
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.314

А.И. Байков, В.Г. Титов

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЁХОБОМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МОЩНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: разработка схем замещения мощного трёхобмоточного трансформатора блока выпрямителя судовой энергетической системы с различной детализацией процессов намагничивания.

Методы: матричные методы анализа электрических и магнитных цепей, аналитическая аппроксимация кривых намагничивания.

Вывод (результаты): получены дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в трансформаторе выпрямителя с различной степенью детализации процессов намагничивания, в том числе с учётом насыщения трансформатора; предложены схемы замещения, построенные на основе применения взаимных индуктивностей и предусматривающие гальваническую развязку первичной и вторичной цепей. Показана возможность определения схем замещения на основе доступных справочных и расчётных данных, приведены расчётные временные диаграммы характерного нагрузочного режима.

Применение: анализ нагрузочных и аварийных режимов выпрямительного блока судовой энергетической системы.

Ключевые слова: математическое моделирование, трансформатор, схема замещения, кривая намагничивания, аналитическая аппроксимация.

Математическое моделирование позволяет получать данные об особенностях и количественных показателях физических процессов в объектах, необходимые для принятия технических решений. В настоящей статье представляются математические модели мощного трёхфазного трёхобмоточного трансформатора, понижающего напряжение с уровня 6,3 до 0,69 кВ для узла двенадцатипульсного выпрямления переменного тока в судовой энергетической системе (СЭС) [1]. Существенной особенностью функционирования таких трансформаторов, осложняющей анализ нагрузок и выбор параметров элементов силовой схемы, систем управления и защиты, является возможность насыщения ферромагнитных стержней трансформатора при нарушениях симметрии токов обмоток.

Принимаются допущения, позволяющие, с одной стороны, представить электромагнитные процессы в устройствах как результаты воспроизведения переходных процессов в электрических и магнитных схемах замещения на основе решения обыкновенных дифференциальных уравнений, а с другой – получить достоверные численные значения параметров элементов этих схем в условиях недостатка справочных данных по конструкции и характеристикам элементов силовых схем. Так, считается, что обмотки сосредоточены, магнитное поле в стержнях трансформатора однородно, поле рассеяния не зависит от степени насыщения магнитопровода.

Исходные математические соотношения

Уравнение электрического равновесия фазных напряжений на зажимах обмоток трансформатора формируется по закону Ома для участка цепи и закону электромагнитной индукции

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_{21} \\ U_{22} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_{21} \\ \Psi_{22} \end{bmatrix} + R_T \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $U_T = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_{21} \\ U_{22} \end{bmatrix}$, $\Psi_T = \begin{bmatrix} \Psi_{\sigma 1} \\ \Psi_{\sigma 21} \\ \Psi_{\sigma 22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{\mu 1} \\ \Psi_{\mu 21} \\ \Psi_{\mu 22} \end{bmatrix}$, $I_T = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix}$, $R_T = \text{diag}[R_1 \ R_{21} \ R_{22}]$ - вектора фазных

напряжений потокосцеплений и токов первичной и двух секций вторичной обмоток, у которых активные сопротивления учитываются диагональной матрицей R_T . Потокосцепления представляются состоящими из двух составляющих – рассеяния и намагничивания, отмечаемых индексами σ и μ .

Потокосцепления рассеяния и токи обмоток связываются между собой через матрицу индуктивностей $L_{\sigma T}$, имеющую значения собственных индуктивностей рассеяния на главной диагонали и взаимных индуктивностей вне главной диагонали для обмоток, расположенных на одном стержне,

$$L_{\sigma} = \begin{bmatrix} L_{1\sigma} & L_{1.21\sigma} & L_{1.22\sigma} \\ L_{1.21\sigma} & L_{21\sigma} & L_{21.22\sigma} \\ L_{1.22\sigma} & L_{21.22\sigma} & L_{22\sigma} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где на основе простейшей формулы для индуктивности соленоида вычисляются:

$$L_{1\sigma} = \mu_0 W_1^2 \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 1}}{l_{s\sigma 1}} \frac{s_{\sigma 1}}{l_{s\sigma 1}} \frac{s_{\sigma 1}}{l_{s\sigma 1}} \right], L_{1.21\sigma} = \mu_0 W_1 W_{21} \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 1.21}}{l_{s\sigma 1.21}} \frac{s_{\sigma 1.21}}{l_{s\sigma 1.21}} \frac{s_{\sigma 1.21}}{l_{s\sigma 1.21}} \right],$$

$$L_{1.22\sigma} = \mu_0 W_1 W_{22} \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 1.22}}{l_{s\sigma 1.22}} \frac{s_{\sigma 1.22}}{l_{s\sigma 1.22}} \frac{s_{\sigma 1.22}}{l_{s\sigma 1.22}} \right], L_{21\sigma} = \mu_0 W_{21}^2 \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 21}}{l_{s\sigma 21}} \frac{s_{\sigma 21}}{l_{s\sigma 21}} \frac{s_{\sigma 21}}{l_{s\sigma 21}} \right],$$

$$L_{22\sigma} = \mu_0 W_{22}^2 \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 22}}{l_{s\sigma 22}} \frac{s_{\sigma 22}}{l_{s\sigma 22}} \frac{s_{\sigma 22}}{l_{s\sigma 22}} \right], L_{21.22\sigma} = \mu_0 W_{21} W_{22} \text{diag} \left[\frac{s_{\sigma 21.22}}{l_{s\sigma 21.22}} \frac{s_{\sigma 21.22}}{l_{s\sigma 21.22}} \frac{s_{\sigma 21.22}}{l_{s\sigma 21.22}} \right].$$

Здесь используются неизменные геометрические и конструктивные параметры:

1) диагональные матрицы чисел витков обмоток

$$W_1 = \text{diag}[w_1 \ w_1 \ w_1], W_{21} = \text{diag}[w_{21} \ w_{21} \ w_{21}], W_2 = \text{diag}[w_{22} \ w_{22} \ w_{22}]; \quad (3)$$

2) площади сечений потоков рассеяния обмоток: собственных s_1, s_{21}, s_{22} и взаимных $s_{1.21}, s_{1.22}, s_{21.22}$;

3) длины силовых линий потоков рассеяния обмоток: собственных $l_{s\sigma 1}, l_{s\sigma 21}, l_{s\sigma 22}$ и взаимных $l_{s\sigma 1.21}, l_{s\sigma 1.22}, l_{s\sigma 21.22}$.

Числа витков, геометрические параметры конструкции трансформатора можно определять на основе типовых методик расчёта [2]. И по этим данным ориентировочно находить параметры для потоков рассеяния. Уточнение значений достигается из условия их соответствия данным опытов коротких замыканий пар обмоток.

При использовании моделей, предусматривающих воспроизведение процессов намагничивания трансформатора, соотношение между токами его обмоток, напряжённостями участков магнитопроводов учитывается на основе закона полного тока

$$L_{s\mu} H_{s\mu} = W_1 I_1 + W_{21} I_{21} + W_{22} I_{22}, \quad (4)$$

где $H_{s\mu}$ – вектор напряжённостей учитываемых участков контуров замыкания потоков намагничивания с длинами, составляющими значения элементов диагональной матрицы $L_{s\mu}$.

Полагается, что для практики анализа токов и напряжений сети, выпрямителей и нагрузки магнитную систему трансформатора можно представить состоящей из трёх однородных ферромагнитных стержней и одного неферромагнитного. Наличие четвёртого стержня позволяет учесть неуравновешенную часть потока намагничивания.

Таким образом, во входном описании моделей, предусматривающих учёт процессов изменения магнитных потоков трансформатора, требуется ввести длины средних силовых линий $l_{\mu 1}$, $l_{\mu 2}$, $l_{\mu 3}$ ферромагнитных стержней и l_0 четвёртого стержня. Эти параметры находятся по геометрическим данным конструкции трансформатора, как и соответствующие площади сечений стержней $s_{\mu 1}$, $s_{\mu 2}$, $s_{\mu 3}$, $s_{\mu 0}$. Величины абсолютных магнитных проницаемостей μ_1 , μ_2 , μ_3 могут зависеть от степени насыщения стержней, для четвёртого стержня берётся абсолютная магнитная проницаемость воздуха $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Модель 1, не предусматривающая воспроизведение процессов перемагничивания

