

2. Основы теории электрических аппаратов/Под ред. И.С.Таева. – М.: Высшая школа, 1987.

3. Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Борисов В.В. и др. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов/Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.

4. Патент РФ № 2178927. Контактная система вакуумной дугогасительной камеры/Г.С. Белкин, И.А. Лукацкая, Ю.Г. Ромочкин. – БИ, 2002, № 3.

5. Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Ромочкин Ю.Г. Влияние формы поверхности контактов на характеристики вакуумных дугогасительных камер. – Электротехника, 2007, №4.

[17.10.11]

* * *

Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах¹

ГУСЕЙНОВ Ак.М., ИБРАГИМОВ Ф.Ш.

Приводится методика расчета и анализа несимметричных установившихся режимов и режимов короткого замыкания, а также переходных процессов в сложных многомашинных регулируемых электроэнергетических системах в фазных координатах.

Ключевые слова: энергосистема, переходные процессы, режимы, фазные координаты

II этап: Моделирование в фазных координатах переходных процессов в сложной регулируемой ЭЭС. Уравнения основных элементов ЭЭС. Синхронные машины. Уравнения синхронных машин моделируются по полным уравнениям Горева–Парка и упрощенным уравнениям Лебедева–Жданова с учетом электромагнитных переходных процессов в контурах ротора [1–3, 8–12].

При составлении уравнений синхронной машины для расчета несимметричных переходных режимов приняты следующие допущения:

фазные обмотки синхронной машины симметричны, так как они имеют одинаковое число витков, активные сопротивления и взаимный сдвиг магнитных осей;

при рассмотрении магнитных полей самоиндукции обмоток статора и взаимоиндукции этих обмоток с обмотками ротора принимается во внимание только одна гармоническая составляющая этого распределения;

на роторе кроме обмотки возбуждения расположен ещё демпферный контур по продольной и поперечной осям;

Авторы: Белкин Герман Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1962 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электрические аппараты» во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ). Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Ромочкин Юрий Геннадьевич окончил энергомашиностроительный факультет МВТУ им. Баумана в 1979 г. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по вакуумной технике. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.

A procedure for calculating and analyzing unbalanced steady-state operating conditions and short-circuit modes, as well as transients in complex controlled multimachine electric power systems in phase coordinates is presented.

Key words: power system, transients, operating modes, calculation, phase coordinates

магнитная проницаемость стали магнитопровода машины принята постоянной; учет насыщения проводится выбором постоянных по значению насыщенных параметров.

Исходными уравнениями для расчета режимов синхронной машины в координатах a, b, c являются следующие дифференциальные уравнения напряжений обмотки статора:

$$\begin{aligned} pY_a &= e_a - i_a r_a \ddot{\psi}_a \\ pY_b &= e_b - i_b r_b \ddot{\psi}_b \\ pY_c &= e_c - i_c r_c \ddot{\psi}_c \end{aligned} \quad (10)$$

где Y_a, Y_b, Y_c – потокосцепления фаз обмотки статора; i_a, i_b, i_c – токи фаз обмотки статора; r_a, r_b, r_c – активные сопротивления фаз обмотки статора; e_a, e_b, e_c – напряжения на зажимах фазных обмоток статора генератора; $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования по синхронному времени $t = 2\pi ft$.

К этой системе уравнений следует добавить уравнения напряжений для роторных контуров и уравнения движения ротора:

¹ Окончание. Начало см. № 5, 2012 г.

$$\begin{aligned}
 pY_f &= e_f - i_f r_f; \\
 pY_{kd} &= -i_{kd} r_{kd}; \\
 pY_{kq} &= -i_{kq} r_{kq}; \\
 pS &= \frac{1}{H}(M_m + M_e); \\
 pq &= S,
 \end{aligned}
 \quad \begin{matrix} \ddot{y} \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \end{matrix}
 \quad (11)$$

где $Y_f, Y_{kd}, Y_{kq}, i_f, i_{kd}, i_{kq}, r_f, r_{kd}, r_{kq}$ – потокосцепления, токи и активные сопротивления обмотки возбуждения и демпферных контуров по продольной и поперечной осям; e_f – напряжение, приложенное к обмотке возбуждения; S – скольжение; H – инерционная постоянная; M_m – вращающий момент нагрузки на валу синхронной машины; M_e – электромагнитный вращающий момент синхронной машины; q – рабочий угол (угол между поперечной осью ротора и изображающим вектором фазных напряжений).

