

# УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

В.А. Гришанов, И.П. Заболотный

Донецкий Национальный Технический Университет

Украина, 83000, г.Донецк, ул. Артёма 58.

Тел./факс: (062)301-03-07, E-mail:ivp@elf.dgtu.donetsk.ua; serg@elf.dgtu.donetsk.ua

**Annotation - The development results of mathematical model of the electric system are realized in the automated control system for realization of model support of decision-making the personnel of thermal electric part are presented in the article. The specified model provides the analysis of transitional processes in the chains of excitation, and also modes of electric part and connections.**

**Key words - Mathematical model, decision-making the personnel, specified model provides, analysis of transitional processes.**

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Необходимым условием использования математического моделирования при управлении электроэнергетическими системами (ЭЭС) является построение адекватной модели, в необходимой степени воспроизводящей особенности процессов и учитывающей цели управления.

Многообразие задач проектирования и эксплуатации ЭЭС, развитие технологий ведения информации и программирования определили создание множества математических моделей и программных продуктов [1-7].

Использование математического моделирования в автоматизированных системах управления электроэнергетическими объектами рассматривается в ряде работ. В [8] для повышения эффективности формируемых персоналом решений предложено в рамках системы управления создание подсистемы поддержки процесса принятия решений на основе интеграции информационной, модельной и экспертной технологий.

На основании анализа возможностей математических моделей и программных продуктов, особенностей технологических задач управления электроэнергетическими объектами, тенденций развития систем управления можно выделить следующее:

1) наиболее перспективным является использование имитационного моделирования в подсистемах поддержки процесса принятия решения;

2) процесс функционирования сложной системы целесообразно представлять как совокупность действий и элементов, подчиненных единой цели;

3) математическая модель электроэнергетического объекта состоит из математических моделей элементов и математической модели взаимодействия между элементами, математических моделей устройств и систем управления и защиты, поэтому и процесс уточнения математической модели должен содержать этап уточнения названных моделей и создания микро и макро блоков;

4) математическая модель объекта должна обеспечивать воспроизведение множества режимов (всерезимная модель), при учете существующих технологических процессов в функционировании объекта.

5) отвечать требованиям построения открытых систем Common Information Model (CIM).

В [6-8] изложены результаты разработки инструментария, в котором адаптируемая модель ЭЭС, состоящей из слагающих, в различной степени отвечает отмеченным факторам. В инструментарии программных средств реализован структурно-функциональный подход и предусматривается использование моделей элементов системы и их систем регулирования и защиты.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является развитие средств моделирования для подсистемы поддержки процесса принятия решений системы управления электрической частью ТЭС с целью получения информации о спектре процессов при нормальных и аварийных режимах работы.

Реализация всережимного моделирования исключает необходимость значимых упрощений и ограничений для математических моделей и условий их решения. Анализ подходов решения технологических задач позволяет выделить следующие направления:

1) имитационное моделирование режимов во времени, которое можно разделить на группы:

- переходные процессы в цепях возбуждения, связанные например с гашением магнитного поля, в том числе и с использованием автоматических выключателей вместо традиционных автоматов гашения поля (АГП), в различных режимах работы генератора: холостой ход, работа генератора в сети, короткие замыкания;

- режимы электрической части ТЭС;

- режимы межсистемных связей;

2) распознавание классов характерных режимов, необходимое для настройки устройств противоаварийного управления (АРЧМ, АРВ, противоаварийной автоматики).

3) сочетание методов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ существующих моделей и программных продуктов, используемых в системах управления, позволяет отметить их ограничения:

- отсутствие возможности исследования и контроля процессов, связанных в отключением цепей

в обмотках возбуждения и статора генератора и расчетом наводимых напряжений с последующим использованием при дальнейших операциях, приводящих к замыканиям обмоток;

- отсутствием моделей современных устройств ограничения токов короткого замыкания и современных устройств управления режимами;

- использование схем замещения синхронных генераторов в лучших вариантах с одной демпферной обмоткой по оси d и двумя – по оси q.

