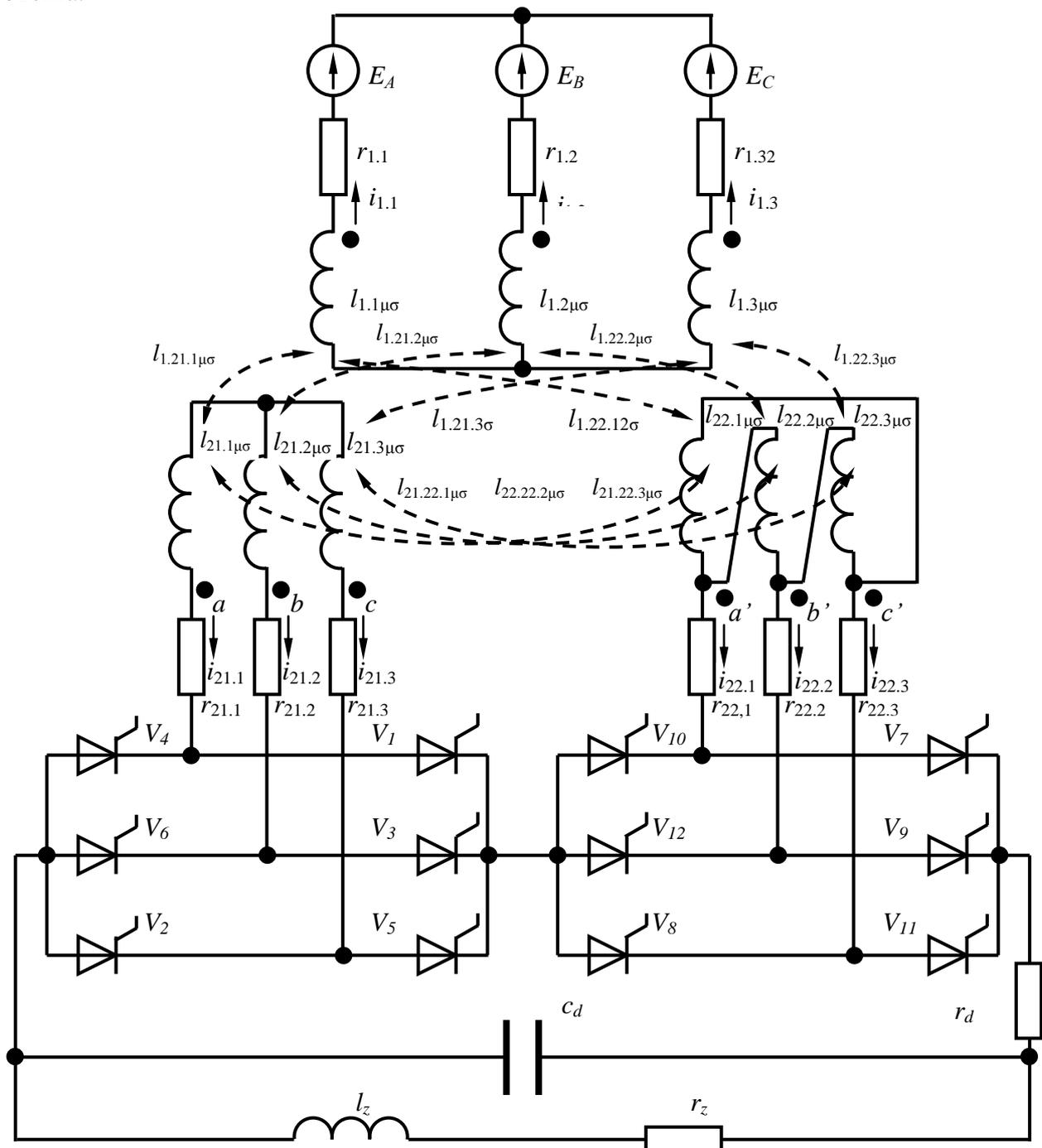


Рис. 1. Схема замещения трансформатора при учёте процессов намагничивания с цепями выпрямления, емкостного фильтра и эквивалентной нагрузки

Числа витков обмоток и основные геометрические параметры трансформатора можно определить в результате выполнения ряда процедур предварительного или рабочего проектирования, если отсутствуют достоверные справочные или каталожные данные. Например, по форме (рис. 2) задаются параметры трансформатора мощностью 5400 кВА. По нажатию кнопки запускается расчётный модуль, построенный на основе методики основных расчётных данных [2] и в рабочей области программной среды МАТЛАБ [3,4] формируются нужные для функционирования модели данные (табл. 1), в состав которых входят числа витков обмоток и размеры магнитопровода.

