

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКИ В РЕЖИМАХ ГРУППОВОГО ВЫБЕГА И САМОЗАПУСКА

Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Кукуй К.А.
 Донецкий национальный технический университет
 Svff@elf.dgtu.donetsk.ua

Is offered a mathematical loading knot model, which is containing the high-voltage asynchronous motors and static loading. All of loading knot elements described by full differential equalizations in relation to derivative currents, that allowed to be accorded analytic expressions for determination of voltage, generated by asynchronous motors in time of group running. Is considered a routine modeling example of group running and oneself launching of asynchronous motors.

В настоящее время для анализа режимов работы энергосистем широко используют методы математического моделирования. Большое развитие получили модели для расчета стационарных режимов, а также, основанные на упрощенных уравнениях Парка-Горева, модели для анализа статической и динамической устойчивости энергосистем.

В последнее время в связи с повышением требований к точности моделирования при разработке и создании высоконадежных систем собственных нужд (С.Н.) ТЭС, АЭС и других ответственных установок с мощными высоковольтными электродвигателями значительно возрос интерес к моделям многомашинных систем электроснабжения, основанным на полных уравнениях Парка-Горева как для двигателей, так и для всех элементов питающей сети. Актуальным является создание универсальных моделей, позволяющих исследовать как кратковременные (короткие замыкания, групповой выбег, АПВ, АВР), так и длительные (пуск, самозапуск) переходные процессы в группе машин (рис. 1) с учетом их взаимного влияния и зависимостей параметров от вытеснения токов и насыщения магнитных цепей.

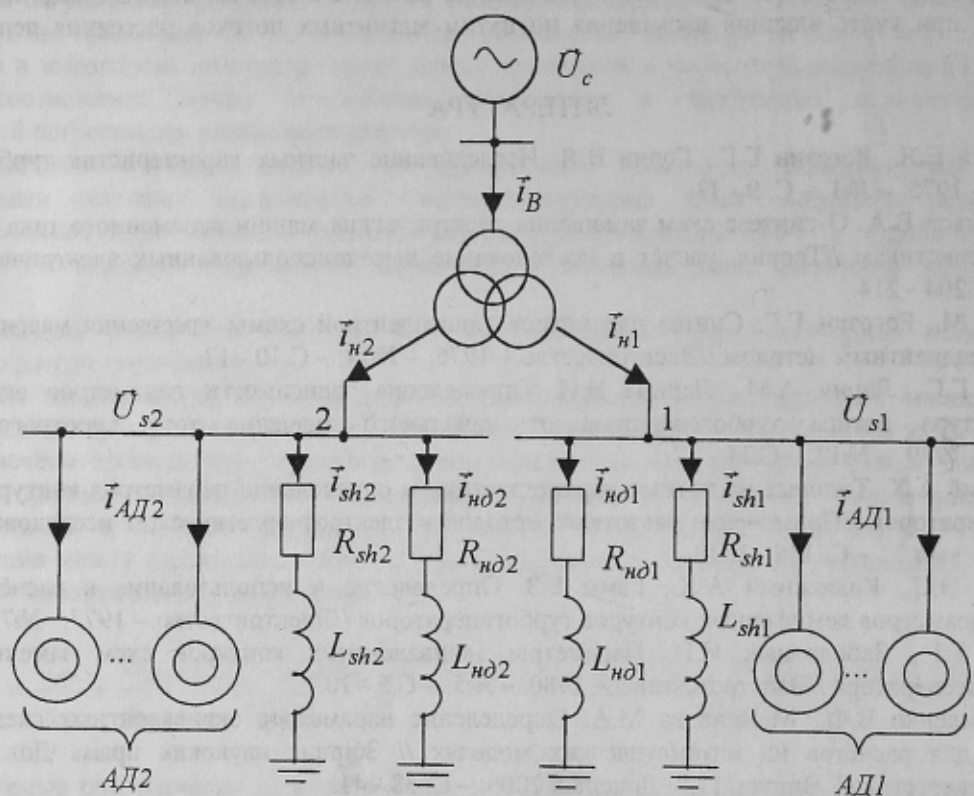


Рисунок 1 – Расчетная схема системы электроснабжения

Весьма распространен в системе С.Н. современных блочных ТЭС и АЭС режим группового выбега электродвигателей 6 кВ после отключения источника питания, имеющий очень большое значение в сочетании с последующим самозапуском для повышения надежности работы энергоблоков. В [1] изложена упрощенная методика расчета перерыва питания и самозапуска электродвигателей С.Н. электростанций, рекомендуемая для работников проектных, наладочных и эксплуатационных организаций. Недостатком данной методики является то, что она основана на упрощенных алгебраических уравнениях элементов С.Н. энергоблока и не позволяет