Совершенствование математической модели связано с реализацией концепции о первичности задачи и условий ее решения, а необходимые для ее решения средства создаются путем объединения различных известных и специально разработанных новых средств [9].

Математическая модель объекта состоит из математических моделей элементов и математической модели взаимодействия между элементами [10].

Исходя из этого, процесс совершенствования математической модели ЭЭС должен рассматриваться как последовательность двух этапов: развития моделей отдельных элементов и развитие модели их взаимодействия.

Взаимодействие электрически связанных элементов наиболее естественно организовать посредством таких электрических параметров режима как токи и напряжения, которые связаны следующим уравнением [2, 11-12]:

$$p\mathcal{F} = \pm A \cdot \mathcal{U} - B \cdot \mathcal{F} - H, \quad (1)$$

где  $I, pI$  – векторы токов и производных токов (для машин переменного тока – статорных) элементов;  $U$  – вектор напряжений, приложенных между внешними зажимами элемента;  $A, B$  – матрицы, размерность которых зависит от системы координат в которых моделируется структурный элемент (d, q или a, b, c);  $H$  – вектор, определяющий воздействие на элемент со стороны средств регулирования электрических параметров.

Уравнения (1) решаются на каждом шаге расчета методом численного интегрирования относительно внешних токов структурного элемента. При этом следует отметить, что для пассивных элементов выражение (1) содержит всю систему дифференциальных уравнений элемента. Для электрических машин уравнения (1) следует интегрировать совместно с уравнениями роторных контуров и уравнениями, описывающими механическое состояние элемента. Напряжения узлов расчетной схемы используются при решении дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в элементах системы.

Напряжения в узлах схемы определяются путем решения системы уравнений, полученной на основе первого закона Кирхгофа для производных токов.

В [6, 12] для определения производных токов используется численное дифференцирование токов.

В [5] модель СМ представляет систему дифференциальных уравнений для производных токов в обмотке статора, возбуждения, демпферных контурах.

Эта система уравнений имеет следующий вид:

$$p i_d = d_{0,0}(u_\Gamma \cdot \sin \delta - r \cdot i_d) + d_{0,1}(u_f - r_f \cdot i_f) - \sum_{i=1}^m d_{0,i+1} \cdot r_{kdi} \cdot i_{kdi} + d_{0,0} \cdot A,$$

$$p i_f = d_{1,0}(u_\Gamma \cdot \sin \delta - r \cdot i_d) + d_{1,1}(u_f - r_f \cdot i_f) - \sum_{i=1}^m d_{1,i+1} \cdot r_{kdi} \cdot i_{kdi} + d_{1,0} \cdot A,$$

$$p i_{kdL} = d_{L+1,0}(u_\Gamma \cdot \sin \delta - r \cdot i_d) + d_{L+1,1} \cdot u_f -$$

$$- d_{L+1,1} \cdot r_f \cdot i_f - \sum_{i=1}^m d_{L+1,i} \cdot r_{kdi} \cdot i_{kdi} + d_{L+1,0} \cdot A, \quad (2)$$

$$L = 1..m,$$

$$p i_q = q_{0,0}(u_\Gamma \cdot \sin \delta - r \cdot i_q) - \sum_{j=1}^n q_{0,j} \cdot r_{kqj} \cdot i_{kqj} + q_{0,0} \cdot B,$$

$$p i_{kqL1} = q_{L1,0}(u_\Gamma \cdot \sin \delta - r \cdot i_q) - \sum_{j=1}^n q_{L1,j} \cdot r_{kqj} \cdot i_{kqj} + q_{L1,0} \cdot B,$$

$$L1 = 1..n$$

В системе (2) используются:

- коэффициенты  $d_{0,0}, d_{0,1}, q_{0,0}, q_{0,1}$ , которые являются элементами матриц  $d = X_d^{-1}, q = X_q^{-1}$ , где

$$X_d = \begin{vmatrix} X_d & X_{ad} & X_{ad} & \dots & X_{ad} \\ X_{ad} & X_{\sigma f} + X_{ad} & X_{ad} & \dots & X_{ad} \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{\sigma 1d} + X_{ad} & \dots & X_{ad} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{ad} & \dots & X_{\sigma md} + X_{ad} \end{vmatrix},$$

$$X_q = \begin{vmatrix} X_q & X_{aq} & \dots & X_{aq} \\ X_{aq} & X_{\sigma 1q} + X_{aq} & \dots & X_{aq} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{aq} & X_{aq} & \dots & X_{\sigma nq} + X_{aq} \end{vmatrix};$$

$$- A = (1+s) \cdot (i_q \cdot X_q + X_{aq} \sum_{j=1}^n i_{kqj});$$

$$- B = (1+s) \cdot (i_d \cdot X_d + X_{aq} \sum_{i=1}^m i_{kdi}).$$

Использование модели в виде системы уравнений (2) приводит к повышению требований по затратам машинного времени на выполнение расчетов по следующим причинам:

- увеличивается число членов в каждом уравнении системы (2) на величину, зависящую от числа демпферных контуров схемы замещения СМ;

- учет насыщения по путям основного магнитного потока и потоков рассеяния в СМ приводит к необходимости перерасчета индуктивных сопротивлений рассеяния и взаимоиндукций и, как следствия многократного обращения матриц  $X_d, X_q$  даже при использовании различных приемов их стабилизации.

В работе предлагается усовершенствованная модель СМ в виде производных для потокосцеплений, позволяющая моделировать процессы в статорных цепях и обмотке возбуждения на основе полученных выражений для производных токов в обмотках и использовать эти значения для

решения системы уравнений (1).

Модель СМ в форме полных уравнений Парка-Горева имеет вид:

$$K_C = 1 \Rightarrow \begin{cases} p\psi_d = \psi_q(1+s) - r_i d + U \cdot \sin \delta \\ p\psi_q = -\psi_d(1+s) - r_i q + U \cdot \cos \delta \end{cases} \quad (3)$$

$$K_C = 0 \Rightarrow \left. \begin{aligned} U_{CD} = p\psi_q = x_{aq} \sum_{m=1}^M p i_{mq}, \\ U_{CQ} = p\psi_d = x_{ad} (p i_f + \sum_{n=1}^N p i_{nd}), \\ U_C = \sqrt{U_{CD}^2 + U_{CQ}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$K_f = 1 \Rightarrow p\psi_f = -\gamma U_f - (r_r + r_f) i_f. \quad (5)$$

$$K_f = 0 \Rightarrow U_r = x_{ad} \cdot (p i_d + \sum_{n=1}^N p i_{1n}), \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} p\psi_{nd} = -r_{knd} i_{knd}, n = 1 - N, \\ p\psi_{kmq} = -r_{kmq} i_{kmq}, m = 1 - M, \\ ps = \frac{1}{T_j} [M_T + (\psi_d i_d - \psi_q i_q)], \\ p\delta = s, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$dv = \int_0^t |M_{\Sigma}(t)| \cdot dt,$$

где  $\psi_d, \psi_q, \psi_f$  - потокосцепления статорной обмотки по продольной и поперечной осям и обмотки возбуждения;

$\psi_{knd}, \psi_{kmq}$  - потокосцепления демпферных контуров по осям d и q для n-го i m-го демпферных контуров соответственно, N, M - число демпферных контуров по продольной и поперечной осям;

$i_d, i_q, i_f, i_{knd}, i_{kmq}$  - токи в обмотке статора по осям d и q, обмотке возбуждения, демпферных контурах по осям d и q;

$U, U_f$  - напряжения на условных шинах системы и обмотки возбуждения;

$r, r_f, r_{knd}, r_{kmq}$  - активные сопротивления обмоток статора, возбуждения, демпферных контуров по осям d и q,  $r_r$  - сопротивление самосинхронизации;

$\gamma$  - коэффициент, определяемый способом гашения поля;

S - скольжение ротора;

$\delta$  - угол нагрузки;

$T_j$  - постоянная инерции агрегата (турбины и генератора);

$M_T$  - вращающий момент турбины;

$dv$  - коэффициент оценки динамических воздействий переходных процессов на СГ.