Расчёт исходных данных 3-х обмоточного трансформатора

Параметры трансформатора		Параметры питающей сети	
Мощность [кВА]	5400	Частота [Гц]	50
Линейное напряжение первичной обмотки [В]	6300	Доля падения напряжения в питающей сети	0
Напряжение короткого замыкания [%]	5		
Ток холостого хода [%]	1,2		
Потери короткого замыкания [В]	72900		
Линейное напряжение первой секции вторичной обмотки [В]	690		
Линейное напряжение второй секции вторичной обмотки [В]	690		

Рассчитать параметры

Рис. 2. Форма ввода основных исходных данных трансформатора

Таблица 1

Параметры трёхфазного трёхобмоточного трансформатора на 5400 кВА

Название параметра	Обозначения	Значения	Единицы измерения
РАСЧЁТНЫЕ ДАННЫЕ			
Мощность одной фазы трансформатора, кВ·А	S_f	1800	кВ·А
Номинальный линейный ток обмотки ВН	I_1	495	А
Диаметр сечения стержня	d_{st}	45	см
Площадь сечения стержня	S_{st}	1479	см ²
Высота стержня	l_{st}	225	см
ЭДС витка трансформатора	u_v	46,6	В
Число витков обмотки ВН	w_1	79	
Число витков 1 секции вторичной обмотки	w_{21}	9	
Число витков 2 секции вторичной обмотки	w_{22}	15	

Исходя из размеров стержней (табл. 1), подбираются значения, определяющие параметры индуктивностей и взаимоиндуктивностей рассеяния:

$$\begin{aligned} L_{1\sigma} &= \mu_0 W_1^2 \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 1}}{l_{s\sigma 1}} \frac{s_{\sigma 1}}{l_{s\sigma 1}} \frac{s_{\sigma 1}}{l_{s\sigma 1}} \right], L_{1,21\sigma} = \mu_0 W_1 W_{21} \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 1,21}}{l_{s\sigma 1,21}} \frac{s_{\sigma 1,21}}{l_{s\sigma 1,21}} \frac{s_{\sigma 1,21}}{l_{s\sigma 1,21}} \right]; \\ L_{1,22\sigma} &= \mu_0 W_1 W_{22} \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 1,22}}{l_{s\sigma 1,22}} \frac{s_{\sigma 1,22}}{l_{s\sigma 1,22}} \frac{s_{\sigma 1,22}}{l_{s\sigma 1,22}} \right], L_{21\sigma} = \mu_0 W_{21}^2 \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 21}}{l_{s\sigma 21}} \frac{s_{\sigma 21}}{l_{s\sigma 21}} \frac{s_{\sigma 21}}{l_{s\sigma 21}} \right]; \\ L_{22\sigma} &= \mu_0 W_{22}^2 \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 22}}{l_{s\sigma 22}} \frac{s_{\sigma 22}}{l_{s\sigma 22}} \frac{s_{\sigma 22}}{l_{s\sigma 22}} \right], L_{21,22\sigma} = \mu_0 W_{21} W_{22} \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 21,22}}{l_{s\sigma 21,22}} \frac{s_{\sigma 21,22}}{l_{s\sigma 21,22}} \frac{s_{\sigma 21,22}}{l_{s\sigma 21,22}} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

Где $s_{\sigma 1}$, $s_{\sigma 21}$, $s_{\sigma 22}$, $s_{\sigma 1,21}$, $s_{\sigma 1,22}$, $s_{\sigma 21,22}$ - площади сечений потоков рассеяния обмоток, собственных и взаимных; $l_{s\sigma 1}$, $l_{s\sigma 21}$, $l_{s\sigma 22}$, $l_{s\sigma 1,21}$, $l_{s\sigma 1,21}$, $l_{s\sigma 21,22}$ - длины силовых линий потоков рассеяния обмоток, собственных и взаимных.