Для решения систем уравнений (10) и (11) на ПЭВМ любым из известных численных методов Рунге–Кутта, Адамса Эйлера и др. [13] необходимо, чтобы число переменных равнялось числу уравнений. Опыт показывает, что целесообразно выразить все токи через потокосцепления контуров. Для этой цели используются известные соотношения, полученные при расчетах симметричных режимов по уравнениям Горева–Парка [9, 10]:

$$\begin{aligned}
 i_d &= aY_d - bY_f - cY_{kd}; \\
 i_q &= gY_q - hY_{kq}; \\
 i_f &= -bY_d + dY_f - eY_{kd}; \\
 i_{kd} &= -cY_d - eY_f + fY_{kd}; \\
 i_{kq} &= -hY_q + kY_{kq}; \\
 i_0 &= Y_0 / x_0,
 \end{aligned}
 \quad \begin{matrix} \ddot{y} \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \end{matrix}
 \quad (12)$$

где коэффициенты $a, b, c, d, e, f, g, h, k$ выражаются через параметры машины следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{X_f X_{kd} - x_{ad}^2}{D}; \quad b = \frac{x_{ad} X_{kd} - x_{ad}^2}{D}; \quad c = \frac{x_{ad} X_f - x_{ad}^2}{D}; \\
 d &= \frac{X_d x_{kd} - x_{ad}^2}{D}; \quad e = \frac{X_d x_{ad} - x_{ad}^2}{D}; \quad f = \frac{X_d X_f - x_{ad}^2}{D}; \\
 g &= \frac{X_{kq}}{X_q X_{kq} - x_{aq}^2}; \quad h = \frac{x_{aq}}{X_q X_{kq} - x_{aq}^2}; \quad k = \frac{X_q}{X_q X_{kq} - x_{aq}^2},
 \end{aligned}
 \quad (13)$$

где $D = X_d(X_f X_{kd} - x_{ad}^2) - x_{ad}(x_{ad} X_{kd} - x_{ad}^2) - x_{ad}(x_{ad} X_f - x_{ad}^2)$.

Параметры, входящие в эти выражения, представляют собой взаимные или полные реактивные сопротивления контуров:

$$\begin{aligned}
 X_f &= x_{ad} + x_f; \quad X_{kd} = x_{ad} + x_{kd}; \quad X_{kq} = x_{aq} + x_{kq}; \\
 X_d &= x_{ad} + x_e; \quad X_q = x_{aq} + x_l.
 \end{aligned}$$

Для перехода от статорных токов i_d, i_q, i_0 к фазным величинам i_a, i_b, i_c используем известные соотношения [3, 8]:

$$\begin{aligned}
 i_a &= i_0 + i_d \cos g - i_q \sin g; \\
 i_b &= i_0 + i_d \cos(g - r) - i_q \sin(g - r); \\
 i_c &= i_0 + i_d \cos(g + r) - i_q \sin(g + r);
 \end{aligned}
 \quad \begin{matrix} \ddot{y} \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \end{matrix}
 \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 Y_0 &= \frac{1}{3}(Y_a + Y_b + Y_c); \\
 Y_d &= \frac{2}{3}[(Y_a \cos g + Y_b \cos(g - r) + Y_c \cos(g + r))]; \\
 Y_q &= \frac{2}{3}(Y_a \sin g + Y_b \sin(g - r) + Y_c \sin(g + r));
 \end{aligned}
 \quad \begin{matrix} \ddot{y} \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{y} \\ y \end{matrix}
 \quad (15)$$

где $r = 2\pi/3 = 120^\circ$ для машины с симметрично расположенными тремя фазными обмотками; $g = t + q + \pi/2$ – угол между неподвижной осью фазы a и вращающейся продольной осью ротора.

