

621.316

**В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО** (д-р техн.наук, проф.),  
**В.К. ЛЕБЕДЕВ** (канд.техн.наук, доц.), **Р.П. СЕРДЮКОВ**  
Донецкий национальный технический университет  
svf@elf.dgtu.donetsk.ua

## РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ЗАМЫКАНИИ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ

*Разработана математическая модель для анализа переходных процессов при замыкании фазы на землю в системе 6 кВ собственных нужд электростанций, отличительной особенностью которой является учет асинхронных двигателей, силовых и измерительных трансформаторов с учетом нелинейности их параметров. Модель позволяет также исследовать переходные процессы в асинхронных двигателях при коммутациях вакуумными выключателями, оценить эффективность резистивного заземления нейтрали сети и условия возникновения феррорезонансных процессов.*

**Постановка задачи.** Распределительные сети 6-10 кВ широко применяются в системах электроснабжения промышленных предприятий и собственных нужд электростанций благодаря их достоинствам как с точки зрения обеспечения надежности, так и экономической эффективности данных сетей. Главным их преимуществом является то, что при однофазных глухих замыканиях на землю, которые являются наиболее частым видом повреждений, электроснабжение потребителей, как правило, не прерывается. К наиболее же существенным недостаткам этих сетей относятся перенапряжения, которые возникают при глухих и дуговых замыканиях фазы на землю, а также при коммутациях выключателей в нормальных и аварийных режимах. Воздействие этих перенапряжений распространяется на всю электрически связанную сеть, что является одной из причин ускоренного износа и повреждения электрооборудования и главным образом электродвигателей.

Различают режимы работы сетей 6-10 кВ, которые находятся в эксплуатации, с изолированной нейтралью и заземленной через дугогасящую катушку или через резистор. Для повышения надежности работы таких сетей за счет ограничения перенапряжений предложено большое количество различных способов. В частности, для этой цели используют высоковольтное низкоомное заземление нейтрали сети 6 кВ собственных нужд электростанций [1], в [2] рекомендуется применение высоковольтных высокоомных резисторов, в [3] предложено подключение резисторов к обмоткам низшего напряжения специальных присоединительных трансформаторов. В этих сетях, в ряде случаев, возникают феррорезонансные процессы, для предотвращения которых также известен ряд способов их предотвращения [4,5].

Широкое внедрение в последние годы в системе электроснабжения собственных нужд электростанций вакуумных выключателей также привело к росту случаев возникновения и повышения уровня перенапряжений, что потребовало разработки способов их ограничения с помощью нелинейных оксидно-цинковых ограничителей перенапряжений, R-C цепочек и других способов, так как коммутации вакуумных выключателей сопровождаются перенапряжениями, которые наиболее опасны для высоковольтных электродвигателей.

Эффективность различных способов ограничения перенапряжений, в значительной мере, зависит также и от параметров электрической сети: количества отходящих присоединений, уровня емкостных токов и др. Наиболее целесообразным способом оценки эффективности различных методов ограничения перенапряжений для конкретных сетей является использование математического моделирования.

Известные математические модели [6], используемые для исследования перенапряжений в сетях 6-10 кВ, учитывают междофазные емкости, а также емкости и сопротивления изоляции на землю, активные и индуктивные сопротивления питающих трансформаторов, кабельных и воздушных линий. Однако недостатком этих моделей является упрощенное представление силовых, измерительных и присоединительных трансформаторов для заземления нейтрали из-за не учета насыщения их магнитопроводов и потерь в стали. Все это не позволяет получать адекватные процессы при моделировании резисторного заземления нейтрали и феррорезонансных процессов. Известно также, что при включении и отключении асинхронных двигателей (АД) с помощью вакуумных выключателей в сети возникают значительные внутренние перенапряжения до  $(3-5)U_{\phi}$ . Моделирование таких режимов без учета индуктивностей статорных и роторных короткозамкнутых контуров асинхронных двигателей не является корректным.

Целью данной работы является развитие известных математических моделей, для исследования перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью за счет учета влияния на эти процессы двигательной нагрузки, нелинейных параметров трансформаторов, ограничителей перенапряжений и коммутаций вакуумных выключателей при включении и отключении АД.

**Результаты исследований.** Рассмотрим схему электроснабжения электрической сети 6 кВ (рис.1), состоящую из питающего трансформатора (Т) и трансформатора напряжения НТМИ, системы сборных шин и отходящих от них кабельных или воздушных линий (W) для питания АД, присоединительного трансформатора

(ПТ), к нейтралю обмоток высшего напряжения которого, соединенных в звезду, подключается высоковольтный резистор ( $R_B$ ) или дугогасящая катушка (ДГК), или ко вторичным обмоткам ПТ, соединенным в разомкнутый треугольник, подключается низковольтный резистор ( $R_H$ ).

С целью создания математической модели для анализа переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в системе электроснабжения (рис.1) рассмотрим математические модели ее основных элементов: кабельной (воздушной) линии, асинхронного двигателя, трансформатора.