исследовать, например, режимы группового выбега электродвигателей, проходящие, как правило, с взаимным обменом энергией выбегающих агрегатов и требующие использования для описания дифференциальных уравнений. Кроме того, методика [1] также как и другие, например [2], не учитывают совсем или учитывают приближенно явления вытеснения тока в роторах глубокопазных асинхронных двигателей (АД) при самозапуске с помощью усредненных характеристик момента вращения и тока статора электродвигателей. Данная работа направлена на устранение указанных выше недостатков, а также на совершенствование математических моделей многомашинных систем, подробно описанных в [3, 4]. При этом ставится задача с помощью дифференциальных уравнений описать также режим группового выбега.

На рис.1 изображена одна из типовых схем системы электроснабжения, содержащая АД, статическую нагрузку и шунты на секциях для моделирования различной степени удаленности коротких замыканий на отходящих от шин присоединениях.

Таким образом, математическая модель рассматриваемой системы электроснабжения будет состоять из дифференциальных уравнений для ее основных элементов: питающего трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения, АД, статической нагрузки и активно-индуктивного шунта. Рассмотрим математические модели указанных элементов на основе их полных дифференциальных уравнений. При этом дифференциальные уравнения для АД, в отличие от [4], запишем относительно производных токов статора и контуров ротора, что позволит, как будет показано ниже, получить относительно простые аналитические выражения для определения на каждом шаге расчета неизвестных напряжений на секциях в узлах 1 и 2, необходимых для решения системы дифференциальных уравнений АД.

Математическая модель трансформатора с расщепленной обмоткой. Силовой трансформатор будем представлять Т-образной схемой замещения, изображенной на рис.2, где кроме активных и индуктивных сопротивлений обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений будем учитывать также индуктивное сопротивление его ветви намагничивания L_m . Сопротивления питающей линии электропередачи (ЛЭП) учтем в сопротивлениях обмотки ВН трансформатора.

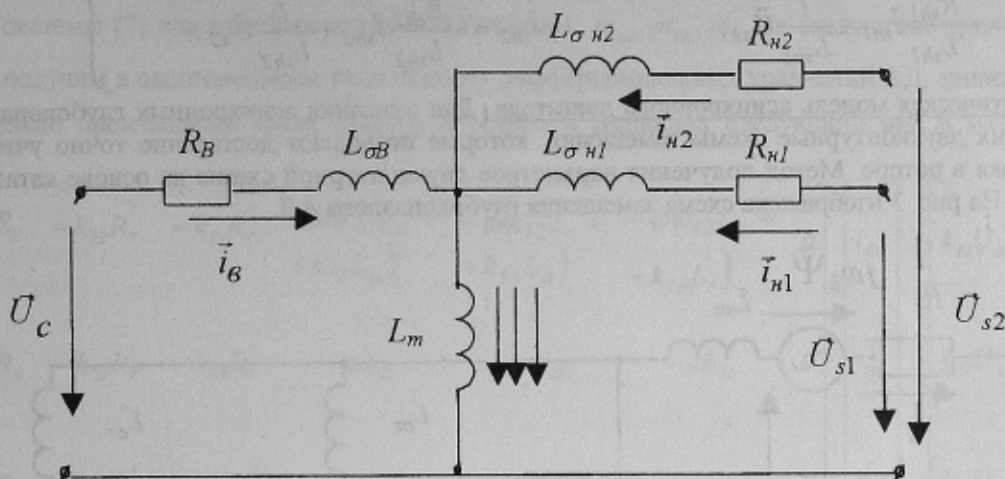


Рисунок 2 – Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Тогда для неподвижной системы координат ($\omega_k = 0$) дифференциальные уравнения обмоток трансформатора согласно второму закону Кирхгофа будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} R_B \vec{i}_B + L_{\sigma B} p \vec{i}_B + L_m p \vec{i}_B + L_m p \vec{i}_{H1} + L_m p \vec{i}_{H2} &= \vec{U}_c; \\ R_{H1} \vec{i}_{H1} + L_{\sigma H1} p \vec{i}_{H1} + L_m p \vec{i}_B + L_m p \vec{i}_{H1} + L_m p \vec{i}_{H2} &= \vec{U}_{s1}; \\ R_{H2} \vec{i}_{H2} + L_{\sigma H2} p \vec{i}_{H2} + L_m p \vec{i}_B + L_m p \vec{i}_{H1} + L_m p \vec{i}_{H2} &= \vec{U}_{s2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где p – символ дифференцирования, т.е. $\frac{d}{dt}$