Тогда выражения для токов i_a, i_b, i_c через потокосцепления фаз статора и роторных контуров будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 i_a &= Y_a \frac{\acute{e}2}{3} a \cos^2 g + \frac{2}{3} g \sin^2 g \dot{g} + \\
 &+ Y_b \frac{\acute{e}2}{3} a \cos g \cos(g - r) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g - r) \dot{g} + \\
 &+ Y_c \frac{\acute{e}2}{3} a \cos g \cos(g + r) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g + r) \dot{g} - Y_f b \cos g - \\
 &- Y_{kd} c \cos g + Y_{kq} h \sin g + \frac{1}{3x_0}(Y_a + Y_b + Y_c); \\
 i_b &= Y_a \frac{\acute{e}2}{3} a \cos g \cos(g - r) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g - r) \dot{g} + \\
 &+ Y_b \frac{\acute{e}2}{3} a \cos^2(g - r) + \frac{2}{3} g \sin^2(g - r) \dot{g} + \\
 &+ Y_c \frac{\acute{e}2}{3} a \cos(g - r) \cos(g + r) + \frac{2}{3} g \sin(g - r) \sin(g + r) \dot{g} - \\
 &- Y_f b \cos(g - r) - Y_{kd} c \cos(g - r) + Y_{kq} h \sin(g - r) + \\
 &+ \frac{1}{3x_0}(Y_a + Y_b + Y_c); \\
 i_c &= Y_a \frac{\acute{e}2}{3} a \cos g \cos(g + r) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g + r) \dot{g} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ Y_{b\frac{e}{e}} \frac{e2}{3} a \cos(g- r) \cos(g+ r) + \frac{2}{3} g \sin(g- r) \sin(g+ r) \dot{g} + \\
 &+ Y_{c\frac{e}{e}} \frac{e2}{3} a \cos^2(g+ r) + \frac{2}{3} g \sin^2(g+ r) \dot{g} \\
 &- Y_f b \cos(g+ r) - Y_{kq} c \cos(g+ r) + Y_{kq} h \sin(g+ r) + \\
 &+ \frac{1}{3x_0} (Y_a + Y_b + Y_c); \\
 i_f = &-\frac{2}{3} Y_a b \cos g - \frac{2}{3} Y_b b \cos(g- r) - \frac{2}{3} Y_c c \cos(g+ r) + \\
 &+ dY_f - eY_{kd}; \\
 i_{kd} = &-\frac{2}{3} Y_a c \cos g - \frac{2}{3} Y_b c \cos(g- r) - \frac{2}{3} Y_c c \cos(g+ r) + \\
 &+ eY_f - fY_{kd}; \\
 i_{kq} = &-\frac{2}{3} Y_a h \sin g - \frac{2}{3} Y_b h \sin(g- r) - \frac{2}{3} Y_c h \sin(g+ r) + \\
 &+ kY_{kq}.
 \end{aligned}$$

После преобразования получаем выражения для токов через потокосцепления и тригонометрические функции угла g :

$$\begin{aligned}
 i_a = &\frac{1}{3x_0} (Y_a + Y_b + Y_c) + Y_{a\frac{e}{e}} \frac{e2}{3} a - \frac{2}{3} (a- g) \sin^2 g \dot{g} + \\
 &+ Y_{b\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{3} (a- g) \sin^2 g + \frac{\sqrt{3}}{3} (a- g) \cos g \sin g \dot{g} + \\
 &+ Y_{c\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{3} (a- g) \sin^2 g - \frac{\sqrt{3}}{3} (a- g) \cos g \sin g \dot{g} - \\
 &- Y_f b \cos g - Y_{kd} c \cos g + Y_{kq} h \sin g; \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_b = &\frac{1}{3x_0} (Y_a + Y_b + Y_c) + Y_{a\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{3} (a- g) \sin^2 g + \\
 &+ \frac{\sqrt{3}}{3} (a- g) \cos g \sin g \dot{g} + Y_{b\frac{e}{e}} \frac{e2}{3} a - \frac{1}{2} (a- g) \sin^2 g - \\
 &- \frac{\sqrt{3}}{3} (a- g) \cos g \sin g \dot{g} + Y_{c\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{2} (a- g) - \\
 &- \frac{2}{3} (a- g) \sin^2 g \dot{g} - Y_f \frac{\sqrt{3}}{e2} \sin g - \frac{1}{2} \cos g \ddot{g} - \\
 &- Y_{kd} \frac{\sqrt{3}}{e2} \sin g - \frac{1}{2} \cos g \ddot{g} - Y_{kq} \frac{\sqrt{3}}{e2} \sin g - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos g \ddot{g} \\
 &\quad (16a)
 \end{aligned}$$

$$i_c = \frac{1}{3x_0} (Y_a + Y_b + Y_c) + Y_{a\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{3} (a- g) \sin^2 g -$$