Таким образом, получается матрица индуктивностей и взаимоиндуктивностей рассеяния:

$$L_{\sigma} = \begin{bmatrix} L_{1\sigma} & L_{1,21\sigma} & L_{1,22\sigma} \\ L_{1,21\sigma} & L_{21\sigma} & L_{21,22\sigma} \\ L_{1,22\sigma} & L_{21,22\sigma} & L_{22\sigma} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Подбор параметров для схемы рис. 1 выполняется в интерактивном режиме, исходя из значений, полученных в опытах коротких замыканий. Например, в случае симметрии параметров и значениях $l_{1\sigma}=0,0515$ Гн, $l_{21\sigma}=0,0007$ Гн, $l_{22\sigma}=0,0018$ Гн, $l_{1,21\sigma}=0,0058$ Гн, $l_{1,22\sigma}=0,0098$ Гн, $l_{21,22\sigma}=0,0011$ Гн, $r_1=0,0515$ Ом, $r_{21}=0,0003$ Ом, $r_{22}=0,0009$ Ом получены следующие значения параметров опытов:

- при питаемой первой секции вторичной и замыкаемой первичной обмотки

$$\begin{aligned} L_{k21,1} &= L_{21\sigma} - 2W_{21}W_1^{-1}L_{1,21\sigma} + (W_{21}W_1^{-1})^2 L_{1\sigma} = 1,47 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}, \\ R_{k21,1} &= R_{21} + (W_{21}W_1^{-1})^2 R_1 = 0,001 \text{ Ом}; \end{aligned} \quad (3)$$

- при питаемой второй секции вторичной обмотки и замыкаемой первичной

$$\begin{aligned} L_{k22,1} &= L_{22\sigma} - 2W_{22}W_1^{-1}L_{1,22\sigma} + (W_{22}W_1^{-1})^2 L_{1\sigma} = 2,04 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}, \\ R_{k22,1} &= R_{22} + (W_{22}W_1^{-1})^2 R_1 = 0,0028 \text{ Ом}; \end{aligned} \quad (4)$$

- при питаемой первой секции вторичной обмотки и замыкаемой второй секции

$$\begin{aligned} L_{k21,22} &= L_{21\sigma} - 2W_{21}W_{22}^{-1}L_{21,22\sigma} + (W_{21}W_{22}^{-1})^2 L_{22\sigma} = 7,36 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, \\ R_{k21,22} &= R_{21} + (W_{21}W_{22}^{-1})^2 R_{22} = 6,68 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (5)$$

Степень намагниченности, или насыщения ферромагнитных стержней предполагается учитывать с использованием аналитической аппроксимации кривой намагничивания стали магнитопровода гиперболическим синусом

$$h_{\mu i} = \alpha_i \sinh(\beta_i b_{\mu i}), \quad (6)$$

где $h_{\mu i}$, $b_{\mu i}$ – напряженность и индукция i -го стержня ($i=1,2,3$).

Коэффициенты аппроксимации подбираются по кривой намагничивания электротехнической стали из справочных данных. В частности, для кривой намагничивания листовой текстурованной стали Э330А толщиной 0.35 мм для этих коэффициентов можно принять значения $\alpha=1,05$ А/м, $\beta=4,4$ 1/Тл (рис. 3), при которых обеспечивается совпадение исходной и аппроксимированной кривых на рабочем участке до колена.

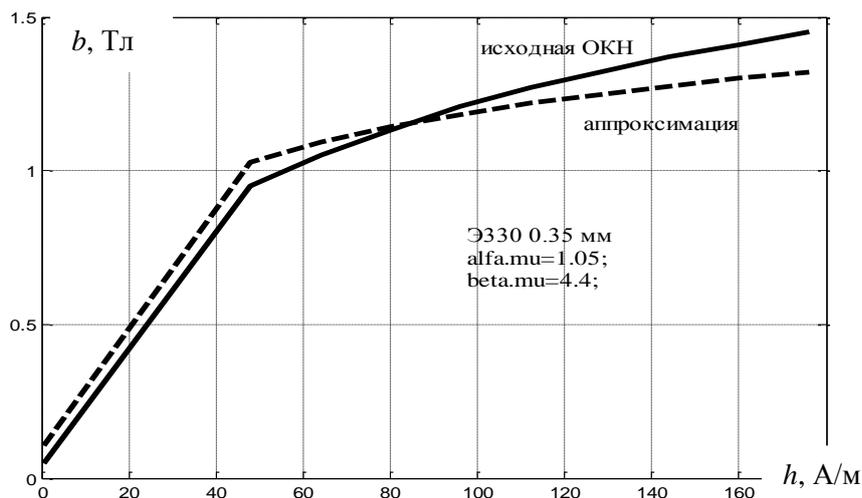


Рис. 3. Сопоставление исходной (—) и аппроксимированной (- -) кривых намагничивания стали Э330А 0,35 мм при $\alpha=1,05$ А/м, $\beta=4,4$ 1/Тл