Записав систему (1) в матричном виде, получим

$$\begin{bmatrix} L_{\sigma B} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_{\sigma H1} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_{\sigma H2} + L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \vec{i}_B \\ p \vec{i}_{H1} \\ p \vec{i}_{H2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{U}_c - R_B \vec{i}_B \\ \vec{U}_{s1} - R_{H1} \vec{i}_{H1} \\ \vec{U}_{s2} - R_{H2} \vec{i}_{H2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Для решения системы (2) относительно производных токов необходимо найти обратную матрицу индуктивностей трансформатора L^{-1} и умножить ее на правую часть системы (2), тогда получим дифференциальные уравнения трансформатора, записанные в форме Коши:

$$\left. \begin{aligned} p \vec{i}_B &= -a_{11} R_B \vec{i}_B - a_{12} R_{n1} \vec{i}_{n1} - a_{13} R_{n2} \vec{i}_{n2} + a_{11} \vec{U}_c + a_{12} \vec{U}_{s1} + a_{13} \vec{U}_{s2}; \\ p \vec{i}_{n1} &= -a_{21} R_B \vec{i}_B - a_{22} R_{n1} \vec{i}_{n1} - a_{23} R_{n2} \vec{i}_{n2} + a_{21} \vec{U}_c + a_{22} \vec{U}_{s1} + a_{23} \vec{U}_{s2}; \\ p \vec{i}_{n2} &= -a_{31} R_B \vec{i}_B - a_{32} R_{n1} \vec{i}_{n1} - a_{33} R_{n2} \vec{i}_{n2} + a_{31} \vec{U}_c + a_{32} \vec{U}_{s1} + a_{33} \vec{U}_{s2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$ – элементы обратной матрицы индуктивностей трансформатора.

Аналитические выражения для определения этих коэффициентов будут приведены далее.

Математическая модель статической нагрузки и шунтов. Для статических элементов сети и шунтов также используем неподвижную систему координат ($\omega_k = 0$), в которой дифференциальные уравнения статической нагрузки и шунтов, подключенных к узлам 1 и 2 схемы (рис. 1), будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} R_{n\partial 1} \vec{i}_{n\partial 1} + L_{n\partial 1} p \vec{i}_{n\partial 1} &= \vec{U}_{s1}; & R_{n\partial 2} \vec{i}_{n\partial 2} + L_{n\partial 2} p \vec{i}_{n\partial 2} &= \vec{U}_{s2}; \\ R_{sh1} \vec{i}_{sh1} + L_{sh1} p \vec{i}_{sh1} &= \vec{U}_{s1}; & R_{sh2} \vec{i}_{sh2} + L_{sh2} p \vec{i}_{sh2} &= \vec{U}_{s2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Или записав (4) в форме Коши, получим:

$$\left. \begin{aligned} p \vec{i}_{n\partial 1} &= -\frac{R_{n\partial 1}}{L_{n\partial 1}} \vec{i}_{n\partial 1} + \frac{1}{L_{n\partial 1}} \vec{U}_{s1}; & p \vec{i}_{n\partial 2} &= -\frac{R_{n\partial 2}}{L_{n\partial 2}} \vec{i}_{n\partial 2} + \frac{1}{L_{n\partial 2}} \vec{U}_{s2}; \\ p \vec{i}_{sh1} &= -\frac{R_{sh1}}{L_{sh1}} \vec{i}_{sh1} + \frac{1}{L_{sh1}} \vec{U}_{s1}; & p \vec{i}_{sh2} &= -\frac{R_{sh2}}{L_{sh2}} \vec{i}_{sh2} + \frac{1}{L_{sh2}} \vec{U}_{s2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Математическая модель асинхронного двигателя. Для описания асинхронных глубокопазных АД будем использовать их двухконтурные схемы замещения, которые позволяют достаточно точно учитывать явления вытеснения тока в роторе. Метод получения параметров двухконтурной схемы на основе каталожных данных изложен в [3]. На рис. 3 изображена схема замещения глубокопазного АД.