Наиболее простой вариант математической модели трансформатора не предполагает учёта процессов намагничивания стержней, т.е. напряжённости в уравнении (4) принимаются равными нулю. В таком случае токи первичной обмотки выражаются через токи секций вторичной обмотки

$$I_1 = -W_1^{-1}W_{21}I_{21} - W_1^{-1}W_{22}I_{22} . \quad (5)$$

Система уравнений электрического равновесия напряжений обмоток (1) с учётом (5) разрешается относительно фазных напряжений секций вторичной обмотки

$$U_{21} - W_{21}W_1^{-1}U_1 = L_{k21.1} \frac{d}{dt} I_{21} + L_{21.22} \frac{d}{dt} I_{22} + R_{k21.1} I_{21} + R_{21.22} I_{22} , \quad (6)$$

$$U_{22} - W_{22}W_1^{-1}U_1 = L_{k22.1} \frac{d}{dt} I_{22} + L_{21.22} \frac{d}{dt} I_{21} + R_{21.22} I_{21} + R_{k22.1} I_{22} ,$$

где диагональные матрицы коэффициентов оказываются вычисляемыми по формулам определения активных сопротивлений и индуктивностей в опытах трёхфазных коротких замыканий соответствующих пар обмоток. Принимаются во внимание следующие опыты:

- питаемой первой секции вторичной и замыкаемой первичной обмотки:

$$\begin{aligned} L_{k21.1} &= L_{21\sigma} - 2W_{21}W_1^{-1}L_{12.1\sigma} + (W_{21}W_1^{-1})^2 L_{1\sigma} , \\ R_{k21.1} &= R_{21} + (W_{21}W_1^{-1})^2 R_1 ; \end{aligned} \quad (7)$$

- питаемой второй секции вторичной обмотки и замыкаемой первичной:

$$\begin{aligned} L_{k22.1} &= L_{22\sigma} - 2W_{22}W_1^{-1}L_{1.22\sigma} + (W_{22}W_1^{-1})^2 L_{1\sigma} , \\ R_{k22.1} &= R_{22} + (W_{22}W_1^{-1})^2 R_1 ; \end{aligned} \quad (8)$$

- питаемой первой секции вторичной обмотки и замыкаемой второй секции:

$$\begin{aligned} L_{k21.22} &= L_{21\sigma} - 2W_{21}W_{22}^{-1}L_{21.22\sigma} + (W_{21}W_{22}^{-1})^2 L_{22\sigma} , \\ R_{k21.22} &= R_{21} + (W_{21}W_{22}^{-1})^2 R_{22} . \end{aligned} \quad (9)$$

С учётом (7)–(9), принятии допущения близости значений собственных и взаимных индуктивностей рассеяния секций вторичной обмотки

$$W_{21}W_{22}^{-1}L_{21.22\sigma} \approx L_{21\sigma} , W_{22}W_{22}^{-1}L_{22.21\sigma} \approx L_{22\sigma} \quad (10)$$

и известных диагональных матрицах активных сопротивлений обмоток R_1 , R_{21} , R_{22} вычисляются

$$\begin{aligned} L_{21.22} &\approx \frac{1}{2} W_{22}W_{21}^{-1}L_{k21.1} + \frac{1}{2} W_{21}W_{22}^{-1}L_{k22.1} ; \\ R_{21.22} &= W_{21}W_{22}W_1^{-2} R_1 . \end{aligned} \quad (11)$$

Подбором значений элементов диагональных матриц активных сопротивлений обмоток R_1 , R_{21} , R_{22} можно учитывать потери как в меди обмоток, так и в стали магнитопровода.

Уравнениям (6) соответствует схема замещения трансформатора из шести ветвей (рис. 1). Введённые индуктивные и активные компоненты учитывают взаимовлияние токов секций вторичной обмотки, проявляемое падениями напряжений от их составляющих в токах первичной обмотки, а также влияния этих токов по взаимным потокам рассеяния секций вторичной обмотки.

