

СИМУЛЯЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Сивокобыленко В.Ф., Харченко П.А.
Донецкий национальный технический университет
svf@elf.dgtu.donetsk.ua, kra1982@mail.ru

Введение. В связи с бурным развитием устройств релейной защиты и автоматики электрических систем на основе микропроцессорных терминалов, возрастает необходимость в разработке моделей сложных переходных режимов, возникающих при различных повреждениях и работе коммутационной аппаратуры. Особенно актуальным становится моделирование в реальном масштабе времени. Среди множества различных подходов к симуляции переходных процессов в многомашинных электрических сетях, наиболее эффективные строятся на расчете мгновенных значений параметров режима (токов, напряжений в ветвях и узлах) путем решения полной системы дифференциальных уравнений (ДУ) элементов сети и ее межузловых связей. Как показано в [1], необходимая устойчивость решения, в сочетании с высокой скоростью и точностью, может быть достигнута за счет использования неявных многошаговых методов численного интегрирования, основанных на формулах дифференцирования назад (ФДН). Система ДУ при этом превращается в систему алгебраических уравнений, составленных на основе дискретных схем замещения элементов электрической сети.

Математические модели электрических машин при рассмотрении крупных электрических систем зачастую формируют, основываясь на упрощенных эквивалентных схемах замещения [2], [3]. При этом не учитываются нелинейности, вызванные явлением вытеснения тока в роторе, электрохимическими процессами, насыщением магнитопроводов. Такие модели позволяют рассчитывать с достаточной точностью переходные процессы при значительной удаленности места повреждения, однако при близких возмущениях могут давать неудовлетворительные результаты. Для анализа переходных процессов в таких системах, как главные схемы соединений и системы собственных нужд электрических станций, возникает необходимость точного математического описания значительного количества мощных электрических машин переменного тока. Особого внимания заслуживают математические модели синхронных явно- и неявнополюсных генераторов и двигателей, ввиду их асимметрии и сложностей, связанных с учетом массивных роторов, демпферных обмоток, а также насыщения в магнитопроводах.

Целью работы является разработка математических моделей электрической системы произвольной конфигурации и ее основных компонентов, сочетающих в себе возможности эффективного расчета сложных режимов при многократных коммутациях, с более точным описанием электрических машин, в частности, синхронных двигателей и генераторов.

Модель должна обладать высокой скоростью расчета для возможности моделирования системы или ее участков в масштабе реального времени, а также компактностью алгоритмов для внедрения в микропроцессорные терминалы.

Кроме того, должно быть предусмотрено автоматическое формирование системы дифференциальных уравнений, описывающих как отдельные элементы, так и систему в целом.

Основные положения. В силовых цепях электрических систем параметры нелинейных элементов, таких как индуктивности с ферромагнитным сердечником (трансформаторы и электрические машины в режиме насыщения), изменяются в достаточно узких пределах. В связи с этим, для определения состояния электрической цепи в конкретный момент времени целесообразно воспользоваться линейной дискретной моделью на основе ФДН, в которой параметры элементов на текущем шаге расчета будем считать постоянными. Представим схему замещения многоузловой электрической сети, как состоящую из R, L, C -двухполюсников с обобщенными параметрами.

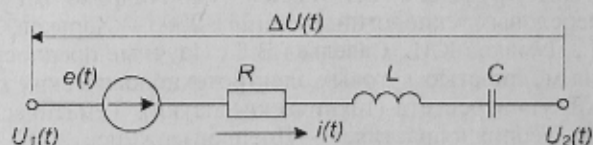


Рисунок 1 – Схема замещения ветви электрической системы с обобщенными параметрами

Обозначим напряжение на ветви $U_B = \Delta U = U_2 - U_1$, где U_2 и U_1 напряжения узлов начала и конца ветви соответственно. Воспользовавшись законом Ома для мгновенных значений токов и напряжений применительно к любой ветви (рис. 1), можем записать матрично-векторное уравнение, описывающее состояние ветвей всей схемы.

$$\overline{pI_B}^{(n+1)} = L_B^{-1} \cdot (\overline{E_B}^{(n+1)} - \overline{U_C}^{(n+1)} - \overline{U_B}^{(n+1)} - R_B \overline{I_B}^{(n+1)}), \quad (1)$$

где $R_B = \text{diag}(R_1 \ R_2 \ \dots \ R_p)$ – матрица сопротивлений ветвей схемы (p – число ветвей);

$$L_B = \begin{pmatrix} L_1 & L_{\mu 12} & \dots & L_{\mu 1p} \\ L_{\mu 21} & L_2 & \dots & L_{\mu 2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{\mu p1} & L_{\mu p2} & \dots & L_p \end{pmatrix} \text{ – матрица собственных и взаимных индуктивностей ветвей;}$$

$\overline{E_B}^{(n+1)} = (e_1 \ e_2 \ \dots \ e_p)^T$ – вектор ЭДС ветвей (шаг расчета $n+1$, момент времени $t+h$);

$\overline{U_B}^{(n+1)} = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p)^T$ – вектор напряжений ветвей; $\overline{I_B}^{(n+1)} = (i_1 \ i_2 \ \dots \ i_p)^T$ – вектор токов ветвей;

$\overline{U_C}^{(n+1)} = (u_{c1} \ u_{c2} \ \dots \ u_{cp})^T$ – вектор напряжений на емкостях ветвей;

$\overline{pI_B}^{(n+1)} = (pi_1 \ pi_2 \ \dots \ pi_p)^T$ – производные токов ветвей по времени (в момент $t+h$).