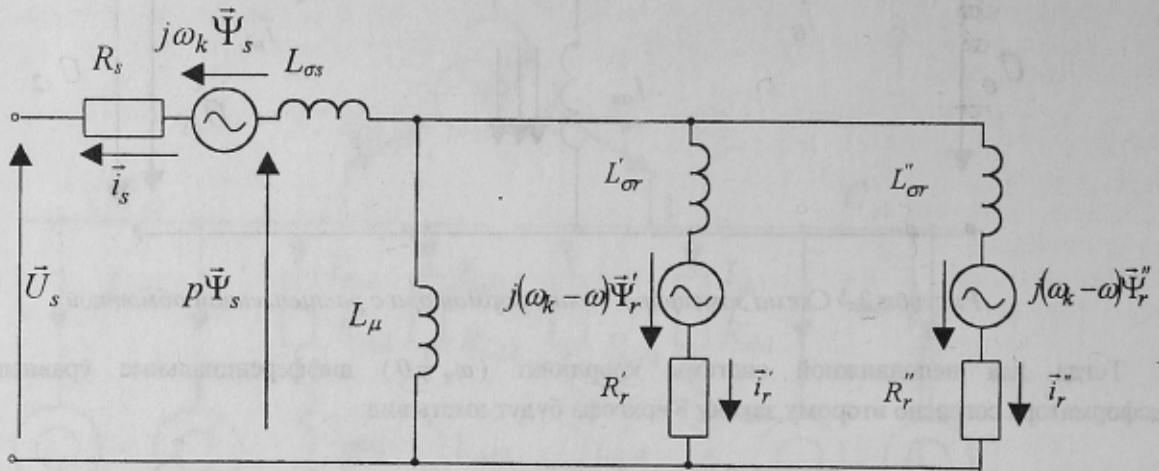


Рисунок 3 – Двухконтурная схема замещения АД в переходном режиме

Как следует из [4], дифференциальные уравнения, описывающие поведение АД в переходном режиме, записанные в относительных единицах для неподвижной системы координат ($\omega_k = 0$), можно представить как:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_s &= \vec{i}_s R_s + p \vec{\psi}_s; & p \omega &= (m_{эп} - m_c) / T_j \\ 0 &= \vec{i}_r' R_r' + p \vec{\psi}_r' - j \omega \vec{\psi}_r'; & m_{эп} &= \text{Re}(\vec{\psi}_s) \cdot \text{Im}(\vec{i}_s) - \text{Im}(\vec{\psi}_s) \cdot \text{Re}(\vec{i}_s); \\ 0 &= \vec{i}_r'' R_r'' + p \vec{\psi}_r'' - j \omega \vec{\psi}_r''; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\vec{U}_s, \vec{i}_s, \vec{i}'_r, \vec{i}''_r, \vec{\psi}_s, \vec{\psi}'_r, \vec{\psi}''_r$ - результирующие векторы напряжения, токов, и потокосцеплений статора и ротора; ω - частота вращения ротора; $m_{эл}, m_c$ - вращающий момент двигателя и момент сопротивления механизма; T_j - постоянная времени агрегата.

При записи дифференциальных уравнений (6) в проекциях на оси X, Y ортогональной системы координат для мгновенных значений переменных получим:

$$\left. \begin{aligned} U_{sx} &= i_{sx}R_s + p\psi_{sx}; & U_{sy} &= i_{sy}R_s + p\psi_{sy}; \\ 0 &= i'_{rx}R'_r + p\psi'_{rx} + \omega\psi'_{ry}; & 0 &= i'_{ry}R'_r + p\psi'_{ry} - \omega\psi'_{rx}; \\ 0 &= i''_{rx}R''_r + p\psi''_{rx} + \omega\psi''_{ry}; & 0 &= i''_{ry}R''_r + p\psi''_{ry} - \omega\psi''_{rx}; \\ p\omega &= \left[(\psi_{sx}i_{sy} - \psi_{sy}i_{sx}) - m_c \right] / T_j, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sx} &= L_{\sigma s}i_{sx} + L_{\mu}(i_{sx} + i'_{rx} + i''_{rx}); & \psi_{sy} &= L_{\sigma s}i_{sy} + L_{\mu}(i_{sy} + i'_{ry} + i''_{ry}) \\ \psi'_{rx} &= L'_{\sigma r}i'_{rx} + L_{\mu}(i_{sx} + i'_{rx} + i''_{rx}); & \psi'_{ry} &= L'_{\sigma r}i'_{ry} + L_{\mu}(i_{sy} + i'_{ry} + i''_{ry}); \\ \psi''_{rx} &= L''_{\sigma r}i''_{rx} + L_{\mu}(i_{sx} + i'_{rx} + i''_{rx}); & \psi''_{ry} &= L''_{\sigma r}i''_{ry} + L_{\mu}(i_{sy} + i'_{ry} + i''_{ry}). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Подставив (8) в (7), получим систему из семи дифференциальных уравнений, записанных относительно производных токов статора и токов контуров ротора соответственно по осям X и Y . После этого, решая первые три уравнения системы (7) как алгебраические относительно $p i'_{sx}, p i'_{rx}, p i''_{rx}$, а следующие три – относительно $p i_{sy}, p i'_{ry}, p i''_{ry}$, получим в окончательном виде систему дифференциальных уравнений АД, записанных в форме Коши относительно производных токов статора и ротора и имеющих следующий вид в матричной форме записи:

$$\begin{bmatrix} p i_{sx} \\ p i'_{rx} \\ p i''_{rx} \\ p i_{sy} \\ p i'_{ry} \\ p i''_{ry} \\ p \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_{11}R_s & -k_{12}R'_r & -k_{13}R''_r & -\omega(k_{12}L_{\mu} + k_{13}L_{\mu}) & -\omega(k_{12}L'_{\mu} + k_{13}L_{\mu}) & -\omega(k_{12}L_{\mu} + k_{13}L''_{\mu}) & 0 \\ -k_{12}R_s & -k_{22}R'_r & -k_{23}R''_r & -\omega b_{21} & -\omega b_{22} & -\omega b_{23} & 0 \\ -k_{13}R_s & -k_{23}R'_r & -k_{33}R''_r & -\omega b_{31} & -\omega b_{32} & -\omega b_{33} & 0 \\ \omega b_{11} & \omega b_{12} & \omega b_{13} & -k_{11}R_s & -k_{12}R'_r & -k_{13}R''_r & 0 \\ \omega b_{21} & \omega b_{22} & \omega b_{23} & -k_{12}R_s & -k_{22}R'_r & -k_{23}R''_r & 0 \\ \omega b_{31} & \omega b_{32} & \omega b_{33} & -k_{13}R_s & -k_{23}R'_r & -k_{33}R''_r & 0 \\ \frac{L_s \cdot i_{sy}}{T_j} & \frac{L_{\mu} \cdot i_{sy}}{T_j} & \frac{L_{\mu} \cdot i_{sy}}{T_j} & -\frac{L_s \cdot i_{sx}}{T_j} & -\frac{L_{\mu} \cdot i_{sx}}{T_j} & -\frac{L_{\mu} \cdot i_{sx}}{T_j} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i'_{rx} \\ i''_{rx} \\ i_{sy} \\ i'_{ry} \\ i''_{ry} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11}U_{sx} \\ k_{12}U_{sx} \\ k_{13}U_{sx} \\ k_{11}U_{sy} \\ k_{12}U_{sy} \\ k_{13}U_{sy} \\ -\frac{m_c}{T_j} \end{bmatrix} \quad (9)$$

где: $L_s = L_{\sigma s} + L_{\mu}$; $L'_r = L'_{\sigma r} + L_{\mu}$; $L''_r = L''_{\sigma r} + L_{\mu}$; $\Delta = L_s L'_r L''_r - L_{\mu}^2 (L_s + L'_r + L''_r) + 2L_{\mu}^3$;

$$k_{11} = \frac{L'_r L''_r - L_{\mu}^2}{\Delta}; \quad k_{22} = \frac{L_s L''_r - L_{\mu}^2}{\Delta}; \quad k_{33} = \frac{L_s L'_r - L_{\mu}^2}{\Delta};$$

$$\begin{aligned}
k_{12} &= \frac{L_{\mu}^2 - L_{\mu}L_r''}{\Delta}; & k_{13} &= \frac{L_{\mu}^2 - L_{\mu}L_r'}{\Delta}; & k_{23} &= \frac{L_{\mu}^2 - L_{\mu}L_s}{\Delta}; \\
b_{11} &= k_{12}L_{\mu} + k_{13}L_{\mu}; & b_{12} &= k_{12}L_r' + k_{13}L_{\mu}; & b_{13} &= k_{12}L_{\mu} + k_{13}L_r''; \\
b_{21} &= k_{22}L_{\mu} + k_{23}L_{\mu}; & b_{22} &= k_{22}L_r' + k_{23}L_{\mu}; & b_{23} &= k_{22}L_{\mu} + k_{23}L_r''; \\
b_{31} &= k_{23}L_{\mu} + k_{33}L_{\mu}; & b_{32} &= k_{23}L_r' + k_{33}L_{\mu}; & b_{33} &= k_{23}L_{\mu} + k_{33}L_r''.
\end{aligned}$$