Уравнения состояния выпрямителя

Математическая модель двенадцатипульсного выпрямителя СЭС предусматривает анализ электромагнитных процессов путём расчёта уравнений состояния - обыкновенных дифференциальных уравнений, составляемых для электрических и магнитных схем замещения относительно независимых токов, напряжений, индукций [5]. По усмотрению пользователя можно применять модели различных уровней детализации процессов перемагничивания трансформатора:

- 1) с учётом поля рассеяния включением в схему замещения соответствующих индуктивностей и идеальном намагничивании сердечников при отсутствии токов намагничивания;
- 2) с введением индуктивностей рассеяния и при идеальном симметричном намагничивании стержней без насыщения, с линейными кривыми намагничивания;
- 3) с учётом нелинейности кривых намагничивания, позволяющих воспроизводить насыщение магнитопровода.

На рис. 1 представлена схема замещения, реализуемая двумя последними моделями.

Отображение процессов переключений вентилях производится на основе формирования и интегрирования уравнений состояния по интервалам проводимости вентилях в соответствии с методом припасовывания. Для очередного интервала при известном сочетании открытых и закрытых вентилях производится анализ конфигурации схемы, в результате которого формируются топологические матрицы, позволяющие определить коэффициенты уравнений состояния. В случае математической модели, предусматривающей учёт процессов перемагничивания трансформатора с возможным насыщением, уравнение состояния имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{hl} &= L_{hl}^{-1} (E_{hl} - R_{hl} I_{hl}), \\ \frac{d}{dt} U_C &= C^{-1} I_C, \\ \frac{d}{dt} B_{\mu} &= R_{\mu\delta}^{-1} S_{\mu}^{-1} [W_1 \ W_{21} \ W_{22}] \frac{d}{dt} I_T, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где I_{hl} и B_{μ} - вектора [токов независимых контуров с индуктивностями схемы замещения на интервале и индукций ферромагнитных стержней; U_C и I_C – напряжения и токи емкостей; E_{hl}

– вектор контурных ЭДС; L_{hl} и R_{hl} – матрицы контурных индуктивностей и активных сопротивлений; C – диагональная матрица емкостей ветвей; $R_{h\mu\delta}$ – матрица контурных магнитных сопротивлений схемы замещения магнитной цепи, зависящая от значений индукций ферромагнитных стержней, имеющих площади поперечных сечений S_{μ} ; $I = H' I_h$ – токи ветвей электрической схемы замещения, в число которых входят ток ёмкости I_C и токи трансформатора I_T .

Постановка задачи анализа аномальных режимов

В процессе разработки новых электроустановок математическое моделирование наиболее востребовано для воспроизведения аномальных режимов, количественный анализ которых позволяет получить данные, необходимые для выбора схем и параметров силовой части, системы управления и защиты. К таким характерным режимам относятся: перегорание одного из вентилях, приводящее к разрыву одной из ветвей схемы, тепловой пробой вентиля, приводящий к внутреннему короткому замыканию в вентиляльной части схемы, перекося напряжений источника питания из-за нарушений в работе внешних цепей. Также представляет интерес переходный процесс заряда батарей конденсаторов фильтра при включении выпрямителя. Из-за большой величины ёмкости (0,064 Ф в случае мощности 5400 кВА); может возникать такой же бросок тока, как при внешнем коротком замыкании.

Перегорание (обрыв) вентиля (№1)

Воспроизведение переходного процесса при перегорании одного из вентилях в момент 0,12 с (рис.4) показало, что в этом процессе происходит резкое нарушение симметрии магнитного состояния трансформатора, возникает постоянная составляющая в токе намагничивания, имеющая тенденцию к увеличению. Снижается ток нагрузки, возрастают пульсации (с 3 до 48 %), Максимальные значения индукций в начале процесса увеличиваются с 1,42 до 1,48 Тл, т.е. рабочие точки по кривой намагничивания перемещаются за её колено.