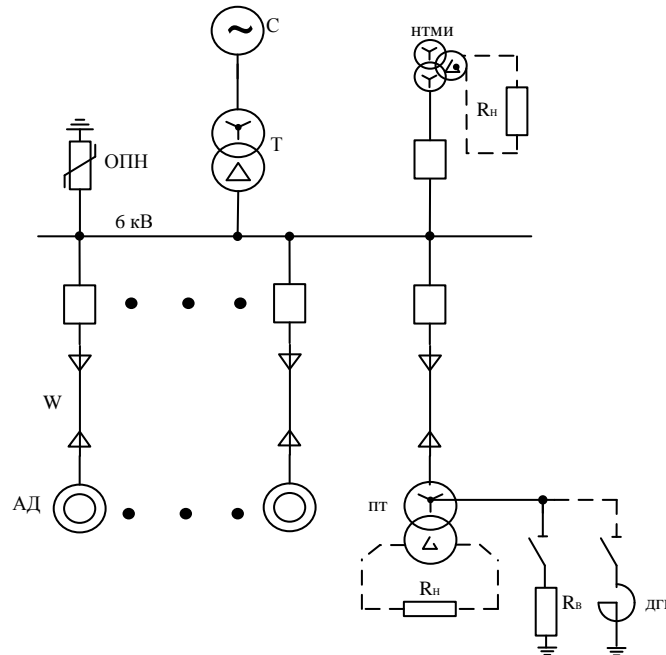


Рисунок 1 – Фрагмент принципиальной схемы электроснабжения с двигательной нагрузкой

Для этих элементов выберем соответствующие схемы замещения и запишем дифференциальные уравнения в естественной ( $a, b, c, 0$ ) системе фазных координат, а в качестве неизвестных выберем токи индуктивных и напряжения емкостных элементов. В общем случае будем рассматривать универсальную ветвь, как содержащую последовательно соединенные ЭДС, активное сопротивление, индуктивность и параллельно включенные емкость и активное сопротивление (рис.2). Воздушно-кабельную линию представим как состоящую из трех универсальных ветвей (рис.3), каждая из которых подключена к двум узлам схемы и представляет собой, в общем случае, соединение  $R, L, C$  элементов. При этом, фазное продольное сопротивление питающей линии представлено только ЭДС  $e$  и  $R_L, L_L$  звеном, а поперечное – активно-емкостным ( $R_C, C$ ) сопротивлением изоляции на землю. При наличии в схемах взаимной индуктивной связи ( $M=L_m$ ) между ветвями дополнительно необходимо учитывать сопротивление взаимной индукции, как показано на рис. 4. Для автоматического формирования математической модели схемы известной структуры будем использовать дифференциальные уравнения универсальной ветви (рис. 2), которую можно принять за базовую и из которой можно получить схему замещения любого из элементов (рис.1), полагая равными нулю или бесконечности некоторые из ее параметров.

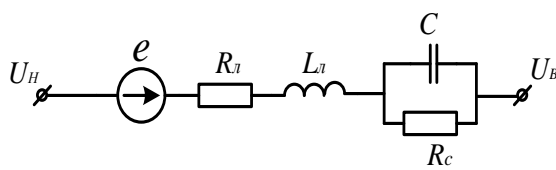


Рисунок 2 – Схема замещения универсальной ветви

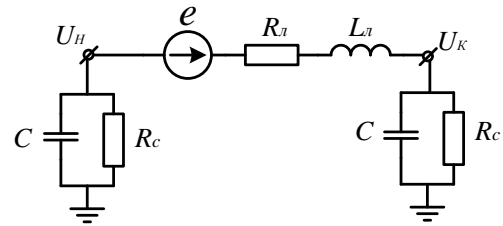


Рисунок 3 – Схема замещения фазы линии

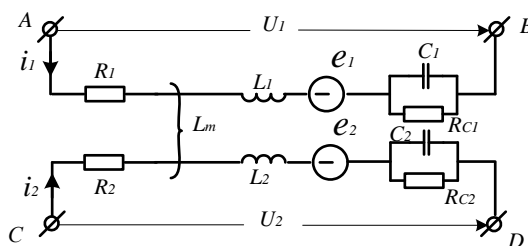


Рисунок 4 – Эквивалентная схема замещения двух ветвей при наличии взаимной индуктивности

Система дифференциальных уравнений, например для двух ветвей 1 и 2, согласно рис. 4 будет выглядеть следующим образом:

$$e_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + Lm \frac{di_2}{dt} + uc_1 + u_1, \quad (1) \quad e_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + Lm \frac{di_1}{dt} + uc_2 + u_2, \quad (2)$$

$$C_1 \frac{duc_1}{dt} = i_1 - \frac{uc_1}{Rc_1}, \quad (3) \quad C_2 \frac{duc_2}{dt} = i_2 - \frac{uc_2}{Rc_2}, \quad (4)$$

где:  $L_1, L_2$  - полные индуктивности ветвей 1 и 2;  $Lm$  - взаимная индуктивность;  $u_1, u_2$  - напряжения на зажимах ветвей 1 и 2.