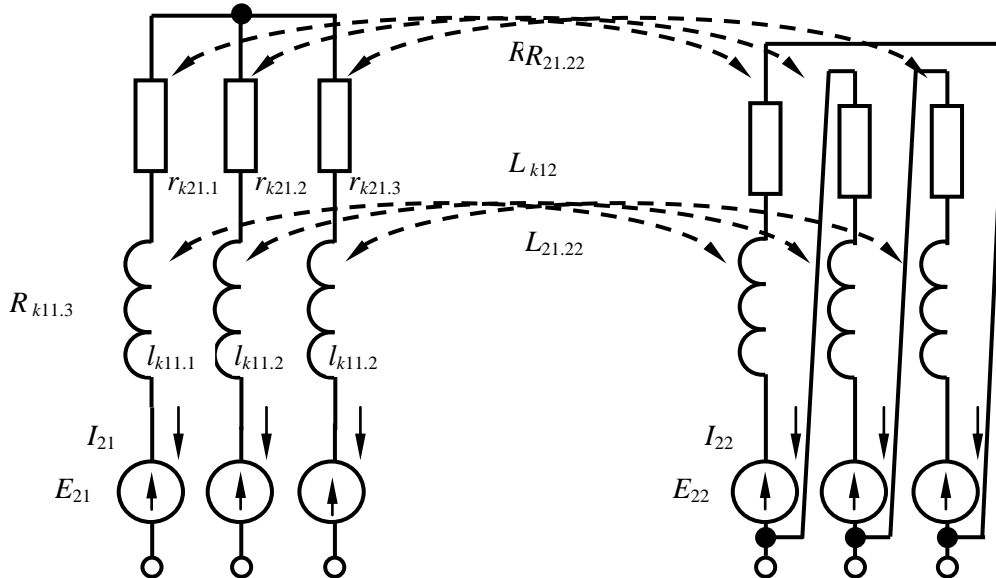


Рис. 1. Схема замещения трансформатора при пренебрежении процессами перемангничивания (модель 1)

В схеме замещения (рис. 1) цепь первичной обмотки учтена трёхфазными источниками ЭДС для первой и второй секций вторичной обмотки в соответствии с (6):

$$E_{21} = W_{21}W_1^{-1}U_1, \quad (12)$$

$$E_{22} = W_{22}W_1^{-1}U_1,$$

В простом случае они составляют систему трёхфазных синусоидальных напряжений с угловой частотой ω_1

$$U_1 = U_m \begin{bmatrix} \sin \omega_1 t \\ \sin(\omega_1 t - \Delta) \\ \sin(\omega_1 t + \Delta) \end{bmatrix}, \Delta = 2\pi/3. \quad (13)$$

С помощью модели 1 отображаются электромагнитные процессы с упрощенным представлением питающей сети, учётом индуктивностей рассеяния и активных потерь трансформатора. Важно, что определение параметров модели производится по доступным справочным или расчётным данным типовых опытов трёхфазных коротких замыканий пар обмоток. Цепи выпрямления и нагрузки подключаются к зажимам секций вторичной обмотки. Разрешение уравнений этих цепей относительно векторов U_{21} и U_{22} даёт совместно интегрируемую систему уравнений состояния.

Модель 2, предусматривающая учёт процессов перемангничивания ненасыщающегося трансформатора

Работа трансформатора при отсутствии насыщения происходит на линейных частях кривых намагничивания стержней, так что можно считать линейными зависимости

$$h_{\mu i} = \mu_i^{-1}b_i, i = 1,2,3, \quad (14)$$

где μ_i – магнитные проницаемости ферромагнитных стержней, значения которых подбираются из условия получения известного тока холостого хода первичной обмотки.