Определение напряжения на секциях собственных нужд. При решении системы дифференциальных уравнений (9) на каждом шаге расчета необходимо знание мгновенных значений напряжений на секциях (рис. 1) $U_{sx1}, U_{sy1}, U_{sx2}, U_{sy2}$. Согласно первому закону Кирхгофа, записанному в дифференциальной форме для токов, узлов 1 и 2 расчетной схемы (рис. 1) при $\omega_k = 0$, справедливы следующие уравнения в осях X, Y:

$$\left. \begin{aligned}
p_{i_{n1x}} + \sum_1^{AД1} p_{i_{AД1x}} + p_{i_{n\delta 1x}} + p_{i_{sh1x}} &= 0; & p_{i_{n1y}} + \sum_1^{AД1} p_{i_{AД1y}} + p_{i_{n\delta 1y}} + p_{i_{sh1y}} &= 0; \\
p_{i_{n2x}} + \sum_1^{AД2} p_{i_{AД2x}} + p_{i_{n\delta 2x}} + p_{i_{sh2x}} &= 0; & p_{i_{n2y}} + \sum_1^{AД2} p_{i_{AД2y}} + p_{i_{n\delta 2y}} + p_{i_{sh2y}} &= 0.
\end{aligned} \right\} (10)$$

Подставив в (10) полученные ранее выражения для первых производных токов из (3), (5) и (9) элементов, подключенных к данному узлу, получим систему четырех алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными $U_{s1x}, U_{s1y}, U_{s2x}, U_{s2y}$. Решая первые два уравнения системы (10) относительно U_{s1x}, U_{s2x} , а вторые два – относительно U_{s1y}, U_{s2y} , получаем следующие аналитические выражения для определения напряжений на секциях 1 и 2 (рис. 1) на каждом шаге расчета:

$$\left. \begin{aligned}
U_{s1x} &= \frac{W_{1x}V_2 - W_{2x}a_{23}}{V_1V_2 - a_{23}a_{32}}; & U_{s1y} &= \frac{W_{1y}V_2 - W_{2y}a_{23}}{V_1V_2 - a_{23}a_{32}}; \\
U_{s2x} &= \frac{W_{2x}V_1 - W_{1x}a_{32}}{V_1V_2 - a_{23}a_{32}}; & U_{s2y} &= \frac{W_{2y}V_1 - W_{1y}a_{32}}{V_1V_2 - a_{23}a_{32}}.
\end{aligned} \right\} (11)$$

$$\text{где } V_1 = \frac{1}{L_{n\delta 1}} + \frac{1}{L_{sh1}} + \sum_1^{AД1} k_{11} + a_{22}; \quad V_2 = \frac{1}{L_{n\delta 2}} + \frac{1}{L_{sh2}} + \sum_1^{AД2} k_{11} + a_{33};$$

$$\begin{aligned}
W_{1x} &= \frac{R_{n\delta 1}}{L_{n\delta 1}} i_{n\delta 1x} + \frac{R_{sh1}}{L_{sh1}} i_{sh1x} + \sum_1^{AД1} (k_{11}R_s i_{sx} + k_{12}R_r' i_{rx}' + k_{13}R_r'' i_{rx}'') + \\
&+ \sum_1^{AД1} \omega (b_{11}i_{sy} + b_{12}i_{ry}' + b_{13}i_{ry}'') + a_{21}R_B i_{Bx} + a_{22}R_{n1} i_{n1x} + a_{23}R_{n2} i_{n2x} - a_{21}U_{cx};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{2x} &= \frac{R_{n\delta 2}}{L_{n\delta 2}} i_{n\delta 2x} + \frac{R_{sh2}}{L_{sh2}} i_{sh2x} + \sum_1^{AД2} (k_{11}R_s i_{sx} + k_{12}R_r' i_{rx}' + k_{13}R_r'' i_{rx}'') + \\
&+ \sum_1^{AД2} \omega (b_{11}i_{sy} + b_{12}i_{ry}' + b_{13}i_{ry}'') + a_{31}R_B i_{Bx} + a_{32}R_{n1} i_{n1x} + a_{33}R_{n2} i_{n2x} - a_{31}U_{cx};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{1y} &= \frac{R_{n\delta 1}}{L_{n\delta 1}} i_{n\delta 1y} + \frac{R_{sh1}}{L_{sh1}} i_{sh1y} + \sum_1^{AД1} (k_{11}R_s i_{sy} + k_{12}R_r' i_{ry}' + k_{13}R_r'' i_{ry}'') - \\
&- \sum_1^{AД1} \omega (b_{11}i_{sx} + b_{12}i_{rx}' + b_{13}i_{rx}'') + a_{21}R_B i_{By} + a_{22}R_{n1} i_{n1y} + a_{23}R_{n2} i_{n2y} - a_{21}U_{cy};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{2y} &= \frac{R_{n\delta 2}}{L_{n\delta 2}} i_{n\delta 2y} + \frac{R_{sh2}}{L_{sh2}} i_{sh2y} + \sum_1^{AД2} (k_{11}R_s i_{sy} + k_{12}R_r' i_{ry}' + k_{13}R_r'' i_{ry}'') - \\
&- \sum_1^{AД2} \omega (b_{11}i_{sx} + b_{12}i_{rx}' + b_{13}i_{rx}'') + a_{31}R_B i_{By} + a_{32}R_{n1} i_{n1y} + a_{33}R_{n2} i_{n2y} - a_{31}U_{cy}.
\end{aligned}$$