Матрично-векторное уравнение (1) записано для момента времени $t+h$ (h – шаг интегрирования, с), соответствующего $(n+1)$ -му шагу интегрирования.

Производные токов ветвей по времени $\overline{pI_B}^{(n+1)}$ можно также рассчитать приближенным численным методом по двум и более временным точкам токов $I_B(t)$. В качестве этих точек берем значения токов на текущем, следующем и нескольких предыдущих шагах интегрирования ДУ. Для обеспечения возможности изменения шага и порядка расчета воспользуемся общей формулой метода ФДН, или формулой Гира:

$$\left(\frac{dy}{dt} \right)^{(n+1)} = \frac{1}{h} \sum_{s=0}^p \alpha_s \cdot y^{-(n+1-s)}, \quad (2)$$

где α – вектор коэффициентов, зависящих от шага расчета и порядка метода (количества точек для определения производной), p – порядок метода, y – вектор неизвестных, h – шаг расчета, с.

Применим формулу Гира для расчета производных токов на текущем шаге, выделяя вектор неизвестных токов $\overline{I_B}^{(n+1)}$. Приравняем вектор производных к выражению (1):

$$\overline{pI_B}^{(n+1)} = \frac{1}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_B}^{(n+1-s)} + \frac{1}{h} \alpha_0 \cdot \overline{I_B}^{(n+1)} = L_B^{-1} \cdot (\overline{E_B}^{(n+1)} - \overline{U_C}^{(n+1)} - \overline{U_B}^{(n+1)} - R_B \overline{I_B}^{(n+1)}) \quad (3)$$

Выполнив алгебраические преобразования, получим:

$$(R_B + \frac{L_B}{h} \cdot \alpha_0) \cdot \overline{I_B}^{(n+1)} = \overline{E_B}^{(n+1)} - \overline{U_C}^{(n+1)} - \frac{L_B}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_B}^{(n+1-s)} - \overline{U_B}^{(n+1)}; \quad (4)$$

Разрешим уравнение (4) относительно токов, исключив $\overline{U_C}^{(n+1)}$. Для этого запишем выражение для производных $\frac{dU_C}{dt}^{(n+1)}$, используя формулу Гира, по аналогии с (3):

$$\overline{pU_C}^{(n+1)} = C_B^{-1} \cdot \overline{I_B}^{(n+1)} = \frac{1}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{U_C}^{(n+1-s)} + \frac{1}{h} \alpha_0 \cdot \overline{U_C}^{(n+1)}; \quad (5)$$

$$\overline{U_C}^{(n+1)} = \frac{h}{\alpha_0} \cdot C_B^{-1} \cdot \overline{I_B}^{(n+1)} - \frac{1}{\alpha_0} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{U_C}^{(n+1-s)}; \quad (6)$$

Подставляя (6) в (4), получим расчетное выражение для токов ветвей:

$$(R_B + \frac{L_B}{h} \cdot \alpha_0 + \frac{h}{\alpha_0} \cdot C_B^{-1}) \cdot \overline{I_B}^{(n+1)} = \overline{E_B}^{(n+1)} - \left(-\frac{1}{\alpha_0} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{U_C}^{(n+1-s)} \right) - \frac{L_B}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_B}^{(n+1-s)} - \overline{U_B}^{(n+1)}; \quad (7)$$

Очевидно, что слагаемые $\left(-\frac{1}{\alpha_0} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{U_C}^{(n+1-s)} \right)$ и $\left(\frac{L_B}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_B}^{(n+1-s)} \right)$ рассчитываются на основании

данных предыдущих шагов и имеют размерность напряжений. Поэтому их сумму можно представить, как вектор дискретных источников ЭДС, обусловленных мгновенными значениями запасенной электромагнитной энергии емкостей и индуктивностей ветвей схемы.

$$\overline{E_{\text{ин}}^{(n)}} = \left(-\frac{1}{\alpha_0} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{U_C}^{(n+1-s)} \right) + \frac{L_B}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_B}^{(n+1-s)}; \quad (8)$$

Матричное выражение $(R_B + \frac{L_B}{h} \cdot \alpha_0 + \frac{h}{\alpha_0} \cdot C_B^{-1})$, имеющее размерность сопротивлений и также рассчитываемое на основании данных предыдущих шагов, обозначим как матрицу дискретных сопротивлений ветвей $Z_B^{(n)}$. Тогда выражение (7) примет более простой вид:

$$Z_B^{(n)} \cdot \bar{I}_B^{(n+1)} = \bar{E}_B^{(n+1)} - \bar{E}_{\text{экс}}^{(n)} - \bar{U}_B^{(n+1)} \quad (9)$$

Полученная формула имеет вид, аналогичный закону Ома для установившегося режима. Это позволяет, в соответствии с данным уравнением, составить дискретную схему замещения для обобщенных ветвей цепи. Параметры такой схемы зависят от шага и порядка расчета и пересчитываются на каждом шаге интегрирования переходного процесса.