Уравнение (5) является обобщенным уравнением для обмотки возбуждения, в котором значения  $r_r + r_f$  и  $\gamma$  зависят от способа гашения поля.

Перенапряжение на ОВГ при протекании тока в ОВГ определяется по  $U_{fm} = i_f (r_f + r_{CC}) + U_r$ .

Значения токов и их производных в уравнениях

определяются по выражениям:

$$i_d = \frac{\psi_d - D_3}{X_\sigma}, i_q = \frac{\psi_q - Q_3}{X_\sigma}, i_f = \frac{\psi_f - D_3}{X_{\sigma f}},$$

$$i_{knd} = \frac{\psi_{knd} - D_3}{X_{\sigma nd}}, i_{kmq} = \frac{\psi_{kmq} - Q_3}{X_{\sigma mq}},$$

$$p i_d = \frac{p\psi_d - pD_3}{X_\sigma}, p i_q = \frac{p\psi_q - pD_3}{X_\sigma},$$

$$p i_f = \frac{p\psi_f - pD_3}{X_{\sigma f}}, p i_{knd} = \frac{p\psi_{knd} - pD_3}{X_{\sigma nd}}, n = \overline{1, N},$$

$$p i_{kmq} = \frac{p\psi_{kmq} - pQ_3}{X_{\sigma mq}}, m = \overline{1, M}.$$

где  $X_\sigma, X_{\sigma f}$  - индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и возбуждения,  $X_{\sigma nd}, X_{\sigma mq}$  - индуктивные сопротивления рассеяния демпферных контуров по осям d и q,  $X_{ad}, X_{aq}$  - ненасыщенные значения сопротивлений взаимной индукции генератора по осям d и q,

$$D_3 = \frac{D_2}{D_1}, Q_3 = \frac{Q_2}{Q_1},$$

$$Q_2 = \frac{\psi_q}{X_\sigma} + \sum_{m=1}^M \frac{\psi_{kmq}}{X_{\sigma mq}}, Q_1 = \frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_\sigma} + \sum_{m=1}^M \frac{1}{X_{\sigma mq}},$$

$$D_2 = \frac{\psi_d}{X_\sigma} + \frac{\psi_f}{X_{\sigma f}} + \sum_{n=1}^N \frac{\psi_{knd}}{X_{\sigma nd}},$$

$$D_1 = \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_\sigma} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{X_{\sigma nd}},$$

$$D_{3f} = \frac{D_{2f}}{D_{1f}}, D_{2f} = \frac{\psi_d}{X_\sigma} + \sum_{n=1}^N \frac{\psi_{knd}}{X_{\sigma nd}},$$

$$D_{1f} = \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_\sigma} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{X_{\sigma nd}}.$$

Влияние электрической дуги моделируется приближенно.

Вектор, определяющий состояние признаков для адаптации модели СГ, включая и признаки состояния обмотки статора  $K_c$  (1-замкнута, 0 - разомкнута), обмотки возбуждения  $K_f$  (1- замкнута, 0 - разомкнута) формируется на основе анализа состояния соответствующих коммутирующих аппаратов при формировании графа сети по электрической схеме системы текущего этапа.

Для учета влияния насыщения на индуктивное сопротивление рассеяния статора используется выражение  $X_{\sigma n} = X_\sigma [(1 - K_{II}) + K_{II} (b_{II}^* + b_{z}^* e^{-\alpha \cdot I^2})]$ , где  $I$  - амплитудное значение тока статора;  $b_{II}^*$  - относительная ширина паза;  $b_{z}^*$  - относительная ширина зубца;  $K_{II}$  - коэффициент, учитывающий долю пазового рассеяния в общей величине рассеяния статора, который для крупных машин составляет 0,6-0,8;  $\alpha = 0,05 - 0,06$  [13].