В таком случае потокосцепления потоков намагничивания из (1) выражаются через

напряжённости стержней
$$\begin{bmatrix} \Psi_{\mu 1} \\ \Psi_{\mu 21} \\ \Psi_{\mu 22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_{21} \\ W_{22} \end{bmatrix} S_{\mu} L_{\mu}^{-1} M_{0\mu} H_{\mu} \quad (15)$$

и токи обмоток
$$\begin{bmatrix} \Psi_{\mu 1} \\ \Psi_{\mu 21} \\ \Psi_{\mu 22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_{21} \\ W_{22} \end{bmatrix} S_{\mu} L_{\mu}^{-1} M_{0\mu} [W_1 \ W_{21} \ W_{22}] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $S_{\mu} = \text{diag}[s_{\mu 1} \ s_{\mu 2} \ s_{\mu 3}]$; $L_{\mu\sigma} = \text{diag}[l_{\mu\sigma 1} \ l_{\mu\sigma 2} \ l_{\mu\sigma 3}]$; $M_{\mu} = \text{diag}[\mu_1 \ \mu_2 \ \mu_3]$ – диагональные матрицы поперечных сечений, высот (длин) и магнитных проницаемостей ферромагнитных стержней.

Дифференцирование (15)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{\mu 1} \\ \Psi_{\mu 21} \\ \Psi_{\mu 22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_{21} \\ W_{22} \end{bmatrix} S_{\mu} L_{\mu\sigma}^{-1} \frac{d}{dt} B_{\mu} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_{21} \\ W_{22} \end{bmatrix} S_{\mu} L_{\mu\sigma}^{-1} \text{diag} \left[\frac{db_{\mu 1}}{dh_{\mu 1}} \ \frac{db_{\mu 2}}{dh_{\mu 2}} \ \frac{db_{\mu 3}}{dh_{\mu 3}} \right] \frac{d}{dt} H_{\mu}$$

с введением в рассмотрение дифференциальных магнитных проницаемостей

$$M_{\mu\delta} = \text{diag} \left[\frac{db_{\mu 1}}{dh_{\mu 1}} \ \frac{db_{\mu 2}}{dh_{\mu 2}} \ \frac{db_{\mu 3}}{dh_{\mu 3}} \right], \quad (17)$$

матриц индуктивностей обмоток

$$L_{\mu\sigma} = L_{\mu} + L_{\sigma}, \quad (18)$$

где $L_{\mu} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_{21} \\ W_{22} \end{bmatrix} S_{\mu} L_{\mu\sigma}^{-1} M_{\mu\delta} [W_1 \ W_{21} \ W_{22}]$, позволяет преобразовать уравнение электрического

равновесия обмоток (1) к виду

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_{21} \\ U_{22} \end{bmatrix} = L_{\mu\sigma} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix} + R_T \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

Уравнению (19) соответствует схема замещения трансформатора из девяти ветвей (рис. 2).

Приведённая схема предусматривает гальваническую развязку обмоток, её конфигурация соответствует принципиальной схеме. К ней можно присоединять цепи нагрузок как на стороне высокого, так и выпрямленного напряжений, не прибегая к процедуре их приведения к одному уровню. Топология данной схемы замещения не изменяется и при использовании модели, учитывающей возможность насыщения ферромагнитных стержней.

При использовании модели, принимающей кривые намагничивания стержней линейными, оказывается возможен расчёт намагничивающих составляющих токов обмоток, напряжённости и индукций при задаваемой степени насыщения ферромагнитных стержней. Это обеспечивает возможность учёта процессов в трансформаторе с рабочими нагрузками и, в том числе, определять такие технико-экономические показатели, как величины пульсаций выпрямленного тока и напряжения, гармонический состав тока, потребляемого из сети, и т.п.