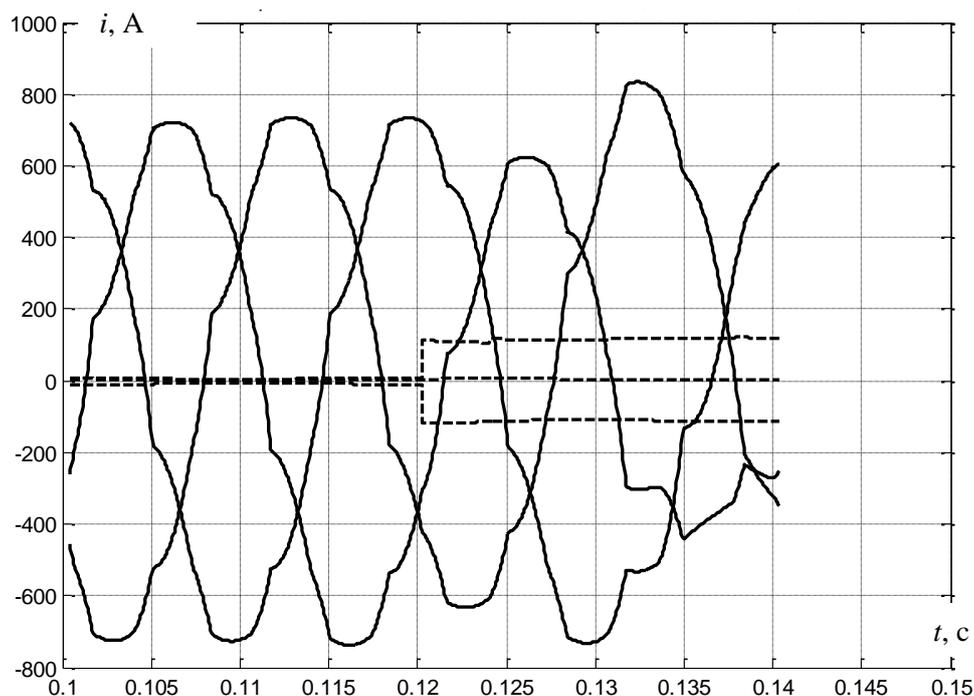


Рис. 4. Расчётная диаграмма токов первичной обмотки (—) и их намагничивающих составляющих (- - -) в переходном процессе при перегорании (обрыве) одного из вентилях

Внутреннее короткое замыкание из-за теплового пробоя

Внутреннее короткое замыкание, вызываемое тепловым пробоем одного из вентиляей, является тяжёлым аварийным режимом, прекращение которого требует ускоренного срабатывания защиты. Воспроизведение такого режима при тепловом пробое 12 вентиля во втором мосте показало (рис. 5), что ток первичной обмотки возрастает от 0,4 до 5 кА. Индукции возрастают до 1,8 Тл, рабочие точки на кривых намагничивания уходят в область глубокого насыщения, о чём свидетельствует временная диаграмма напряженностей магнитного поля в стержнях (рис. 6).

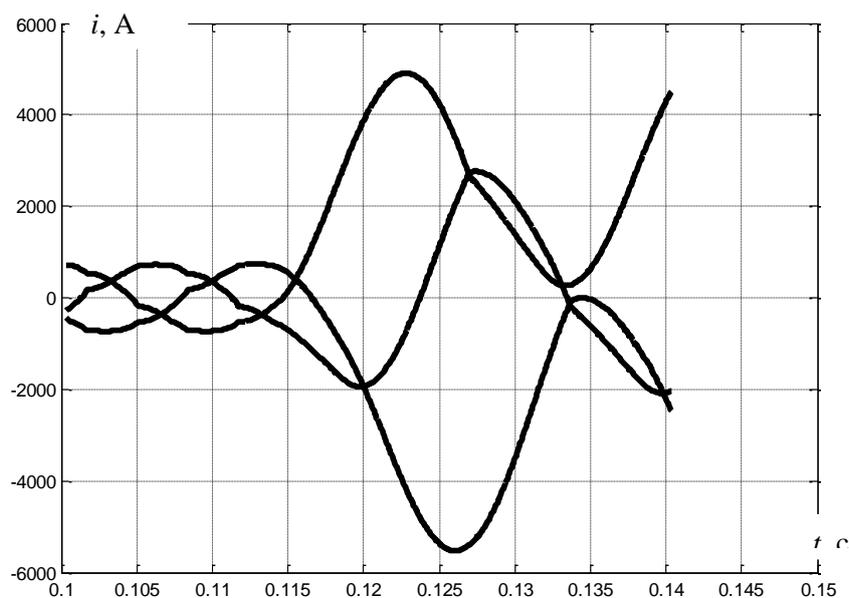


Рис. 5. Расчётная диаграмма токов питающей сети при возникновении теплового пробоя вентиля