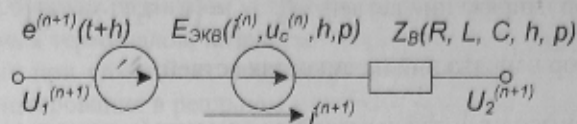


Рисунок 2 – Дискретная схема замещения обобщенной ветви электрической схемы

В случае многоузловой схемы уравнение (9) содержит два неизвестных вектора: $\bar{I}_B^{(n+1)}$ и $\bar{U}_B^{(n+1)}$. Для исключения $\bar{U}_B^{(n+1)}$ выразим $\bar{I}_B^{(n+1)}$ из (9) и воспользуемся первым законом Кирхгофа. Формула этого закона в матричном представлении имеет вид:

$$\Pi \cdot \bar{I}_B^{(n+1)} = 0, \quad (10)$$

где Π – матрица соединений схемы (соединения ветвей с узлами).

Выражение для определения токов ветвей:

$$\bar{I}_B^{(n+1)} = Y_B^{(n)} \cdot (\bar{E}_B^{(n+1)} - \bar{E}_{\text{экс}}^{(n)} - \bar{U}_B^{(n+1)}), \quad \text{где } Y_B^{(n)} = (Z_B^{(n)})^{-1}; \quad (11)$$

Умножаем обе части (11) на матрицу Π :

$$0 = \Pi \cdot Y_B^{(n)} \cdot (\bar{E}_B^{(n+1)} - \bar{E}_{\text{экс}}^{(n)}) - \Pi \cdot Y_B^{(n)} \cdot \bar{U}_B^{(n+1)}; \quad (12)$$

Для получения определенной системы уравнений применим топологическое соотношение $\bar{U}_B = \Pi^T \cdot \bar{U}_{\text{уз}}$. Преобразовав (12), приходим к уравнению, соответствующему методу узловых напряжений для анализа стационарных режимов.

$$Y_{\text{уз}}^{(n)} \cdot \bar{U}_{\text{уз}}^{(n+1)} = \Pi \cdot Y_B^{(n)} \cdot (\bar{E}_B^{(n+1)} - \bar{E}_{\text{экс}}^{(n)}), \quad (13)$$

где $Y_{\text{уз}}^{(n)} = \Pi \cdot Y_B^{(n)} \cdot \Pi^T$ – матрица узловых проводимостей схемы, $\bar{U}_{\text{уз}}$ – искомый вектор узловых напряжений (потенциалов).

Таким образом, уравнения (13) и (11) представляют собой дискретную модель обобщенной многоузловой схемы, не требующей применения итераций на каждом шаге расчета при линейных R_B , L_B , C_B . Если же они нелинейные, то для определения напряжений необходимо выполнить несколько итераций одним из методов решения систем нелинейных уравнений, например методом Ньютона. Алгоритм расчета отдельного шага переходного процесса будет аналогичен расчету установившегося режима:

1) Формируем матрицу соединений схемы – Π (Π^T).

2) Формируем матрицы параметров схемы – R_B , L_B и C_B . В случае нелинейных параметров матрицы рассчитываются по данным $\bar{I}_B^{(n)}$ или $\bar{U}_B^{(n)}$.

3) Определяем текущий шаг расчета h и порядок точности метода p [].

4) Вычисляем вектор коэффициентов ФДН α , зависящий от h и p .

5) Рассчитываем матрицы дискретных сопротивлений и проводимостей ветвей:

$$Z_B^{(n)} = (R_B + \frac{L_B}{h} \cdot \alpha_0 + \frac{h}{\alpha_0} \cdot C_B^{-1}), \quad Y_B^{(n)} = (Z_B^{(n)})^{-1}.$$

6) Вычисляем матрицу узловых проводимостей $Y_{\text{уз}}^{(n)} = \Pi \cdot Y_B^{(n)} \cdot \Pi^T$.

7) Обновляем вектор источников ЭДС схемы $\bar{E}_B^{(n+1)}(t+h)$.

8) Рассчитываем вектор эквивалентных дискретных ЭДС по (8).

9) Находим $\bar{U}_{\text{уз}}$, решая систему линейных уравнений (13).

10) Находим вектора напряжений и токов ветвей: $\bar{U}_B^{(n+1)} = \Pi^T \cdot \bar{U}_{\text{уз}}^{(n+1)}$,

$$\bar{I}_B^{(n+1)} = Y_B^{(n)} \cdot (\bar{E}_B^{(n+1)} - \bar{E}_{\text{экс}}^{(n)} - \bar{U}_B^{(n+1)}).$$

11) Находим вектор напряжений на емкостях по выражению (6).

12) Сохраняем предыдущие значения векторов \bar{I}_B и \bar{U}_c , необходимые для пунктов 8 и 11.

В общем случае, расчет по пунктам 2-12 выполняется в главном цикле моделирования переходного процесса. В случае постоянного шага и порядка пункты 3 и 4 выполняются один раз на первом шаге расчета с целью повышения производительности. Также при неизменных (линейных) R_B , L_B , и C_B , один раз выполняются пункты 2, 5 и 6. В целях оптимизации вычислительного процесса учитываем структурные особенности матриц: блочно-диагональную структуру $Z_B^{(n)}$ при обращении, разреженность $Y_{\text{мш}}^{(n)}$ при решении системы больших порядков, бинарность элементов матриц Π и Π^T в операциях перемножения.