$$\begin{aligned}
 &- \frac{\sqrt{3}}{3} (a- g) \cos g \sin g \dot{g} + Y_{b\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{2} (a- g) - \\
 &- \frac{2}{3} (a- g) \sin^2 g \dot{g} + Y_{c\frac{e}{e}} \frac{e2}{3} a - \frac{1}{2} (a- g) + \frac{1}{3} (a- g) \sin^2 g + \\
 &+ \frac{\sqrt{3}}{3} (a- g) \cos g \sin g \dot{g} + Y_f \frac{\sqrt{3}}{e2} \cos g + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin g \ddot{g} + \\
 &+ Y_{kd} \frac{\sqrt{3}}{e2} \cos g + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin g \ddot{g} - Y_{kq} \frac{\sqrt{3}}{e2} \sin g - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos g \ddot{g} \\
 &\quad (16b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_f = &-\frac{2}{3} Y_a b \cos g + Y_b \frac{\sqrt{3}}{e3} \cos g - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin g \ddot{g} + \\
 &+ Y_c \frac{\sqrt{3}}{e3} \cos g + \frac{\sqrt{3}}{3} \sin g \ddot{g} + dY_f - eY_{kd}; \quad (16b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{kd} = &-\frac{2}{3} Y_a c \cos g - Y_b \frac{\sqrt{3}}{e3} \cos g - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin g \ddot{g} + \\
 &+ Y_c \frac{\sqrt{3}}{e3} \cos g + \frac{\sqrt{3}}{3} \sin g \ddot{g} - eY_f + fY_{kd}; \quad (16r)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{kq} = &-\frac{2}{3} Y_a h \sin g - Y_b \frac{\sqrt{3}}{e3} \sin g + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos g \ddot{g} + \\
 &+ Y_c \frac{\sqrt{3}}{e3} \sin g - \frac{\sqrt{3}}{3} \cos g \ddot{g} + kY_{kq}. \quad (16d)
 \end{aligned}$$

Значение электромагнитного вращающего момента в осях a, b, c можно получить по известной формуле

$$M_e = Y_q i_d - Y_d i_q,$$

подставив значения токов и потокосцеплений i_d, i_q, Y_d, Y_q , выраженных через $i_a, i_b, i_c, Y_a, Y_b, Y_c$, в следующем виде:

$$M_e = \frac{2\sqrt{3}}{9} [Y_a (i_c - i_b) + Y_b (i_a - i_c) + Y_c (i_b - i_a)]. \quad (17)$$

Подставив выражения токов i_a, i_b, i_c через потокосцепления Y_a, Y_b, Y_c , получим окончательное выражение электромагнитного вращающего момента, используемое при расчете переходных режимов на ПЭВМ:

$$\begin{aligned}
 M_e = &\frac{2\sqrt{3}}{9} (Y_b - Y_c) \frac{1}{3x_0} (Y_a + Y_b + Y_c) + \\
 &+ Y_{a\frac{e}{e}} \frac{e2}{3} a - \frac{2}{3} (a- g) \sin^2 g \dot{g} + Y_{b\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{3} (a- g) \sin^2 g + \\
 &+ \frac{\sqrt{3}}{3} (a- g) \cos g \sin g \dot{g} + Y_{c\frac{e}{e}} \frac{e}{3} a + \frac{1}{3} (a- g) \sin^2 g -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\sqrt{3}}{3}(a-g)\cos g \sin g \dot{g} - Y_f b \cos g - Y_{kd} c \cos g + \\
& + Y_{kq} h \sin g \} + \frac{2\sqrt{3}}{9}(Y_c - Y_a) \frac{1}{3x_0}(Y_a + Y_b + Y_c) + \\
& + Y_{\frac{e}{e}} \dot{e} - \frac{1}{3}a + \frac{1}{3}(a-g)\sin^2 g + \frac{\sqrt{3}}{3}(a-g)\cos g \sin g \dot{g} + \\
& + Y_{\frac{e}{e}} \dot{e}^2 - \frac{1}{3}a - \frac{1}{2}(a-g) + \frac{1}{3}(a-g)\sin^2 g - \frac{\sqrt{3}}{3}(a-g)\cos g \sin g \dot{g} + \\
& + Y_{\frac{e}{e}} \dot{e} - \frac{1}{3}a + \frac{1}{2}(a-g) - \frac{2}{3}(a-g)\sin^2 g \dot{g} (Y_f b + Y_{kd} c) \cdot \\
& \frac{\sqrt{3}}{2}\sin g - \frac{1}{2}\cos g \ddot{g} - Y_{kq} \frac{\sqrt{3}}{2}\sin g + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos g \dot{g} + \\
& + \frac{2\sqrt{3}}{9}(Y_c - Y_a) \frac{1}{3x_0}(Y_a + Y_b + Y_c) + \\
& + Y_{\frac{e}{e}} \dot{e} - \frac{1}{3}a + \frac{1}{3}(a-g)\sin^2 g - \frac{\sqrt{3}}{3}(a-g)\cos g \sin g \dot{g} + \\
& + Y_{\frac{e}{e}} \dot{e} - \frac{1}{3}a + \frac{1}{2}(a-g) - \frac{2}{3}(a-g)\sin^2 g \dot{g} + Y_{\frac{e}{e}} \dot{e}^2 - \frac{1}{3}a - \frac{1}{2}(a-g) + \\
& + \frac{1}{3}(a-g)\sin^2 g + \frac{\sqrt{3}}{3}(a-g)\cos g \sin g \dot{g} + (Y_f b + Y_{kd} c) \cdot \\
& \frac{\sqrt{3}}{2}\cos g + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin g \ddot{g} - Y_{kq} \frac{\sqrt{3}}{2}\sin g - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos g \dot{g}.
\end{aligned}$$