Уравнения (1) – (4) можно решать явными методами, например, Эйлера или Рунге-Кутты. Однако известно, что математическое моделирование перенапряжений наиболее целесообразно производить путем решения дифференциальных уравнений неявными методами [7], которые, в отличие от явных, обеспечивают более высокую численную устойчивость решения. С этой целью заменим в уравнениях (1 - 4) производные полиномами  $m$ -ого порядка с помощью, так называемых, формул дифференцирования назад (ФДН) [7]:

$$\left( \frac{d\bar{y}}{dt} \right)_{k+1} = \frac{1}{h} \cdot a_0 \cdot \bar{y}^{k+1} + \frac{1}{h} \cdot \sum_{s=1}^m a_s \cdot \bar{y}^{k+1-s}, \quad (5)$$

где:  $a_0, a_s$  - коэффициенты полинома, аппроксимирующего производные;  $m$  - порядок метода, который определяется количеством предшествующих, учитываемых значений функции с интервалом между ними  $h = dt$ .

Применив уравнение (5) к уравнениям (1-4), получим:

$$\left( R_1 + L_1 \frac{a_0}{h} \right) i_1^{k+1} + Lm \frac{a_0}{h} i_2^{k+1} + uc_1^{k+1} = e_1^{k+1} - L_1 \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_1^{k+1-s} - Lm \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_2^{k+1-s} - u_1^{k+1}, \quad (6)$$

$$\left( R_2 + L_2 \frac{a_0}{h} \right) i_2^{k+1} + Lm \frac{a_0}{h} i_1^{k+1} + uc_2^{k+1} = e_2^{k+1} - L_2 \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_2^{k+1-s} - Lm \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_1^{k+1-s} - u_2^{k+1}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{C_1} i_1^{k+1} - \left( \frac{a_0}{h} + \frac{1}{C_1 Rc_1} \right) uc_1^{k+1} = \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} uc_1^{k+1-s}, \quad (8) \quad \frac{1}{C_2} i_2^{k+1} - \left( \frac{a_0}{h} + \frac{1}{C_2 Rc_2} \right) uc_2^{k+1} = \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} uc_2^{k+1-s} \quad (9)$$

В уравнениях (6 - 9) неизвестными являются  $i_1, i_2, uc_1, uc_2$  на  $(k+1)$  шаге расчета. Из уравнений (8) и (9) найдем значения  $uc_1^{k+1}$  и  $uc_2^{k+1}$  и подставим их в уравнения (6) и (7). Перенесем неизвестные в левую часть уравнений, а известные из предыдущих расчетов на  $(k-2), (k-1), k$ -ом шагах расчета значения этих величин в правую часть. После соответствующих преобразований получим уравнение (10), записанное в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1^{k+1} \\ i_2^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1(t) - V_1 - Vv_{12} \\ e_2(t) - V_2 - Vv_{21} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где:

$$Z_{11} = R_1 + \frac{a_0}{h} L_1 + \frac{1}{\frac{a_0}{h} + (C_1 Rc_1)^{-1}} \cdot \frac{1}{C_1}, \quad Z_{22} = R_2 + \frac{a_0}{h} L_2 + \frac{1}{\frac{a_0}{h} + (C_2 Rc_2)^{-1}} \cdot \frac{1}{C_2} \quad \text{- собственные резистивные сопротивления ветвей 1 и 2,}$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \frac{a_0}{h} Lm_{1,2} = \frac{a_0}{h} Lm_{2,1} \quad \text{- взаимное резистивное сопротивление ветвей 1 и 2,}$$

$$\left. \begin{aligned}
 V_1 &= L_1 \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_1^{k+1-s} - \left( \frac{a_0}{h} + \frac{1}{C_1 R c_1} \right)^{-1} \cdot \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} u c_1^{k+1-s} \\
 V_2 &= L_2 \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_2^{k+1-s} - \left( \frac{a_0}{h} + \frac{1}{C_2 R c_2} \right)^{-1} \cdot \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} u c_2^{k+1-s}
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{- противо ЭДС в ветвях 1, 2,} \\ \text{обусловленные собственными} \\ \text{параметрами } L \text{ и } C \text{ ветвей} \end{array}$$

$$V_{V_{12}} = L m_{1,2} \cdot \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_2^{k+1-s}, \quad V_{V_{21}} = L m_{2,1} \cdot \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_1^{k+1-s} \quad \begin{array}{l} \text{- дополнительные противо ЭДС в первой} \\ \text{и во второй ветвях, вызванные наличием} \\ \text{взаимоиндуктивностей } L m_{1,2} \text{ и } L m_{2,1} \end{array}$$

При наличии в схеме  $n$  ветвей с взаимоиндуктивными связями между собой уравнение (10) примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1^{k+1} \\ i_2^{k+1} \\ \dots \\ i_n^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1(t) - V_1 - V_{V_1} \\ e_2(t) - V_2 - V_{V_2} \\ \dots \\ e_n(t) - V_n - V_{V_n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix}, \tag{11}$$

где дополнительная противо ЭДС в  $i$  – й ветви находится как:

$$V_{V_i} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n L m_{i,r} \cdot \overline{i_r^{k+1-s}} \cdot \frac{a_s}{h}. \tag{12}$$

Токи ветвей из (11)  $i_n^{k+1}$  можно найти при известных напряжениях ветвей  $\vec{u}$ . Найдем их, применив метод узловых напряжений. При известной матрице  $P$  соединения ветвей с узлами из уравнения (11), после умножения всех членов на  $P$  и обозначения матрицы сопротивлений в (11) через  $Z$ , получим:

$$P \cdot \overline{i_n^{k+1}} = P \cdot Z^{-1} \cdot \left[ \vec{e}_n(t) - \vec{V}_n - \vec{V}_{V_n} \right] - P \cdot Z^{-1} \cdot P^{tr} \cdot \left[ \vec{u}_y \right]. \tag{13}$$