При учете насыщения влияния насыщения по

пути основного магнитного потока на значение индуктивных сопротивлений взаимных индукций по осям симметрии ротора учитываются такие факторы, как нелинейность кривой намагничивания СМ, разный уровень насыщения по продольной и поперечной осям ротора.

В программном обеспечении реализованы:

1) модель сверхпроводникового ограничителя токов короткого замыкания

$$L_{COT}(t) = L_{PP} + (L_{СП} - L_{PP})e^{-t/T_L},$$

где  $L_{СП}$  – индуктивность СOT в сверхпроводящем состоянии;  $L_{PP}$  – индуктивность СOT в проводящем состоянии;  $T_L$  – постоянная времени реагирования СOT;

2) модель сверхпроводникового накопителя энергии (СПИН), которая предложена в ряде работ и реализуется в виде виртуальной СМ

$$(1 + pT_{E_{СПИН}})E_{СПИН} = K_{U1} \cdot \Delta U + K_1 \cdot S + K_2 \cdot ps,$$

$$(1 + pT_{E_{СПИН}})\delta_{СПИН} = K_{U2} \cdot \Delta U + K_3 \cdot S + K_4 \cdot ps,$$

при ограничениях

$$E_{СПИН\ MIN} \leq E_{СПИН} \leq E_{СПИН\ MAX}$$

$$\delta_{MIN} \leq \delta_{СПИН} \leq \delta_{MAX}$$

В модели реализуется регулирование углом  $\delta_{СПИН}$  и ЭДС  $E_{СПИН}$  по скольжению и производной, устройство используется для стабилизации параметров переходных режимов.

Нарушение устойчивости межсистемных линий связи и возникновение асинхронного режима в ЭЭС является одной из опаснейших аварийных ситуаций. Существующие подходы получения критериев определения эталонов классов аномальных режимов ЭЭС, использующие функции Ляпунова, принцип Понтрягина и др., основаны на использовании простейшей модели СМ без учета физических процессов в роторе в большинстве работ или при учете демпферного коэффициента. Так, в предложенной в [14] экспертной системе для оценки допустимости асинхронного режима по линии связи демпферный коэффициент не учитывается.

Среди основных принципов формирования противоаварийной автоматики можно выделить следующие:

- принимаемые допущения и ограничения при создании модели ситуации ограничивают возможности устройства за счет повышения надежности функционирования;

- адаптация под схемно-режимную ситуацию, постоянный пересчет управляющих воздействий;

- возможность распознавания (моделирования) широкого спектра схемно-режимных ситуаций.

Защитные функции устройства в первую очередь ограничены набором схемно-режимных ситуаций, используемым устройством.

Существующие устройства АЛАР реализуют различные подходы распознавания таких классов режимов, как короткие замыкания, режим качаний и непосредственно асинхронный режим.

Самым актуальным критерием формирования адекватной модели для АЛАР в настоящее время является условие надежного получения достоверного

режима. Наибольшие проблемы возникают при решении задачи своевременного распознавания начала возникновения асинхронного режима по линиям связи. В микропроцессорных устройствах выявление возникновения АР в момент его возникновения, т.е. при углах близких к критическим выполняется по фазовым траекториям в координатах «угол-скольжение». Для распознавания класса режима синхронных качаний и асинхронного режима вводится линейная зависимость скольжения от угла как характеристика срабатывания. Если текущее значение угла превышает значение, определяемое по характеристике срабатывания для текущего значения скольжения, то текущий режим относится к классу асинхронных. Эффективность распознавания зависит от подбора коэффициентов зависимости  $s=f(\delta)$ .