Следует отметить, что вышеприведенный алгоритм позволяет моделировать коммутации простым скачкообразным изменением величин элементов матрицы R_B (или Z_B) в заданный момент времени благодаря использованию высокоустойчивого метода ФДН с величинами порядка $p = 2 \dots 6$.

При моделировании систем, содержащих электрические машины (ЭМ), применяется метод подсхем [4]. Машины при этом представляются многоконтурными схемами замещения для учета эффекта вытеснения тока в роторе. Рассмотрим дискретную математическую модель синхронного неявнополюсного двигателя (СД), также применимую для синхронных генераторов. Демпферные контуры ротора будут представлены двумя R, L -цепями в каждой из осей d и q (схема замещения показана в [5]).

Система дифференциальных уравнений синхронного электродвигателя, записанная во вращающейся системе координат d, q , жестко связанной с ротором, выглядит следующим образом:

$$L_d p \bar{I}_d = \bar{U}_d - R_d \bar{I}_d - \Omega(\omega) \cdot L_d \cdot \bar{I}_d, \quad (14)$$

$$p\omega = \frac{1}{T_j} (m(\dot{I}) - m_c), \quad (15)$$

$$p\gamma = \omega, \quad (16)$$

где

\bar{I}_d – вектор токов контуров СД (статора и ротора) по осям d и q , $\bar{I}_d = (i_{sd} \ i_{rd} \ i_{r2d} \ i_f \ i_{sq} \ i_{r1q} \ i_{r2q})^T$;

\bar{U}_d – вектор напряжений статора и возбуждения СД (d, q), $\bar{U}_d = (u_{sd} \ 0 \ 0 \ u_f \ u_{sq} \ 0 \ 0)^T$;

R_d – матрица сопротивлений контуров СД, $R_d = \text{diag}(r_{sd} \ r_{rd} \ r_{r2d} \ r_f \ r_{sq} \ r_{r1q} \ r_{r2q})$;

L_d – матрица индуктивностей контуров СД, $L_d = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix}$,

$$L_d = \begin{pmatrix} L_{sd} + L_{\mu d} & L_{\mu d} & L_{\mu d} & L_{\mu d} \\ L_{\mu d} & L_{rd} + L_{\mu d} & L_{\mu d} & L_{\mu d} \\ L_{\mu d} & L_{\mu d} & L_{r2d} + L_{\mu d} & L_{\mu d} \\ L_{\mu d} & L_{\mu d} & L_{\mu d} & I_f + L_{\mu d} \end{pmatrix}, \quad L_q = \begin{pmatrix} L_{sq} + L_{\mu q} & L_{\mu q} & L_{\mu q} \\ L_{\mu q} & L_{r1q} + L_{\mu q} & L_{\mu q} \\ L_{\mu q} & L_{\mu q} & L_{r2q} + L_{\mu q} \end{pmatrix};$$

$\Omega(\omega)$ – матрица, учитывающая скорости вращения ротора СД для расчета ЭДС;

$$\Omega(\omega) = \begin{pmatrix} 0 & \Omega_d(\omega) \\ \Omega_q(\omega) & 0 \end{pmatrix}, \quad \Omega_d(\omega) = \begin{pmatrix} -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \Omega_q(\omega) = \begin{pmatrix} \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$m(\dot{I}) = \frac{L_{\mu d} \cdot i_{sq} \cdot (i_{sd} + i_{rd} + i_{r2d} + i_f) - L_{\mu q} \cdot i_{sd} \cdot (i_{sq} + i_{r1q} + i_{r2q})}{\cos \varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}} \text{ – электромагнитный вращающий момент СД;}$$

m_c – момент сопротивления механизма, $o.e.$;

ω – скорость вращения ротора, $o.e.$;

T_j – механическая постоянная времени СД, $o.e.$;

$\cos \varphi_{ном}$, $\eta_{ном}$ – номинальные значения коэффициента мощности и КПД;

γ – угол поворота ротора относительно статора в данный момент времени, $o.e.$;

Вектор переменных состояния СД состоит из вектора токов \bar{I}_d , ω и γ :

$$V = \begin{pmatrix} \bar{I}_d \\ \omega \\ \gamma \end{pmatrix};$$

Система дифференциальных уравнений СД, ввиду нелинейности выражения для определения момента в (15), является нелинейной. С целью сокращения затрат машинного времени и учитывая, что величина T_j значительно превышает шаг расчета h , систему (14)-(16) целесообразно решать методом упрощенных итераций. Для нахождения токов контуров СД составим дискретную модель путем линейных алгебраических преобразований.

На первой итерации находим вектор токов и угол поворота γ при условии, что $\omega^{(n+1)} = \omega^{(n)}$, а затем находим первое приближение для $\omega^{(n+1)}$ по (21). На второй итерации окончательно находим все переменные.