Левая часть уравнения (13), представляющая собой первый закон Кирхгофа, равна нулю и тогда узловые напряжения и напряжения ветвей находим как:

$$\left[ \vec{u}_y \right] = \left( P \cdot Z^{-1} \cdot P^{tr} \right)^{-1} \cdot P \cdot Z^{-1} \cdot \left[ \vec{e}_n(t) - \vec{V}_n - \vec{V}_{V_n} \right], \tag{14} \quad \vec{u} = P^{tr} \cdot \vec{u}_y \tag{15}$$

Теперь после определения напряжений ветвей  $\vec{u}$  находим по (11) токи ветвей, а затем по (8), (9) напряжения на емкостях. Найденные значения переменных на  $(k+1)$  шаге расчета присваиваем  $k$ -ому значению, а  $k$ -ое  $(k-1)$ -ому и т.д. После этого выполняется следующий шаг расчета и т.д.

При моделировании процессов в сети (рис.1) с учётом подключенных через кабельные линии короткозамкнутых асинхронных двигателей (АД) воспользуемся дифференциальными уравнениями последних для трех фаз  $A, B, C$  статора и эквивалентных трех фаз  $a, b, c$  ротора, а также уравнениями движения для определения скорости вращения  $\omega$  и угла поворота  $\gamma$  ротора [6]:

$$p \vec{I} = L(\gamma)^{-1} \cdot (\vec{U} - R \vec{I}), \quad p \omega = \frac{1}{J} \cdot (M_{\Delta\Delta} - M_c), \quad p \gamma = \omega, \quad \vec{X} = \left[ \vec{I}, \omega, \gamma \right]^{tr}, \tag{16}$$

где:  $p = d / dt, \quad \vec{U} = [u_A, u_B, u_C, u_a, u_b, u_c]^{tr}, \quad \vec{I} = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]^{tr},$

$R = diag[R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c]$  - напряжения, токи, активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора АД;  $M_{\Delta\Delta}, M_c, J$  - электромагнитный вращающий момент, момент сопротивления и

момент инерции двигателя с механизмом;  $\gamma$  - угол поворота оси фазы  $a$  ротора по отношению к оси обмотки фазы  $A$  статора,  $\omega$  - скорость вращения ротора;

$$L(\gamma) = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr}(\gamma) \\ L_{rs}(\gamma) & L_{rr} \end{bmatrix} \quad \text{- матрица, состоящая из подматриц собственных индуктивностей статора } L_{ss} \text{ и ротора } L_{rr} \text{ и взаимных статор-ротор } L_{sr}(\gamma) \text{ и ротор-статор } L_{rs}(\gamma), \text{ являющихся функциями угла положения ротора.}$$

Указанные подматрицы находим как:

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L\sigma_a + Lm & -0,5Lm & -0,5Lm \\ -0,5Lm & L\sigma_b + Lm & -0,5Lm \\ -0,5Lm & -0,5Lm & L\sigma_c + Lm \end{bmatrix}, \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} L\sigma_a + Lm & -0,5Lm & -0,5Lm \\ -0,5Lm & L\sigma_b + Lm & -0,5Lm \\ -0,5Lm & -0,5Lm & L\sigma_c + Lm \end{bmatrix},$$

$$L_{sr}(\gamma) = Lm \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma) & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}, \quad L_{rs}(\gamma) = Lm \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma) & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

где:  $Lm$  - взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора;

$L\sigma_a, L\sigma_b, L\sigma_c$

$L\sigma_a, L\sigma_b, L\sigma_c$  - индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора;

$$P(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma) & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad \text{- матрица учета изменения взаимных индуктивностей фаз статора и ротора от угла } \gamma$$

Используя формулы дифференцирования назад (5), получим из (16) систему алгебраических (17 – 19) уравнений, из решения которой методом Ньютона найдем на  $(k+1)$ -ом шаге расчета вектор переменных  $\bar{X}$ :

$$\bar{f}1 = \bar{U} - \left[ R + \frac{a_0}{h} L(\gamma) + \omega \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right] \cdot \bar{I}^{k+1} - L(\gamma) \cdot \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \bar{I}^{k+1-s} = 0, \quad (17)$$

$$f2 = \frac{M_{AD} [\bar{I}]}{J_{AD}} - M_c - \frac{a_0}{h} \omega^{k+1} - \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \omega^{k+1-s} = 0, \quad (18) \quad f3 = \omega^{k+1} - \left( \frac{a_0}{h} \gamma^{k+1} + \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \gamma^{k+1-s} \right) = 0, \quad (19)$$

где вращающий момент  $M_{AD}$  находим с помощью токов  $\bar{I}$  и потокосцеплений  $\bar{\Psi}$  как:

$$M_{AD} [\bar{I}] = \Psi_1 \cdot \frac{I_2 - I_3}{\sqrt{3}} - I_1 \cdot \frac{\Psi_2 - \Psi_3}{\sqrt{3}}, \quad \bar{\Psi} = L(\gamma) \cdot \bar{I}.$$

Уравнение (17 – 19) является дискретной математической моделью АД в фазных координатах и при наличии в схеме электроснабжения АД эти уравнения, с учетом матрицы соединений  $P$ , используются в уравнениях (13 - 15).