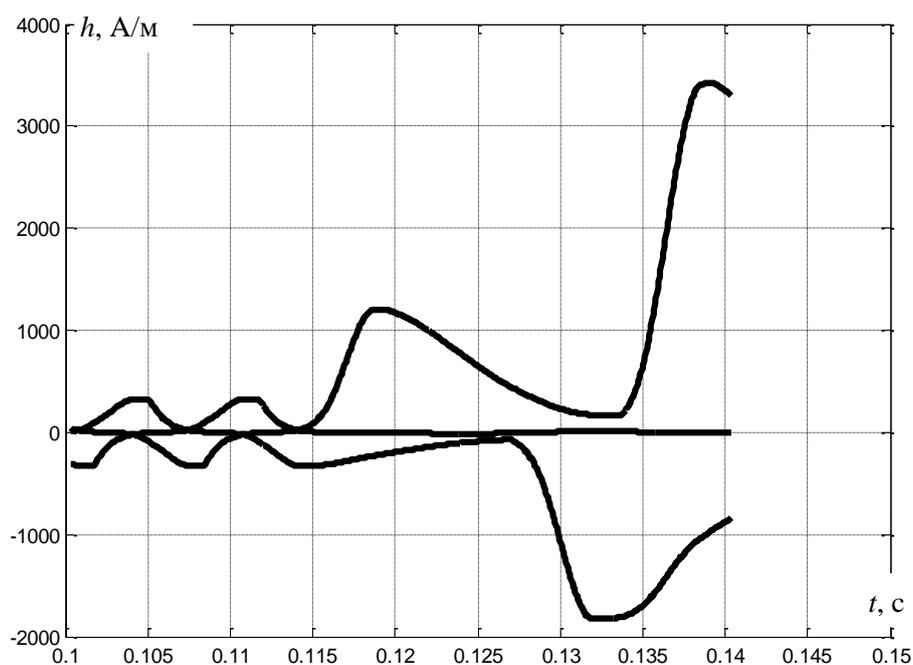


Рис.6. Расчётная диаграмма напряженностей ферромагнитных стержней при возникновении теплового пробоя вентиля

Перекас фазных напряжений питающей сети

Перекас фазных напряжений питающей сети может происходить при различных нарушениях симметрии нагрузок в цепи питания. При этом происходит изменение амплитуд и фаз напряжений на зажимах первичной обмотки. Например, при перемещении рабочей точки фазных напряжений питания по направлению вектора первой фазы (рис. 7) в их системе возникает асимметрия амплитуд (7950, 4770, 4770 В) и фазовых углов (0, -137, 137 эл. град) (рис. 7). Воспроизведение режима работы выпрямителя с таким перекасом напряжений показало, что нарушается симметрия магнитного состояния стержней, резко возрастают напряжённости (рис. 8). Размах пульсаций выпрямленного тока возрастает до 25 %.

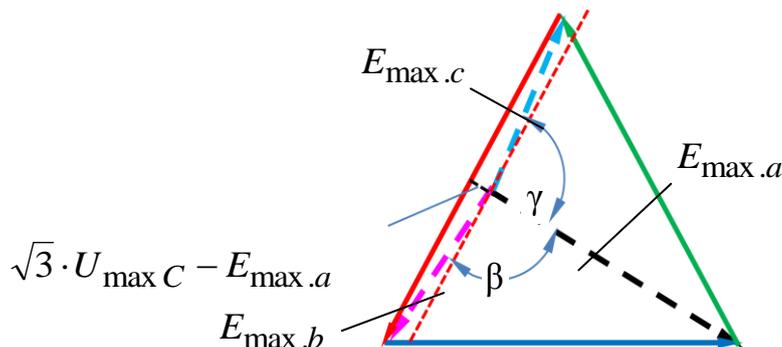


Рис. 7. Векторная диаграмма при заданном перекасе фазных напряжений на зажимах первичной обмотки трансформатора