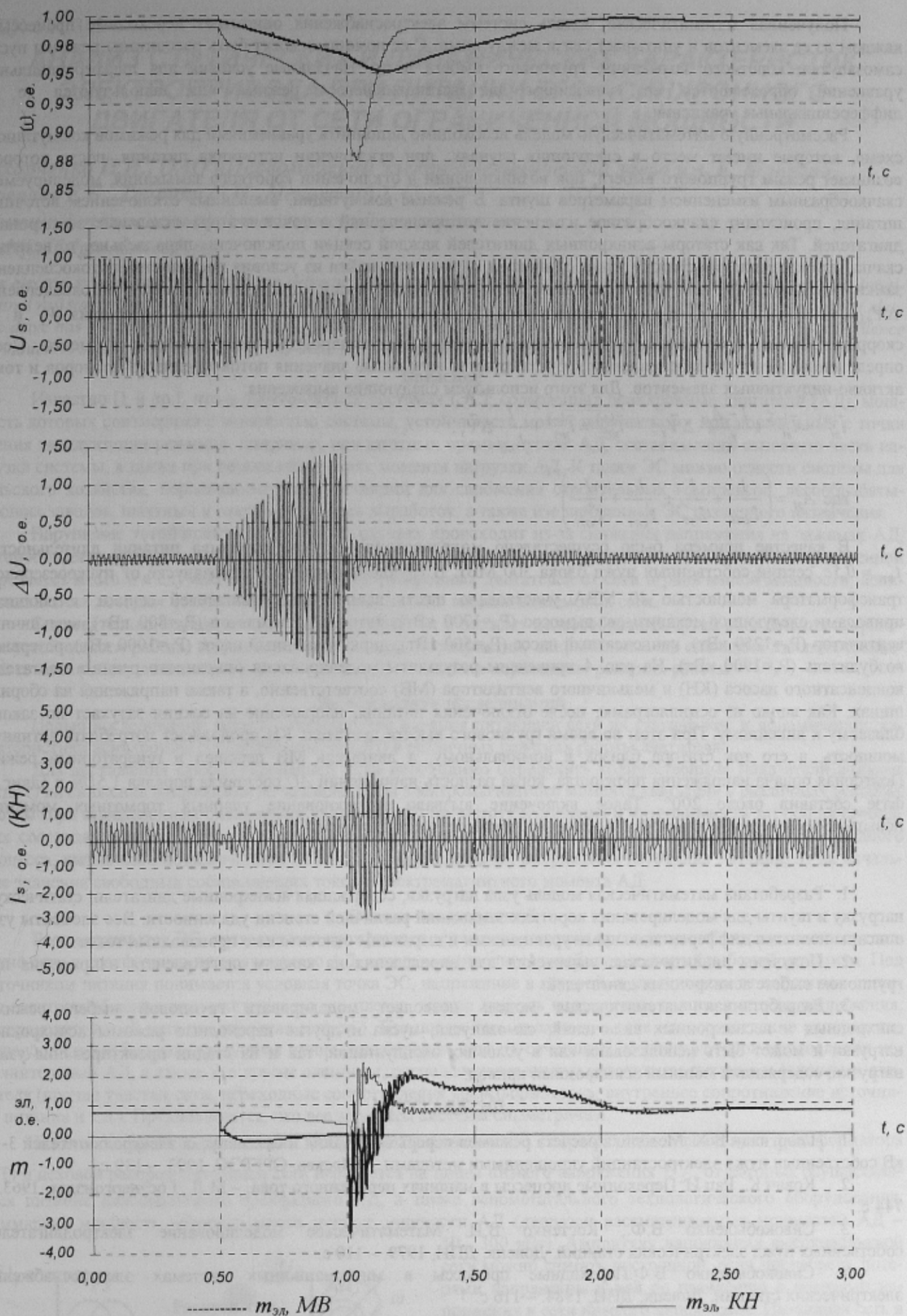


Рисунок 4 – Изменение напряжения на секции (U_s), разности напряжений секции и системы (ΔU), тока статора (I_s), электромагнитного момента ($m_{эл}$) и частоты вращения двигателя (ω) конденсатного насоса и мельничного вентилятора при отключении питания секции на время 0,5 с

Полученная математическая модель системы электроснабжения описывает переходные процессы в каждом из ее элементов и учитывает связи между ними. С ее помощью могут быть рассчитаны режимы пуска, самозапуска, короткого замыкания, группового выбега и др. Начальные условия для дифференциальных уравнений определяются по уравнениям для установившегося режима или используются те же дифференциальные уравнения.