Рассмотрим математическую модель трехфазного двухобмоточного трансформатора с трехстержневым магнитопроводом, в которой учтем возможность его насыщения. Уравнения второго закона Кирхгофа для первичных  $A, B, C$  и вторичных  $a, b, c$  фазных обмоток с числом витков соответственно  $w_A, w_B, w_C$  и  $w_a, w_b, w_c$  и уравнения равновесия магнитодвижущих сил и магнитных падений напряжений имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} L\sigma_A p i_A + w_A p \phi_A &= u_A - R_A i_A \\ L\sigma_B p i_B + w_B p \phi_B &= u_B - R_B i_B \\ L\sigma_C p i_C + w_C p \phi_C &= u_C - R_C i_C \\ L\sigma_a p i_a + w_a p \phi_A &= u_a - R_a i_a \\ L\sigma_b p i_b + w_b p \phi_B &= u_b - R_b i_b \\ L\sigma_c p i_c + w_c p \phi_C &= u_c - R_c i_c \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} w_1 i_A + w_2 i_a &= F(\phi_A) + F_0 \\ w_1 i_B + w_2 i_b &= F(\phi_B) + F_0 \\ w_1 i_C + w_2 i_c &= F(\phi_C) + F_0 \\ F_0 &= \frac{1}{L_0} (\phi_A + \phi_B + \phi_C) \end{aligned} \right\}. \quad (21)$$

В уравнениях (20) и (21):

$u_j, i_j, L\sigma_j, R_j (j = A, B, C, a, b, c)$  соответственно фазные напряжения, токи, индуктивности рассеяния и активные сопротивления обмоток;

$\phi_A, \phi_B, \phi_C, F_A, F_B, F_C, F_0$  – соответственно рабочие магнитные потоки, а также падения магнитных напряжений в стержнях магнитопровода и по воздуху, помимо стержней, при наличии не скомпенсированных потоков фаз.

Дифференцируя (21) по времени и обозначив динамическую индуктивность магнитопровода как  $Lm(\phi) = \partial \phi / \partial F$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} w_1 p i_A + w_2 p i_a + Lm^{-1}(\phi_A) \cdot p \phi_A + L_0^{-1} p F_0 &= 0 \\ w_1 p i_B + w_2 p i_b + Lm^{-1}(\phi_B) \cdot p \phi_B + L_0^{-1} p F_0 &= 0 \\ w_1 p i_C + w_2 p i_c + Lm^{-1}(\phi_C) \cdot p \phi_C + L_0^{-1} p F_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Уравнения (20) и (22) представляют собой математическую модель трансформатора с учетом нелинейной характеристики магнитопровода, с помощью которой находятся динамические индуктивности  $Lm(\phi)$ . После соответствующих преобразований эти уравнения в матрично-векторной форме, записанные в форме Коши, имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} p \vec{I} \\ p \vec{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L\sigma & W^{tr} \\ W & R_{maz} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{u} - R \vec{I} \\ Zero \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где:  $p \vec{\phi} = [p \phi_A, p \phi_B, p \phi_C]^{tr}$ ;

$p \vec{I} = [p i_A, p i_B, p i_C, p i_a, p i_b, p i_c]^{tr}$ ;

$L\sigma = diag [L\sigma_A, L\sigma_B, L\sigma_C, L\sigma_a, L\sigma_b, L\sigma_c]$ ;  $R = diag [R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c]$ ;

$\vec{u} = [u_A, u_B, u_C, u_a, u_b, u_c]^{tr}$ ;

$W = \begin{bmatrix} w_A & 0 & 0 & w_a & 0 & 0 \\ 0 & w_B & 0 & 0 & w_b & 0 \\ 0 & 0 & w_C & 0 & 0 & w_c \end{bmatrix}$ ;

$\vec{I} = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]^{tr}$ ;

$R_{maz} = \begin{bmatrix} -Lm^{-1}(\phi_A) + L_0^{-1} & -L_0^{-1} & -L_0^{-1} \\ -L_0^{-1} & -Lm^{-1}(\phi_B) + L_0^{-1} & -L_0^{-1} \\ -L_0^{-1} & -L_0^{-1} & -Lm^{-1}(\phi_C) + L_0^{-1} \end{bmatrix}$ ;  $Zero = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ .

Для получения дискретной математической модели трансформатора на основе неявных методов интегрирования заменим в (23) производные полином по (5). После соответствующих преобразований получим:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}^{(k+1)} \\ \vec{\phi}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{a_0}{h} L\sigma & \frac{a_0}{h} W^{tr} \\ \frac{a_0}{h} W & \frac{a_0}{h} R_{maz} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E} \\ \vec{Vt} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где:  $a_0, a_1, \dots, a_m$  - коэффициенты полинома в формуле (5),

$$\vec{E} = \left[ e_j^{-(k+1)} (t+h) - u_j^{-(k+1)} - \sum_{s=1}^m (a_s/h) \cdot (L_j \vec{i}_j^{-(k+1-s)} + w_j \vec{\phi}^{-(k+1-s)} \right], \quad j = (A, B, C, a, b, c),$$

$$\vec{\phi}^{-(k+1-s)} = \left[ \phi_A^{k+1-s}, \phi_B^{k+1-s}, \phi_C^{k+1-s}, \phi_A^{k+1-s}, \phi_B^{k+1-s}, \phi_C^{k+1-s} \right]^T,$$

$$\vec{Vt} = \begin{bmatrix} \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \left( -w_A i_A^{k+1-s} - w_a i_a^{k+1-s} + \frac{\phi_A^{k+1-s}}{Lm(\phi_A)} + \frac{1}{L_0} (F_0^{k+1-s}) \right) \\ \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \left( -w_B i_B^{k+1-s} - w_b i_b^{k+1-s} + \frac{\phi_B^{k+1-s}}{Lm(\phi_B)} + \frac{1}{L_0} (F_0^{k+1-s}) \right) \\ \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \left( -w_C i_C^{k+1-s} - w_c i_c^{k+1-s} + \frac{\phi_C^{k+1-s}}{Lm(\phi_C)} + \frac{1}{L_0} (F_0^{k+1-s}) \right) \end{bmatrix}.$$

С помощью приведенной дискретной математической модели элементов сети представляется возможным исследовать характер переходных процессов в системе собственных нужд электростанции с учетом взаимных индуктивностей и межфазных емкостей питающих линий, асинхронных двигателей, измерительных и присоединительных трансформаторов с учетом насыщения их магнитопроводов, нелинейных ограничителей перенапряжений, а также с учетом различных режимов работы нейтрали сети (заземленной через резистор или через дугогасящий реактор). В качестве примера приведем результаты моделирования переходного процесса при однофазном замыкании на землю в системе собственных 6 кВ электростанции, расчетная схема замещения которой приведена на рис.5.

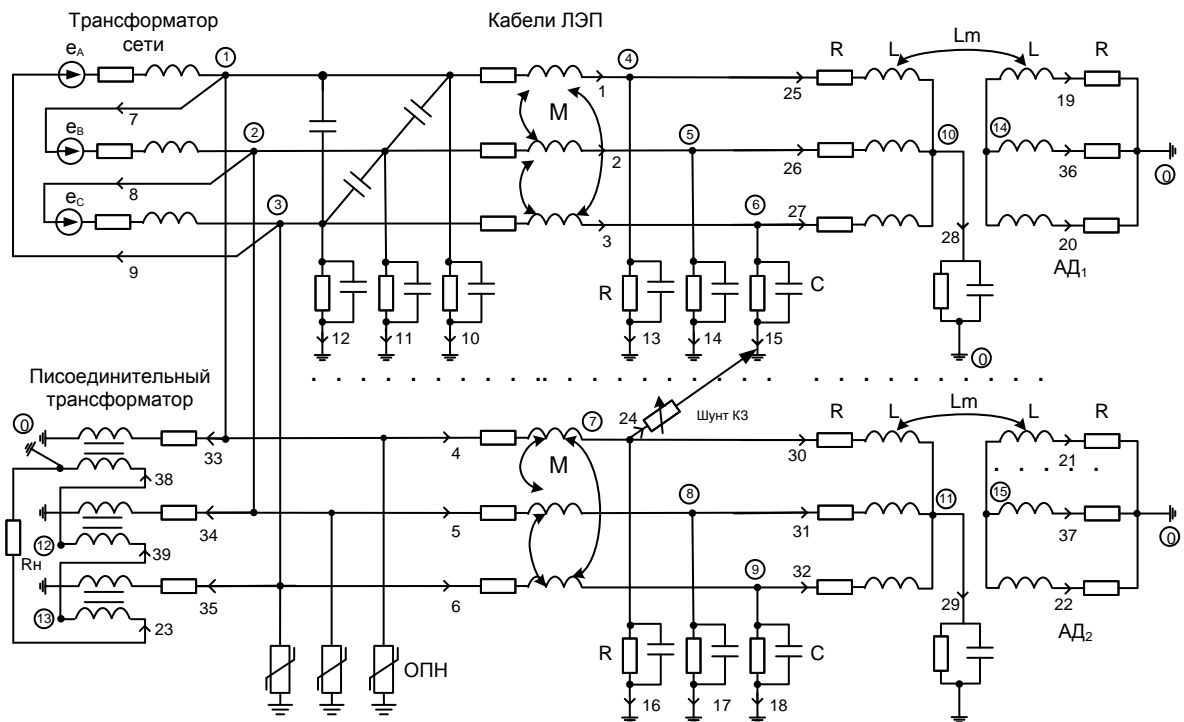


Рисунок 5 – Расчетная схема замещения сети 6 кВ для анализа процессов замыкания фазы на землю

На схеме замещения представлены асинхронные двигатели (АД1, АД2), питающие их кабельные линии, активно-емкостные сопротивления изоляции, питающий и присоединительный трансформатор с включенным в разомкнутый треугольник его вторичной обмотки низковольтным резистором. Результаты моделирования дугового замыкания одной из фаз сети на землю приведены на рис.6 и рис.7. На этих рисунках изображен процесс возникновения однофазного дугового замыкания на землю фазы А, перешедшего в глухое (в момент времени  $t_1 = 0,01$ с и  $t_2 = 0,02$ с возникает дуговое замыкание на землю и дуга сразу же гаснет при первом переходе через ноль тока высокочастотных колебаний, а в момент времени  $t_3 = 0,03$ с вновь возникшее