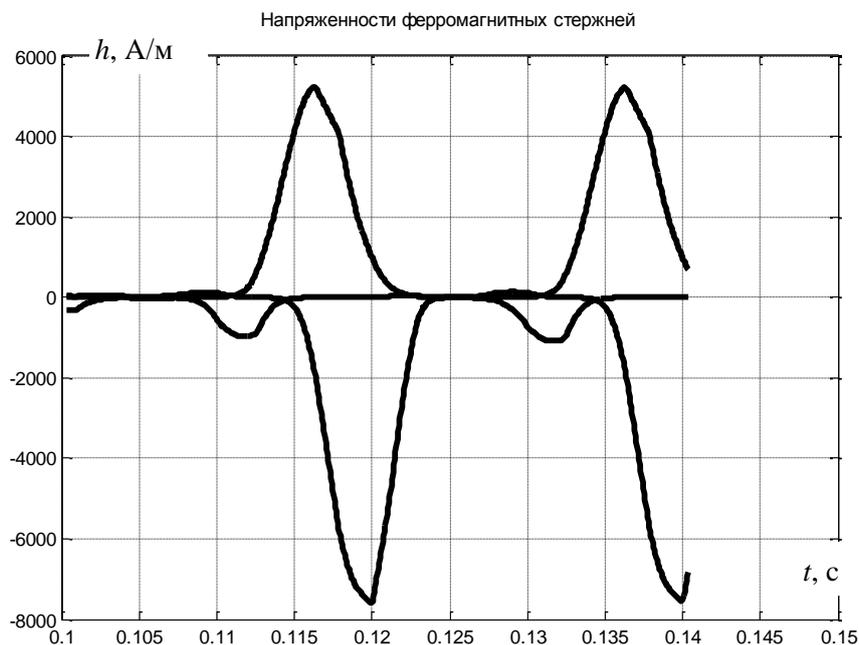


Рис. 8. Расчётная диаграмма напряжённости стержней при перекасе напряжений питания

Включение выпрямителя на эквивалентную RL -нагрузку через RC -фильтр

Воспроизведение переходного процесса включения 12-пульсного выпрямителя на ёмкость сглаживающего фильтра показало, что в неуправляемом мосту возникает десятикратный бросок тока заряда, что равносильно внешнему короткому замыканию. При использовании полууправляемой тиристорной схемы также проходит несколько импульсов зарядного тока, многократно превышающих номинальные значения. Рабочим вариантом является применение полной схемы на тиристорах, система управления которой обеспечивает плавное

нарастание тока на зажимах выпрямителя и соответственно ограничение тока заряда до уровня рабочих токов. В среде МАТЛАБ подготовлена форма запуска данного режима с кратковременным включением в цепь заряда токоограничивающего сопротивления (рис. 9).

Ёмкость батареи конденсаторов выходного фильтра, Ф	<input type="text" value="0.064"/>
Начальный угол управления, эл. град.	<input type="text" value="85"/>
Допустимая величина тока заряда, А	<input type="text" value="800"/>
Длительность интервала ограничения тока заряда, с	<input type="text" value="0.2"/>
Длительность интервала воспроизведения процесса, с	<input type="text" value="0.06"/>
Вывод временных диаграмм	<input type="button" value="v"/>
токи фаз первичной обмотки	<input type="text"/>
индукции ферромагнитных стержней	<input type="text"/>
напряжённости ферромагнитных стержней	<input type="text"/>
токи нагрузки	<input type="text"/>
напряжения на нагрузке	<input type="button" value="v"/>
ток заряда ёмкости	<input type="button" value="v"/>

Рис. 9. Форма задания параметров режима заряда ёмкости выходного фильтра

Предусматривается ввод основных параметров режима, а также вывод результатов. По ходу практического использования с модели будет возрастать количество таких форм, возникнет необходимость их структурирования и обеспечения взаимосвязи, что потребует разработки вышестоящей управляющей структуры. В представленном примере напряжение на ёмкости постепенно нарастает до номинального уровня в течение 0,2 с, ток заряда не превышает 1000 А (рис. 10). Рассмотрение вариантов работы схемы с использованием токоограничивающего сопротивления показало, что путём подбора параметров режима можно обеспечить ток заряда желаемого уровня. Следует отметить, если рассматриваемый переходный процесс начинается с установившегося режима холостого хода, то он не сопровождается глубоким насыщением сердечников трансформатора. Поэтому здесь можно применять более простую модель с учётом линейной кривой намагничивания.