Рассмотренную математическую модель необходимо дополнить уравнениями для режимов коммутаций в схеме, которые имеют место в следующих случаях: при отключении источника питания, после которого возникает режим группового выбега; при возникновении и отключении короткого замыкания, моделируемого скачкообразным изменением параметров шунта. В режиме коммутаций, вызванных отключением источника питания, происходит скачкообразное изменение потокосцеплений и токов статора отдельных асинхронных двигателей. Так как статоры асинхронных двигателей каждой секции подключены параллельно, то величина скачка потокосцеплений статора у них одинакова, и ее можно найти из условия постоянства потокосцеплений замкнутых статорных контуров в режимах до и после коммутаций. Для расчета скачков потокосцеплений $\Delta\Psi_{s1x}$, $\Delta\Psi_{s1y}$, $\Delta\Psi_{s2x}$, $\Delta\Psi_{s2y}$ используются формулы системы (11), в которых выражения V_1 и V_2 скорректированы путем исключения из них обратной индуктивности коммутируемого элемента. После определения скачка потокосцеплений корректируются начальные значения потокосцеплений статоров и токов активно-индуктивных элементов. Для этого используем следующие выражения:

$$\bar{i}_{si}^{(+)} = \bar{i}_{si}^{(-)} + \frac{1 - A_{si}}{L_{\sigma si}} \Delta\bar{\Psi}_s; \quad \bar{i}_{нд}^{(+)} = \bar{i}_{нд}^{(-)} + \frac{1}{L_{нд}} \Delta\bar{\Psi}_s,$$

$$\text{где } A_{si} = \left(\frac{1}{L_{\sigma si}} + \frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L'_{\sigma ri}} + \frac{1}{L''_{\sigma ri}} \right)^{-1}$$

В качестве примера было осуществлено моделирование режима перерыва питания длительностью $t_{nn} = 0,5c$ секции собственных нужд блока 300 МВт. В групповом выбеге и самозапуске от пускорезервного трансформатора мощностью 40 МВА участвовало шесть асинхронных двигателей секции, являющихся приводами следующих механизмов: дымосос ($P_n=1700$ кВт), дутьевой вентилятор ($P_n=800$ кВт), мельничный вентилятор ($P_n=1250$ кВт), конденсатный насос ($P_n=500$ кВт), циркуляционный насос ($P_n=1000$ кВт), резервный возбудитель ($P_n=1900$ кВт). На рис. 4 приведены результаты моделирования описанного режима двигателей конденсатного насоса (КН) и мельничного вентилятора (МВ) соответственно, а также напряжения на сборных шинах. Как видно из осциллограмм, после отключения питания, напряжение на секции затухает по закону, близкому к линейному. При этом во время группового выбега двигатель КН продолжает потреблять активную мощность, а его ток статора близок к номинальному, а двигатель МВ перешел в генераторный режим. Повторная подача напряжения произошла, когда разность напряжений ΔU составила порядка $1,5U_n$, а сдвиг по фазе составил около 200° . Такое включение вызвало возникновение ударных тормозных моментов повышенных значений, что вызвало усиленное торможение двигателей.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель узла нагрузки, содержащая асинхронные двигатели, статическую нагрузку и шунты для моделирования коротких замыканий различной степени удаленности. Все элементы узла описаны полными дифференциальными уравнениями и выражены относительно производных токов.
2. Получены аналитические выражения для определения на каждом шаге расчета напряжения при групповом выбеге асинхронных двигателей.
3. Разработанная математическая модель позволяет моделировать групповой выбег, режимы синхронных и несинхронных включений, самозапуска, пуска и другие переходные режимы асинхронной нагрузки и может быть использована как в условиях эксплуатации, так и на стадии проектирования узлов нагрузки, содержащих мощный асинхронный привод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгиади В.Х. Методика расчета режимов перерыва питания и самозапуска электродвигателей 3-10 кВ собственных нужд электростанций упрощенными методами. — Москва, ОРГРЭС, 1993. — 139 с.
2. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. — М.Л., Госэнергоиздат, 1963. — 744 с.
3. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. Донецк, ДПИ, 1979. — 110 с.
4. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций. Донецк, ДПИ, 1984. — 116 с.