замыкание на землю переходит в глухое замыкание). На рис. 6, 7 отражен процесс изменения мгновенных значений напряжений фаз  $U_A$  и  $U_B$ , напряжения смещения нейтрали  $U_0$  и тока замыкания на землю  $i_z$ . Для напряжений принято в качестве базисного амплитудное номинальное фазное напряжение сети 6 кВ равное 4900 В. Для тока замыкания на землю  $i_z$  принято базисное значение 25 А. Расчеты выполнялись применительно к системе собственных нужд блока 300 МВт Зуевской ТЭС. Ток глухого замыкания фазы на землю исследуемой секции составляет 2,2 А при изолированной нейтрали сети. На рис.6 изображен процесс дугового замыкания на землю для этой же секции при изолированной нейтрали сети. Как видно (рис.6а), уровни перенапряжений в этом случае достигают 4,3 о.е. В токе замыкания на землю также присутствует высокочастотная составляющая (рис.6б), амплитуда которой достигает 125 А, а среднеквадратичное значение тока за время переходного процесса составило 23,9 А, что существенно превышает допустимый ток по ПУЭ [4] для двигательной нагрузки (10 А). Таким образом, предельное значение тока однофазного замыкания на землю для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой должно определяться с учетом токов при дуговых замыканиях, что в настоящее время не учитывается директивными материалами [4]. На рис.7 показан аналогичный процесс возникновения и развития однофазного замыкания на землю, но при заземлении нейтрали сети через низковольтный резистор, включенный в разомкнутый треугольник присоединительного трансформатора. Дополнительный активный ток в месте замыкания на землю составляет 3,5 А, а величина этого резистора эквивалентна заземлению нейтрали сети через высоковольтный резистор величиной 1000 Ом. Результирующий ток замыкания на землю при этом составил 4,2 А (рис.7б), а уровни перенапряжений снизились (рис.7а) до 2,4 о.е., при этом среднеквадратичное значение тока замыкания на землю составило 7,8 А при существенно сниженной величине максимальной амплитуды его высокочастотной составляющей (40 А).

#### Выводы.

1. Разработана математическая модель для анализа переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ, в которой уравнения асинхронных двигателей, трансформаторов и активно-емкостных сопротивлений изоляции представлены в естественных координатах  $a, b, c, 0$ .

2. С помощью разработанной модели представляется возможным исследовать коммутации вакуумных выключателей и перенапряжения на асинхронных двигателях в этих режимах, характер протекания феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях на землю и способы их предотвращения, а также оценить поведение различного типа устройств защиты от замыкания фазы на землю.

3. Результаты моделирования глухих и дуговых замыканий фазы на землю в системе собственных нужд 6 кВ электростанции показывают, что допустимые значения тока замыкания в системе электроснабжения с двигательной нагрузкой при длительном дуговом замыкании фазы на землю должны определяться с учетом среднеквадратичного значения высокочастотной составляющей суммарного тока замыкания на землю. Подтверждена целесообразность низковольтного резистивного заземления нейтрали сети.

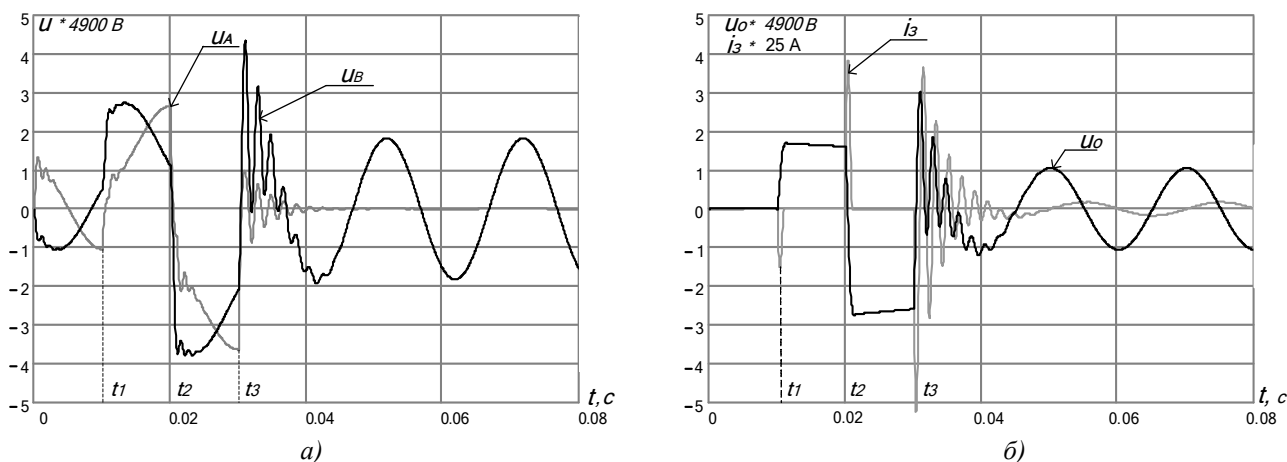


Рисунок 6 – Расчетные осциллограммы замыкания на землю фазы А при изолированной нейтрали сети: а) изменение напряжений поврежденной фазы ( $U_A$ ) и не поврежденной ( $U_B$ ); б) изменение тока замыкания на землю ( $i_z$ ) и напряжение смещения нейтрали сети ( $U_0$ )