В [15] предложена модель СМ, в которой реализуется выражения для расчета асинхронной мощности, полученной на основе многоконтурных схем замещения. Практическое использование модели затруднено так как, необходимо знать параметры схемы замещения конкретной машины, определить параметры эквивалентной машины.

В настоящей работе на основе схем замещения с типовыми параметрами получены выражения для расчета проводимостей со стороны обмотки статора, которые используются в выражениях для расчета асинхронной мощности:

$$y_d(js) = \frac{RZ(s) + jIZ(s)}{RZ^2(s) + IZ^2(s)}, \text{ где}$$

$$RZ(s) = \frac{RY(s)}{RY^2(s) + IY^2(s)} + X\sigma; IZ(s) = \frac{RY(s)}{RY^2(s) + IY^2(s)};$$

$$RY(s) = \frac{RA(s)}{z(s)} + \frac{1}{X_{ad}}; IY(s) = \frac{IA(s)}{z(s)}$$

$$IA(s) = s \cdot q1 + s^3 \cdot q2 + s^5 \cdot q3 + s^7 \cdot q4,$$

$$RA(s) = s^2 \cdot q11 + s^4 \cdot q22 + s^6 \cdot q33 + s^8 \cdot q44,$$

$$Z(s) = a0 + a1 \cdot s^2 + a2 \cdot s^4 + a3 \cdot s^6 + a4 \cdot s^8,$$

Ниже приведены выражения для коэффициентов при расчете составляющей по оси d:

$$q1 = 1,32 \cdot 10^{-9} \cdot r_f^2 + 4,52 \cdot 10^{-12} \cdot r_f;$$

$$q2 = 5,49 \cdot 10^{-5} \cdot r_f^2 + 1,32 \cdot 10^{-9} \cdot X_{\sigma f}^2 + 4,26 \cdot 10^{-7} \cdot r_f;$$

$$q3 = 0,016 \cdot r_f^2 + 5,49 \cdot 10^{-5} \cdot X_{\sigma f}^2 + 5,52 \cdot 10^{-4} \cdot r_f;$$

$$q4 = 0,016 \cdot X_{\sigma f}^2 + 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot r_f;$$

$$q11 = 2,42 \cdot 10^{-7} \cdot r_f^2 + 1,52 \cdot 10^{-12} \cdot X_{\sigma f};$$

$$q22 = 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot r_f^2 + 2,42 \cdot 10^{-7} \cdot X_{\sigma f}^2 + 4,26 \cdot 10^{-7} \cdot X_{\sigma f};$$

$$q33 = 0,06 \cdot r_f^2 + 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot X_{\sigma f}^2 + 5,52 \cdot 10^{-4} \cdot X_{\sigma f};$$

$$q44 = 0,06 \cdot X_{\sigma f}^2 + 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot X_{\sigma f};$$

$$a0 = 4,52 \cdot 10^{-12} \cdot r_f^2;$$

$$a1 = 4,26 \cdot 10^{-7} \cdot r_f^2 + 4,52 \cdot 10^{-12} \cdot X_{\sigma f}^2;$$

$$a2 = 5,52 \cdot 10^{-4} \cdot r_f^2 + 4,26 \cdot 10^{-7} \cdot X_{\sigma f}^2;$$

$$a_3 = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot r_f^2 + 5,52 \cdot 10^{-4} \cdot X_{\sigma f}^2$$

$$a_4 = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot X_{\sigma f}^2.$$

В выражение для оси  $q$  используются следующие коэффициенты:  $a_0 = 6,38 \cdot 10^{-13}$ ;  $a_2 = 1,43 \cdot 10^{-3}$ ;

$$a_3 = 0,082; a_4 = 0,049; q_1 = 1,8 \cdot 10^{-10}; q_2 = 3,4 \cdot 10^{-5};$$

$$q_3 = 0,034; q_4 = 0,45; q_{11} = 9,34 \cdot 10^{-8};$$

$$q_{22} = 1,99 \cdot 10^{-3}; q_{33} = 0,3; q_{44} = 0,52.$$

Полученные соотношения позволяют выполнять расчет асинхронной мощности при использовании справочных данных СМ (индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям, индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и возбуждения, активное сопротивление обмотки возбуждения).