Для составления дискретной схемы замещения на основе системы уравнений СД, необходимо привести ее в соответствие с (9) или (11). Применяя формулу Гира (2), выполним линейные преобразования.

$$L_{\text{д}} \overline{pI_{\text{д}}^{(n+1)}} = \overline{U_{\text{д}}^{(n+1)}} - R_{\text{д}} \overline{I_{\text{д}}^{(n+1)}} - \Omega(\omega) \cdot L_{\text{д}} \cdot \overline{I_{\text{д}}^{(n+1)}} = \frac{L_{\text{д}}}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_{\text{д}}^{(n+1-s)}} + \frac{L_{\text{д}}}{h} \cdot \alpha_0 \cdot \overline{I_{\text{д}}^{(n+1)}}, \quad (17)$$

$$\left(R_{\text{д}} + \frac{L_{\text{д}}}{h} \cdot \alpha_0 + \Omega(\omega) \cdot L_{\text{д}} \right) \cdot \overline{I_{\text{д}}^{(n+1)}} = \overline{U_{\text{д}}^{(n+1)}} - \frac{L_{\text{д}}}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_{\text{д}}^{(n+1-s)}}, \quad (18)$$

Для удобства введем обозначения:

$$Z_{\text{д}} = R_{\text{д}} + \frac{L_{\text{д}}}{h} \cdot \alpha_0 + \Omega(\omega) \cdot L_{\text{д}}; \quad Y_{\text{д}} = Z_{\text{д}}^{-1} - \text{соответственно матрицы дискретных сопротивлений и проводимостей двигателя;}$$

$$\overline{E_{\text{д.экв}}} = \frac{L_{\text{д}}}{h} \sum_{s=1}^p \alpha_s \cdot \overline{I_{\text{д}}^{(n+1-s)}} - \text{вектор дискретных ЭДС двигателя.}$$

Ввиду значительной инерционности нелинейной матрицы $\Omega(\omega)$ вполне обоснованно будет принять матрицы $Z_{\text{д}}$ и $\overline{E_{\text{д.экв}}}$ как параметры предыдущего шага интегрирования. Таким образом, дискретная математическая модель СД будет аналогична выражению для расчета токов в модели многоузловой схемы:

$$\overline{I_{\text{д}}^{(n+1)}} = Y_{\text{д}}^{(n)} \cdot (\overline{U_{\text{д}}^{(n+1)}} - \overline{E_{\text{д.экв}}^{(n)}}) \quad (19)$$

По данному уравнению составим дискретную схему замещения (ДСЗ) двигателя по осям d и q :

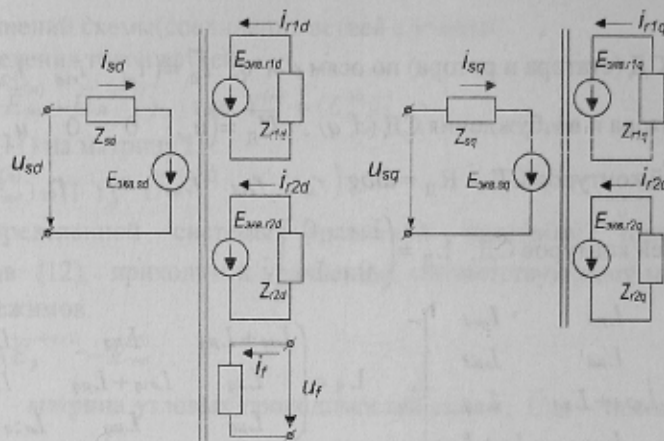


Рисунок 3 – Дискретная схема замещения синхронного двигателя в осях (d, q)

Величина угла поворота ротора γ , необходимая для перехода из неподвижной системы координат в систему d, q (а также для обратного перехода), находится из уравнения (16) в соответствие с формулой ФДН (2):

$$\gamma^{(n+1)} = \frac{\omega^{(n)} \cdot h - \sum_{s=1}^p (\alpha_s \cdot \gamma^{(n+1-s)})}{\alpha_0}; \quad (20)$$

Величина ω определяется аналогично:

$$\omega^{(n+1)} = \frac{[(m(I^{(n+1)}) - m_c) / T_j] \cdot h - \sum_{s=1}^p (\alpha_s \cdot \omega^{(n+1-s)})}{\alpha_0} \quad (21)$$

Угол поворота ротора γ определяется перед переводом статорных напряжений $U(t+h)$ в оси d, q , а частота вращения ω – после расчета токов $I^{(n+1)}$ согласно принятым допущениям.

Как и общая модель многоузловой схемы, вышеописанная модель СД соответствует модели стационарного режима для дискретной схемы замещения (ДСЗ), параметры которой с каждым шагом меняются. В данном случае вектор $\overline{E_{\text{д.экв}}}$ содержит источники ЭДС, а матрица $Y_{\text{д}}$ – проводимости ветвей статора и ротора синхронной машины в ДСЗ.

Математическая модель синхронной машины является составной частью модели многоузловой электрической схемы, состоящей из двухполюсников. Связь с дискретной моделью основной схемы осуществляется путем внедрения статорных ветвей ДСЗ электрических машин в матрицы ее параметров. (дополняются пункты 6, 8 вышеприведенного алгоритма). Элементы матрицы $Y_{\text{д}}^{(n)}$ и вектора $\overline{E_{\text{д.экв}}^{(n)}}$ общей схемы обновляются в нача-

ле каждого шага интегрирования данными, полученными из расчета всех электрических машин. Для синхронных машин при этом необходимо выполнить преобразования из вращающейся системы координат (d, q) в неподвижную (α, β) или (a, b, c) . После определения токов и напряжений общей схемы, по статорным напряжениям $(n+1)$ -го шага интегрирования (переведенным в систему d, q) производится расчет переменных состояния для каждой электрической машины (для СД – по (19), (20) и (21)).