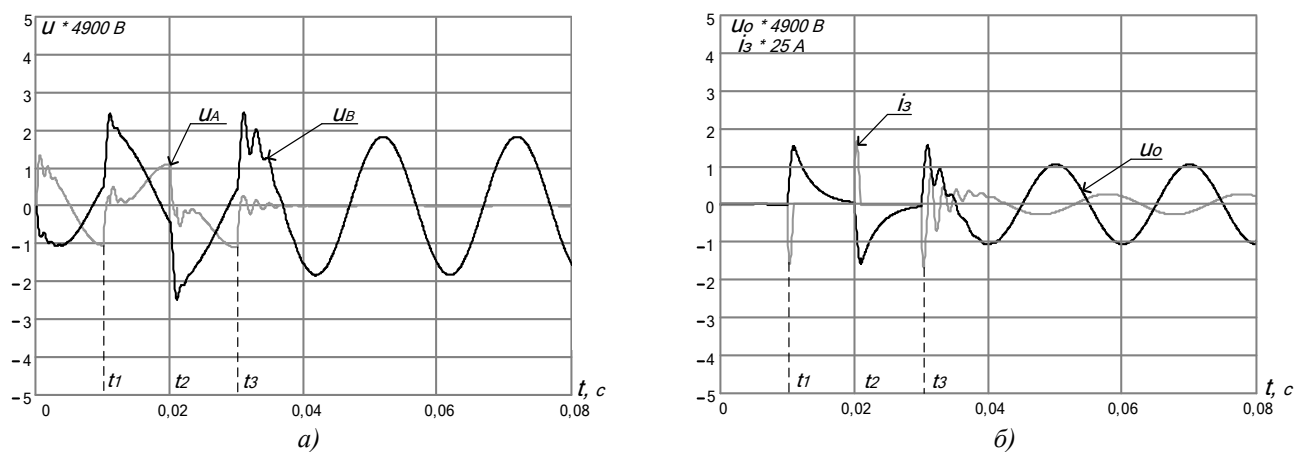


Рисунок 7 – Расчетные осциллограммы замыкания фазы А при резистивном заземлении нейтрали сети: а) изменение напряжения поврежденной фазы ( $U_A$ ) и не поврежденной ( $U_B$ ); б) изменение тока замыкания на землю ( $i_3$ ) и напряжения смещения нейтрали сети ( $U_0$ )

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС: циркуляр Ц-01-88. – М., 1988. – 7 с.
2. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов // Электричество. – 1998. - №12. – С. 8-22.
3. Сивокобыленко В.Ф. Выбор величины резистора для заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ / В.Ф. Сивокобыленко, В.К.Лебедев // VI міжнародна науково-технічна конф.: зб. праць. – Маріуполь: Вид-во ПДТУ, 2008. – С. 306-311.
4. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
5. Пристрої захисту трансформаторів напруги від ферорезонансних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю / А.В. Журахівський, Ю.А. Кенс, А.А. Горбатський та ін. // Збірник наукових праць Донецького Національного Технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. - 2000. – Вип. 21. - С.9-13.
6. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев. – Донецк, 2002. – 134с.
7. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики / В.С. Перхач. – Львів: Видавництво при Львівському Державному Університеті видавничого об'єднання «Вища Школа», 1982. – 378с.

Надійшла до редколегії 10.01.2011

Рецензент: І.П.Заболотний

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО, В.К. ЛЕБЕДЕВ,  
Р.П. СЕРДЮКОВ  
Донецький національний технічний університет

V. SIVOKOBYLENKO, V. LEBEDYEV,  
R. SERDJUKOV  
Donetsk National Technical University

**Розвиток математичної моделі для аналізу перехідних процесів у системі власних потреб електростанцій при замиканні фази на землю.** Розроблено математичну модель для аналізу перехідних процесів при замиканні фази на землю в системі 6 кВ власних потреб електростанцій, відмінною рисою якої є врахування асинхронних двигунів, силових і вимірювальних трансформаторів з урахуванням нелінійності їх параметрів. Модель дозволяє також досліджувати перехідні процеси в асинхронних двигунах при комутаціях вакуумними вимикачами, оцінити ефективність резистивного заземлення нейтралі мережі і умови виникнення ферорезонансних процесів.

**Development of Mathematical Model for the Analysis of Transients in Power Stations Auxiliaries at Phase-to-Ground Faults.** We developed a mathematical model for the analysis of transients at phase-to-ground faults in the system 6 kV of power stations auxiliaries. The distinctive feature of the model is considering of asynchronous motors, power and measuring transformers with taking into account the nonlinearity of their parameters. The model allows investigating the transients in asynchronous motors at vacuum switches commutations to estimate efficiency of resistive grounding of a neutral of a network and an occurrence of ferroresonance processes.