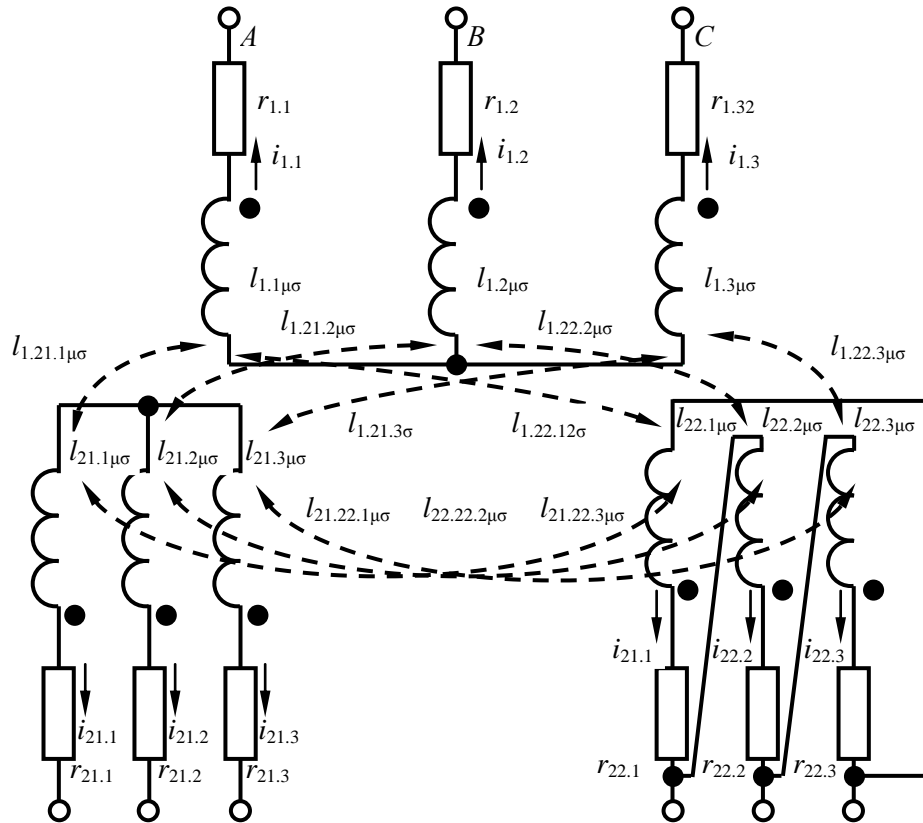


Рис. 2. Схема замещения трансформатора при использовании моделей, предусматривающих учёт процессов намагничивания

Модель 3, предусматривающая учёт процессов перемагничивания с возможным насыщением трансформатора

При необходимости учёта степени насыщения ферромагнитных стержней уравнение основной кривой намагничивания (14) следует считать нелинейным. Для этого применяется формула аналитической аппроксимации данной кривой гиперболическим синусом

$$h_{\mu i} = \alpha_i \sinh(\beta_i b_{\mu i}), \quad (20)$$

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 (рис. 3) можно принять значения $\alpha=1,05$ А/м, $\beta=4,4$ Тл⁻¹.

С использованием аппроксимации кривой намагничивания (20) формулы дифференциальных магнитных проницаемостей ферромагнитных стержней принимают вид

$$M_{\mu\delta}^{-1} = \text{diag}[\alpha_1 \beta_1 \cosh(\beta_1 b_{\mu 1}) \quad \alpha_2 \beta_2 \cosh(\beta_2 b_{\mu 2}) \quad \alpha_3 \beta_3 \cosh(\beta_3 b_{\mu 3}) \quad 1/\mu_0] \quad (21)$$

и выявляется соотношение между производными индукций стержней и токами обмоток

$$H_1 L_s \text{diag} M_{\mu\delta}^{-1} \frac{d}{dt} B_{\mu s} = [W_1 \ W_{21} \ W_{22}] \frac{d}{dt} I_T \quad (22)$$

и производными потоков ферромагнитных стержней и токами обмоток

$$\frac{d}{dt} \Phi_{\mu} = R_{h\mu\delta}^{-1} [W_1 \ W_{21} \ W_{22}] \frac{d}{dt} I_T, \quad (23)$$

где с использованием топологической матрицы $H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ применяется матрица контур-

ных дифференциальных магнитных сопротивлений схемы замещения магнитной цепи

$$R_{h\mu\delta} = \left[H_1 L_s \text{diag} M_{\mu s \delta}^{-1} S_{\mu s}^{-1} H_1' \right] . \quad (24)$$