Математические методы и модели, приведенные в данной работе, были реализованы и исследованы при помощи созданного для этой цели электротехнического редактора PowerNet™ Simulator. Моделирование различных режимов в сложных сетях показало высокую эффективность и широкую область применения рассмотренных алгоритмов, особенно при анализе работы устройств релейной защиты и автоматики, действия которых сопровождаются частыми коммутациями присоединений. Разработанные методы были проверены на точность и устойчивость при симуляции таких режимов, как короткие замыкания, обрывы фаз, неполнофазные отключения и коммутационные перенапряжения в крупных электрических системах.

Продемонстрируем работу программы PowerNet™ на примере моделирования электрической схемы блока Угледорской ТЭС 300 МВт с полным учетом электрических машин, включая генераторы, синхронные и асинхронные двигатели собственных нужд(СН) станции (рис. 3).

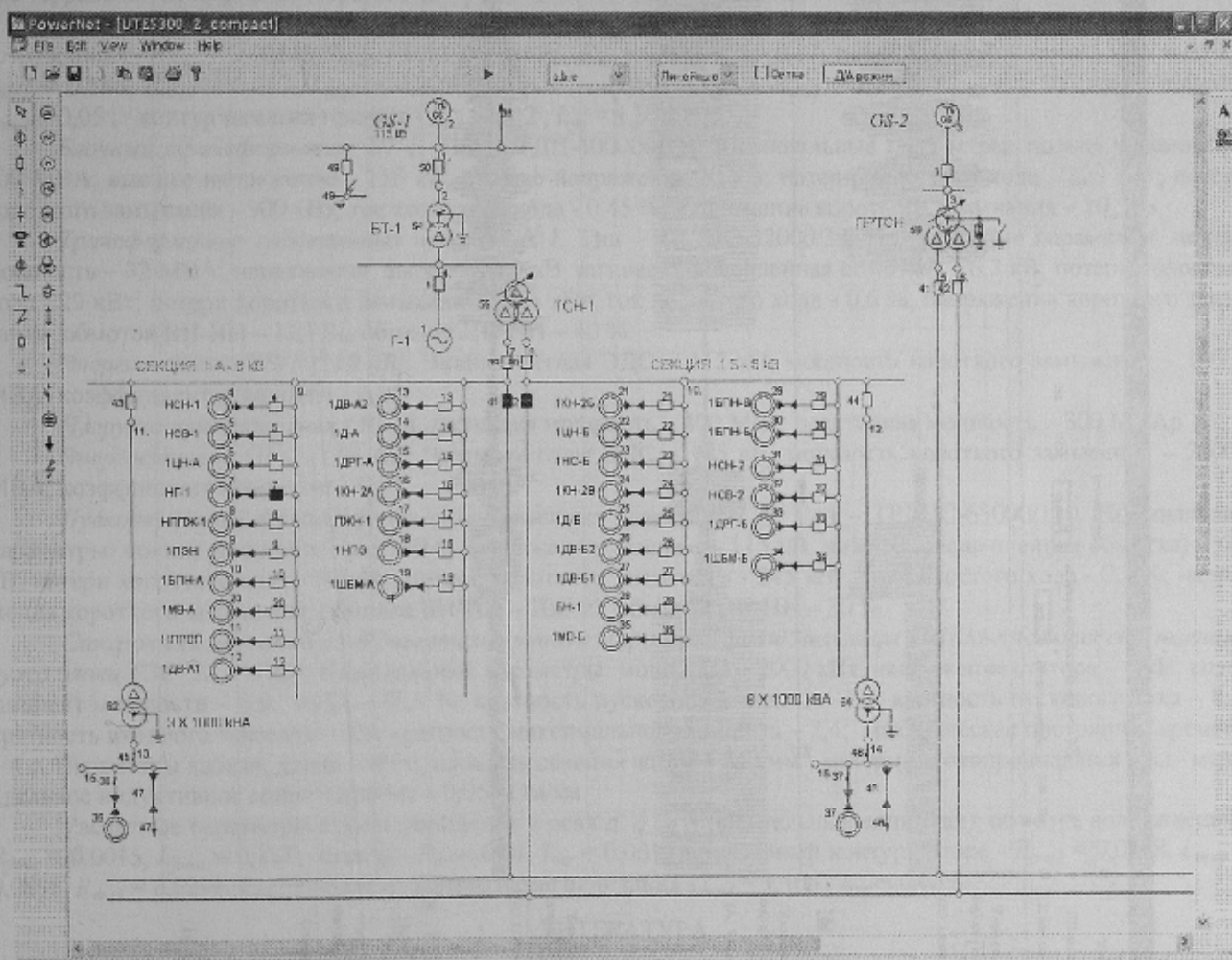


Рисунок 3 – Схема блока 300 МВт Угледорской ТЭС, набранная в интерактивном редакторе PowerNet™.

На данном примере промоделируем режимы, возникающие при следующей последовательности коммутаций:

- 0.0 с : нормальная работа;
- 1.0 с : трехфазное КЗ на пинах системы 110 кВ;
- 1.3 с : отключение выключателя на стороне ВН блочного трансформатора;
- 1.5 с : отключение выключателей рабочих вводов секций собственных нужд(СН) 6 кВ
- 2.0 с : включение выключателей резервных вводов секций СН 6 кВ с последующим групповым самозапуском двигателей;
- 2.1 с : устранение КЗ;
- 2.2 с : включение выключателя на стороне ВН блочного трансформатора;

На рис. 4 приведены расчетные осциллограммы токов генератора первого блока ТЭС и синхронного двигателя секции СН 6 кВ, а также напряжение на секции и частота вращения ротора СД. На графиках можно

наблюдать характер изменения тока в статоре генератора во время КЗ, при отключенном блочном трансформаторе, на холостом ходу, и в асинхронном возбужденном режиме. После включения резервных выключателей секции виден процесс самозапуска синхронного двигателя.