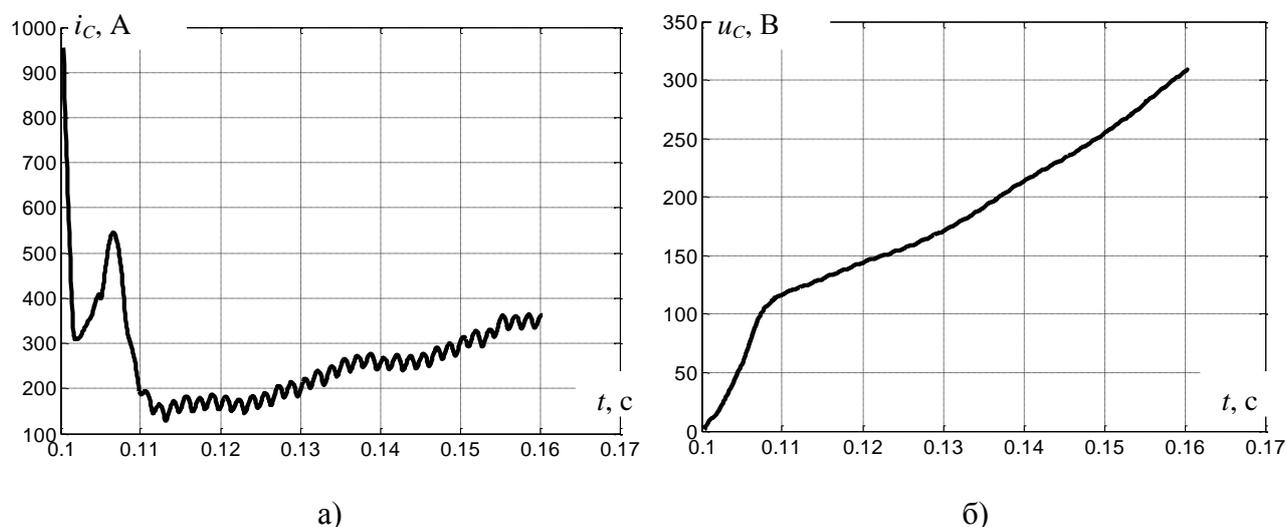


Рис.10. Расчётные диаграммы тока (а) и напряжения (б) на ёмкости в переходном процессе включения схемы с токоограничительным сопротивлением в цепи заряда и при плавном уменьшении угла управления

Вывод

Применение математического моделирования обеспечивает достоверный анализ различных режимов выпрямителя при условии обоснованного детального учёта процессов перемещения, с воспроизведением возможного глубокого насыщения ферромагнитных сердечников трансформатора.

Библиографический список

1. Дарьенков, А.Б. Гребные электрические установки: учеб. пособие / А.Б. Дарьенков [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. – 219 с.
2. Тихомиров, П.М. Расчёт трансформаторов: учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. – М., «Энергия», 1976. – 544 с.
2. Дьяконов, В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007 Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М., 2008. – 768 с.
3. Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
4. Байков, А.И. Моделирование элементов и систем автоматизированного электропривода / А.И. Байков; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2015. – 185 с.

*Дата поступления
в редакцию 27.06.2016*

V.G. Titov, A.I. Baikov, A.I. Balandin, I.A. Batyrev, D.V. Umyarov

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A RECTIFIER FOR SHIP POWER SYSTEM

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeyev¹,
ОАО КВ «Vympel»²

Purpose: Development of methods of application of mathematical modeling for analysis of electromagnetic processes in a high-current rectifier for ship power system with a three-winding transformer.

Methods: Matrix methods of analysis of electric and magnetic circuits, analytical approximation of magnetization curves, programming in MATLAB environment.

Finding (Results): Methods of forming and integrating differential equations describing electromagnetic processes in a rectifier, taking into account possible saturation of a transformer are applied; MATLAB interface which allows of simulation by external users is designed.

Example: It is shown how to define input schema of a rectifier of 5400 kVA, typical anomalous modes confirming necessity of considering processes of saturation of a transformer are analysed.

Application: Analysis of electromagnetic processes of a unit converting AC to DC in permanent ship power system.

Key words: ship power system, mathematical modeling, transformer, equivalent circuit, magnetization curve, analytical approximation, MATLAB programming environment.