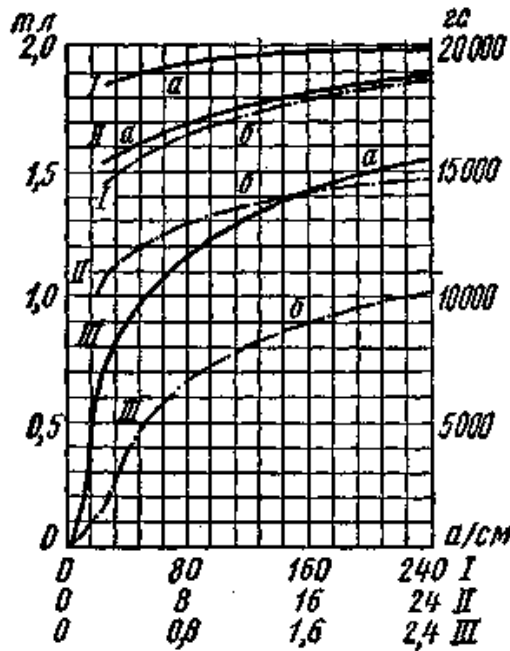


Рис. 3. Кривая намагничивания стали Э330А 0,35 мм (кривая a)

Отсюда получается выражение для динамических индуктивностей

$$L_{\mu\delta} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_{21} \\ W_{22} \end{bmatrix} R_{h\mu\delta}^{-1} \begin{bmatrix} W_1 & W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} , \quad (25)$$

которое следует применять вместо L_{μ} в (18) и (19).

Для случая подключения к зажимам секций вторичной обмотки цепей эквивалентных нагрузок формируется нормализованная система уравнений трансформатора с учётом намагничивания ферромагнитных стержней

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{h\mu z} &= L_{h\mu z}^{-1} (E_{h\mu z} - R_{h\mu z} I_{h\mu z}) \\ \frac{d}{dt} B_{\mu} &= R_{h\mu s \delta}^{-1} S_{\mu}^{-1} \begin{bmatrix} W_1 & W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} I_T \end{aligned} \right\} , \quad (26)$$

где переменными состояниями являются вектор токов независимых контуров с индуктивностями $I_{h\mu z}$ и индукции ферромагнитных стержней трансформатора B_{μ} . На рис. 4 представлен граф схемы замещения трансформатора с присоединёнными к секциям вторичной обмотки ветвями эквивалентной нагрузки (ветви 10-15). Матрица независимых контуров этой схемы

$$H_{h\mu z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

позволяет реализовать топологические соотношения и, в том числе, определить вектор токов обмоток через вектор независимых токов

$$I_T = H'_{h\mu z} I_{h\mu z} \quad (27)$$

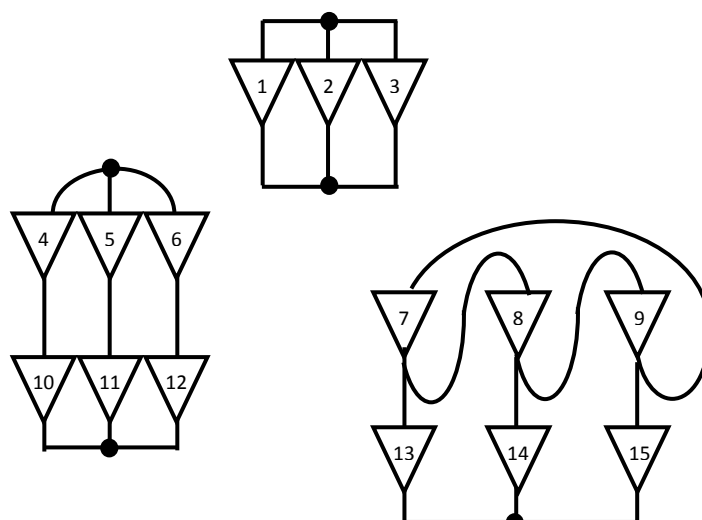


Рис. 4. Граф схемы замещения трёхфазного трёхобмоточного трансформатора с цепями питания и эквивалентной нагрузки

Наличие вектора индукций ферромагнитных стержней в составе переменных состояния уравнения (26) обеспечивает возможность непосредственного определения дифференциальных магнитных проницаемостей без привлечения процедуры решения системы нелинейных алгебраических уравнений (15), (16), (21) для нахождения этих индукций. При воспроизведении различных режимов трансформатора важно иметь достоверные начальные значения токов обмоток, согласующиеся со степенью намагничивания стержней. Использование нулевых начальных условий корректно, но приводит к необходимости предварительного воспроизведения длительного переходного процесса включения трансформатора, изучение которого представляет собой самостоятельную задачу. Физически обоснованным в качестве исходного, отправного режима можно принять холостой ход с питанием первичной обмотки номинальным напряжением. В качестве подтверждения работоспособности моделей выполнено воспроизведение процесса переключения трансформатора мощностью 5400 кВА с холостого хода на номинальную нагрузку.