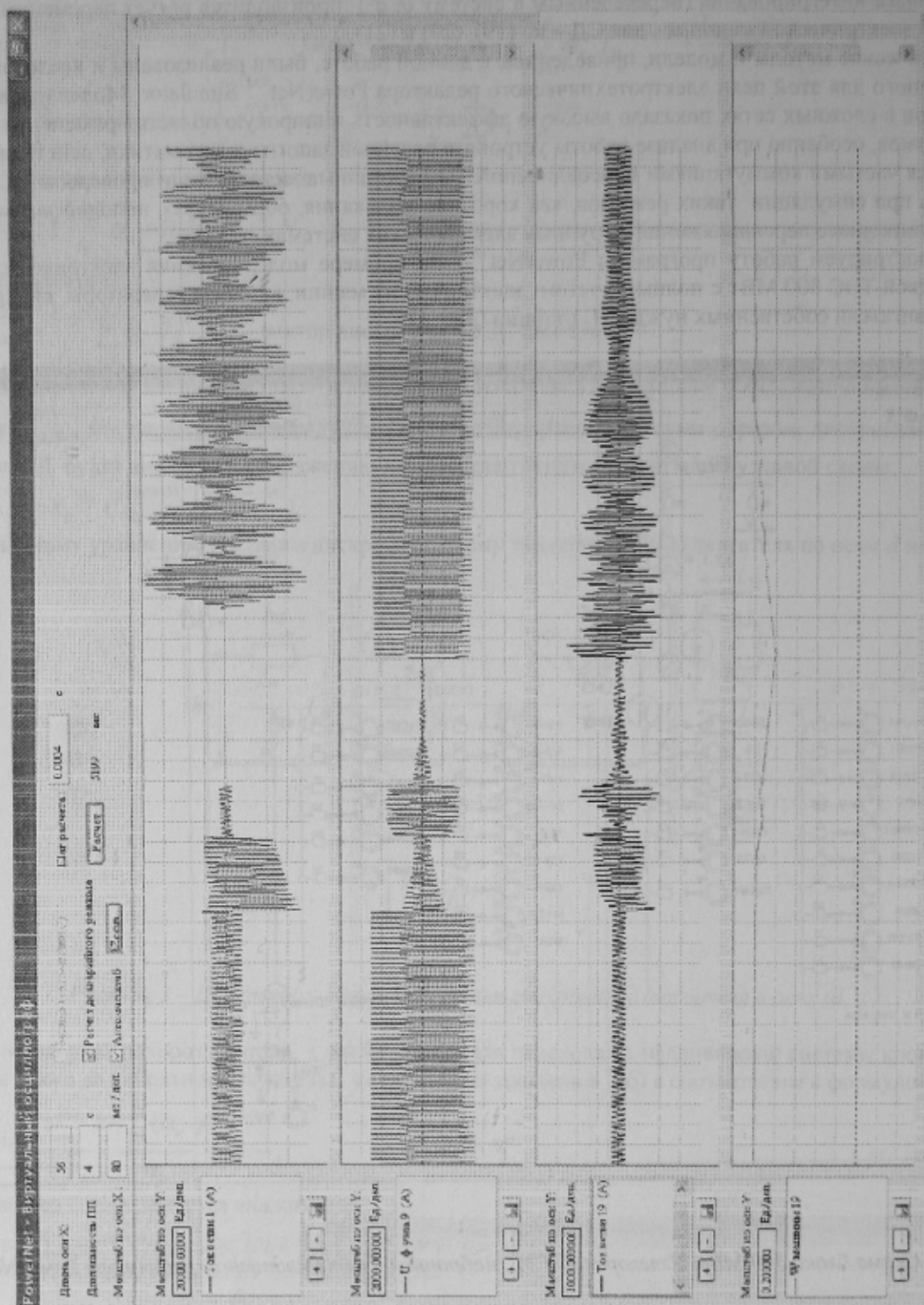


Рисунок 4 – Осциллограммы, полученные в результате моделирования в интерактивном редакторе PowerNet™. На верхнем графике – ток статора генератора Г-1, на втором - напряжение на секции СН 6 кВ, на третьем - ток в синхронном двигателе привода шароварабанной мельницы (ШБМ), на нижнем – частота вращения синхронного двигателя ШБМ

Параметры основных элементов исследуемого блока ТЭС приведены в приложении.

Выводы.

1. Разработаны дискретные математические модели электрической сети и ее компонентов, предназначенные для анализа сложных переходных режимов. Математические модели синхронных машин представлены как составные части общей модели многоузловой схемы. Для основных элементов силовых электрических схем

составлены дискретные схемы замещения, основанные на неявных методах численного интегрирования ДУ с применением метода ФДН переменного шага и порядка.

2. Разработанные модели основаны на матрично-векторных уравнениях с применением топологических матриц и ориентированы на автоматическое формирование системы ДУ электрической сети.