### ВЫВОДЫ

Математическая модель ЭЭС, реализующая структурно-функциональный подход дополнена моделями современных устройств ограничения тока короткого замыкания и демпфирования колебаний, а модель СМ в форме уравнений Парка –Горева дополнена уравнениями для расчета производных токов в обмотках СМ; напряжений, наводимых на зажимах разомкнутых обмоток статора или возбуждения, оценки динамических воздействия переходных процессов на генератор.

Возможность определения производных токов в обмотках СМ на каждой итерации позволила упростить процедуру определения напряжений в узлах ЭЭС.

Рекомендуется использовать в методах распознавания классов переходных режимов для устройств противоаварийной автоматики выражение для асинхронной мощности СМ, позволяющее учесть эффект вытеснения токов в роторе при использовании только справочных значений индуктивностей обмотки статора и возбуждения СМ.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Ефимов Д.Н., Попов Д.Б. Открытая система моделирования переходных процессов в ЭЭС // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции: Энергосистема: управление, качество, безопасность. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. - С. 131-135

[2]. Сивокобыленко В.Ф., Меженкова М.А. Математическое моделирование электромеханических процессов на электрических станциях // Электричество. –2001. - №4. – С.5-9.

[3]. Скрипник О.І. Дакар – обчислювальний комплекс аналізу режимів і процесів електроенергетичних систем // Технічна електродинаміка. - Спеціальний випуск. – 1998. – С. 56-61.

[4]. Авраменко В.Н., Олянишин В.А., Стогний В.С., Янкина А.А. Комплекс программ для анализа

динамической устойчивости и переходных режимов энергосистем // Энергетика и электрификация. – 1984. - №4. – С. 46-48.

[5]. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Кукуй К.А. Математическое моделирование режимов группового выбега и самозапуска в системах электроснабжения с асинхронными и синхронными двигателями//Збірник наукових праць ДонНТУ, серія „Електротехніка та енергетика”. – 2003. вип.. 67. – С. 5-13.

[6]. Заболотный И.П., Гришанов С.А. Математическая модель для расчета динамических режимов электрической системы // Вісник Східноукраїнського Національного університету. - Луганськ: СНУ. - 2001. - №3 (37)–С. 79-85.

[7]. Заболотный И.П., Гришанов С.А. Математическая модель узла генерации электроэнергетической системы // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. - Донецьк: ДонНТУ. - 2004. - випуск 79. – С. 90-95.

[8]. Заболотный И.П., Гришанов С.А. Система поддержки решений персонала тепловых электрических станций //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Випуск 12(118). – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – С. 108-113.

[9]. Гусев А. С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия Вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – №7-8/1.

[10]. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 440 с.

[11]. Кавалеров Б.В. Выбор способа моделирования взаимодействия структурных элементов системы электроснабжения // Наука, техника, инновации: Материалы докладов региональной научной конференции 05 – 08 декабря 2002 г., ч.2 – Новосибирск, 2002. – С. 137–138.

[12].Бесараб А.Н., Невольниченко В.Н. Алгоритм расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в системе электроснабжения //Електромашинобуд. та електрообладн. - 2001. - Вип. 56.- С. 87-91

[13]. Бобров А.Э. Разработка методов учета насыщения стали генераторов и исследование его влияния на переходные процессы в электрической системе: Автореф.дис... канд.техн.наук / ЛПИ. - Л., 1979. - 15 с.

[14]. Гусейнов А.М. Метод оперативной оценки допустимости асинхронных режимов по межсистемной связи // Электричество.-1990. - N8. - С. 2-12.

[15]. Заболотный И.П., Гришанов С.А. Асинхронная мощность синхронного генератора//Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”. Випуск 112. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С. 21-24.