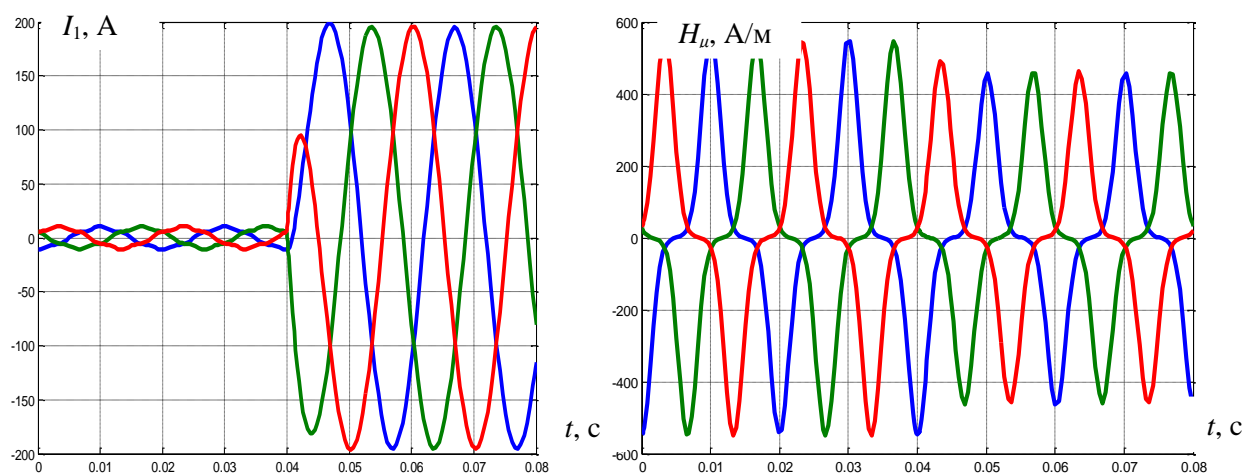


Рис.5. Расчётные диаграммы первичных токов и напряжённостей ферромагнитных стержней в процессе переключения с холостого хода на номинальную нагрузку

Вывод

Предложены математические модели, обеспечивающие учёт процессов функционирования трёхфазного трёхобмоточного трансформатора с различной степенью детализации процессов перемагничивания ферромагнитного магнитопровода. Получены схемы замещения трансформатора, к которым можно присоединять высоковольтные цепи питающей сети, выпрямители и нагрузку на стороне выпрямленного тока.

Библиографический список

1. Гребные электрические установки: учеб. пособие / А.Б. Дарьенков [и др.]; НГТУ 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.

*Дата поступления
в редакцию 27.06.2016*

A.I. Baikov, V.G. Titov

MATHEMATICAL MODEL OF THREE-WINDING TRANSFORMER POWERFUL RECTIFIER FOR SHIP POWER SYSTEM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Purpose: Development of the equivalent circuit is a powerful three-winding unit transformer rectifier ship power system with different detail the processes of magnetization.

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

Finding (Results): The differential equations describing the electromagnetic processes in transformer rectifier with different degree of detail of the processes of magnetization, including taking into account the saturation of the transformer; proposed equivalent circuit, based on the application of the mutual inductance and providing galvanic isolation of the primary and secondary circuits.

Example: The possibility of determining equivalent circuits on the basis of available reference and calculated data, the calculated timing diagram typical load regime.

Application: Analysis of load and emergency regimes rectifier unit ship power system.

Key words: marine energy system, mathematical modelling, transformer, equivalent circuit, magnetization curve, analytical approximation.