3. С использованием разработанных методов выполнен расчет переходных процессов в системе собственных нужд электрической станции, вызванных коротким замыканием и последующими действиями устройств релейной защиты и автоматики. Моделирование указанных режимов при использовании ранее разработанных моделей и программ данного профиля выполнить затруднительно.

4. Полученные результаты моделирования позволяют уточнить принципы действия и уставки устройств релейной защиты и автоматики в сложных электрических системах.

ПРИЛОЖЕНИЕ – ПАРАМЕТРЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИССЛЕДУЕМОЙ СХЕМЫ БЛОКА ТЭС

Генератор Г-1. Тип - ТГВ-300. Номинальные параметры: активная мощность - 300 МВт; напряжение статора - 20 кВ; коэффициент мощности - 0,85; КПД - 98,7 %. Генератор загружен по активной мощности на 100 %, рабочий коэффициент мощности - 0,85.

Расчетные параметры двухконтурной схемы замещения в осях d, q (в относительных единицах): обмотка возбуждения - $R_{fном} = 0,00145, L_{fном} = 0,139$; статор - $R_{\sigma\sigma} = 0,002, L_{\sigma\sigma} = 0,17$; первый контур ротора - $R_{\sigma r d 1} = 0,013, L_{\sigma r d 1} = 0,146, R_{\sigma r q 1} = 0,012, L_{\sigma r q 1} = 0,208$; второй контур ротора - $R_{\sigma r d 2} = 0,205, L_{\sigma r d 2} = 0,207, R_{\sigma r q 2} = 0,095, L_{\sigma r q 2} = 0,05$; контур намагничивания - $L_{\mu d} = 2,02, L_{\mu q} = 1,955$.

Блочный трансформатор БТ-1. Тип - ТДЦ-400000/110. Номинальные параметры: полная мощность - 400 МВА; высшее напряжение - 115 кВ; низшее напряжение 20 кВ; потери холостого хода - 320 кВт; потери короткого замыкания - 900 кВт; ток холостого хода - 0,45 %; напряжение короткого замыкания - 10,5 %.

Трансформатор собственных нужд ТСН-1. Тип - ТРДНС-32000/32. Номинальные параметры: полная мощность - 32 МВА; напряжения: высшее - 20 кВ, низшее (расщепленная обмотка) - 6,3 кВ; потери холостого хода - 29 кВт; потери короткого замыкания - 145 кВт; ток холостого хода - 0,6 %; напряжения короткого замыкания: обмоток ВН-НН - 12,7 %, обмоток НН-НН - 40 %.

Энергосистема GS-1 (110 кВ). Эквивалентная ЭДС - 112 кВ; мощность короткого замыкания - 10000 МВА; коэффициент мощности - 0,95.

Нагрузка присоединения 110 кВ. Активная мощность - 400 МВт; реактивная мощность - 300 МВАр.

Энергосистема GS-2 (110 кВ). Эквивалентная ЭДС - 115 кВ; мощность короткого замыкания - 20000 МВА; коэффициент мощности - 0,95.

Пускорезервный трансформатор собственных нужд ПРТСН. Тип - ТРДНС-63000/110. Номинальные параметры: полная мощность - 63 МВА; напряжения: высшее - 115 кВ, низшее (расщепленная обмотка) - 6,3 кВ; потери холостого хода - 50 кВт; потери короткого замыкания - 245 кВт; ток холостого хода - 0,5 %; напряжения короткого замыкания: обмоток ВН-НН - 10,5 %, обмоток НН-НН - 30 %.

Синхронный явнополюсный двигатель привода шаробарабанной мельницы 1ШБМ-А (секция собственных нужд блока ТЭС 1А - 6 кВ). Номинальные параметры: мощность - 2000 кВт; напряжение статора - 6 кВ; коэффициент мощности - 0,9; КПД - 95,9 %; кратность пускового момента - 1,4; кратность пускового тока - 8,2; кратность входного момента - 0,9; кратность максимального момента - 2,4; механическая постоянная времени - 4 с. Параметры кабеля: длина - 80 м, площадь сечения жилы - 240 мм², материал токопроводящих жил - медь, удельное индуктивное сопротивление - 0,051 Ом/км.

Расчетные параметры схемы замещения в осях d, q (в относительных единицах): обмотка возбуждения - $R_{fном} = 0,0015, L_{fном} = 0,137$; статор - $R_{\sigma\sigma} = 0,01, L_{\sigma\sigma} = 0,061$; демпферный контур ротора - $R_{\sigma r d 1} = 0,0388, L_{\sigma r d 1} = 0,0898, R_{\sigma r q 1} = 0,0291, L_{\sigma r q 1} = 0,0673$; контур намагничивания - $L_{\mu d} = 1,104, L_{\mu q} = 0,639$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демирчан К.С., Волков В.М., Карташев Е.Н. Сравнительный анализ методов численного дифференцирования при расчете переходных процессов электрических цепях. М. Электричество, 1976, №9 с. 47-51.
2. <http://www.eleks.lviv.ua>. Офіційний сайт компанії „EleksSoftware”
3. <http://www.mpei.ru>. Официальный сайт „Московский энергетический институт (ТУ)”
4. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. «Вища школа», Л. - 1989, 464 с.
5. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. Уч. пособие, Донецк, ДонНТУ, 2002. - 136 с.