Начальные условия. Режимом, предшествующим несимметричному переходному процессу, является квазиустановившийся режим ЭЭС, который определяется на I этапе расчета. Поэтому начальные условия для расчета исходного режима могут быть получены по известным соотношениям синхронного режима. Этот режим характеризуется следующими параметрами: вращающий момент на валу машины M_{T0} ; напряжение e_0 ; ток возбуждения (или напряжение возбуждения) i_{f0} ; начальный рабочий угол q_0 ; ток статора i_0 и $\cos j$.

Значения токов статора по продольной и поперечной осям:

$$i_{d0} = -i \sin d; \quad i_{q0} = -i \cos d,$$

где $d = q_0 + j$.

Потокоцепления всех контуров машины:

$$Y_{d0} = i_{d0} X_d + i_{f0} x_{ad}; \quad Y_{q0} = i_{q0} X_q;$$

$$Y_f = i_{d0} x_{ad} + i_{f0} X_d; \quad Y_{kd} = i_{d0} x_{ad} + i_{f0} x_{ad};$$

$$Y_{kq} = i_{q0} x_{aq}.$$

Ток и потокоцепление нулевой составляющей i_0 и Y_0 равны нулю в симметричном режиме. Токи демпферных контуров в установившемся режиме равны нулю. По известным уравнениям перехода от осей d, q о к осям a, b, c определяем начальные условия для заданного момента времени t_0 : Y_{d0} , Y_{b0} , Y_{c0} , Y_{f0} , Y_{kd0} , Y_{kq0} .

Для расчета переходных несимметричных режимов синхронной машины на ПЭВМ составлена программа. Решение уравнений проводится методом Рунге—Кутты 4-го порядка.

Учет системы возбуждения и АРВ. В статье использованы общепринятые уравнения системы возбуждения (СВ) и уравнения АРВ, которые образуют единый блок и основаны на следующих допущениях:

нелинейность передаточных функций не учитывается; эти функции заменяются на линейные с ограничениями;

уравнения СВ и блока сильной стабилизации (БСС) записываются упрощенно.

При принятых допущениях можно моделировать все существующие СВ и АРВ. Представляется возможность моделирования следующих видов СВ синхронных генераторов и компенсаторов:

бесщёточная СВ с вращающимися диодами; АРВ СД с различными каналами регулирования; электромашинное возбуждение с возбудителем постоянного тока, компаундирование и корректор напряжения, релейная форсировка напряжения;

высокочастотная СВ без БСС; АРВ корректора напряжения и с учетом БСС;

тиристорная система возбуждения и АРВ СД.

Учет различных характеристик нагрузки. Как известно, нагрузка электрической системы представляет собой совокупность многочисленных потребителей электроэнергии, обладающих различными статическими и динамическими характеристиками и питающихся от узловых точек энергосистемы. Эти узлы комплексных нагрузок обычно обладают большой мощностью, и процессы в них оказывают существенное влияние на систему.

Практика исследований устойчивости энергосистем показывает, что при различных параметрах нагрузок в сложных системах пределы динамической устойчивости генераторов могут быть существенно различными [14]. Результаты исследований подтверждают мнение о значительно большем влиянии различных допущений при моделировании нагрузки на результаты расчетов динамической устойчивости генераторов. Как показали многочисленные исследования [14] при квазиустановившихся симметричных и несимметричных УР лучше

всего моделировать нагрузки постоянной проводимостью, когда в узлах значения напряжения изменяются в пределах 10–15% и нет точных статических характеристик нагрузок. Сюда следует отнести такие нагрузки, как осветительная, электропечная, реактивная, а также тяговые подстанции железных дорог, электрофицируемых на переменном токе и т.д.

В данном случае характеристики нагрузок учитываются пофазно по общепринятым типовым

способам моделирования при расчетах динамической устойчивости: постоянной мощностью ($S_H = \text{const}$); постоянными сопротивлениями ($Z_H = \text{const}$); статическими и динамическими характеристиками. Комплексная нагрузка при расчетах динамической устойчивости должна моделироваться совокупностью трех эквивалентных элементов: синхронного и асинхронного двигателей и статической нагрузкой [1, 2].

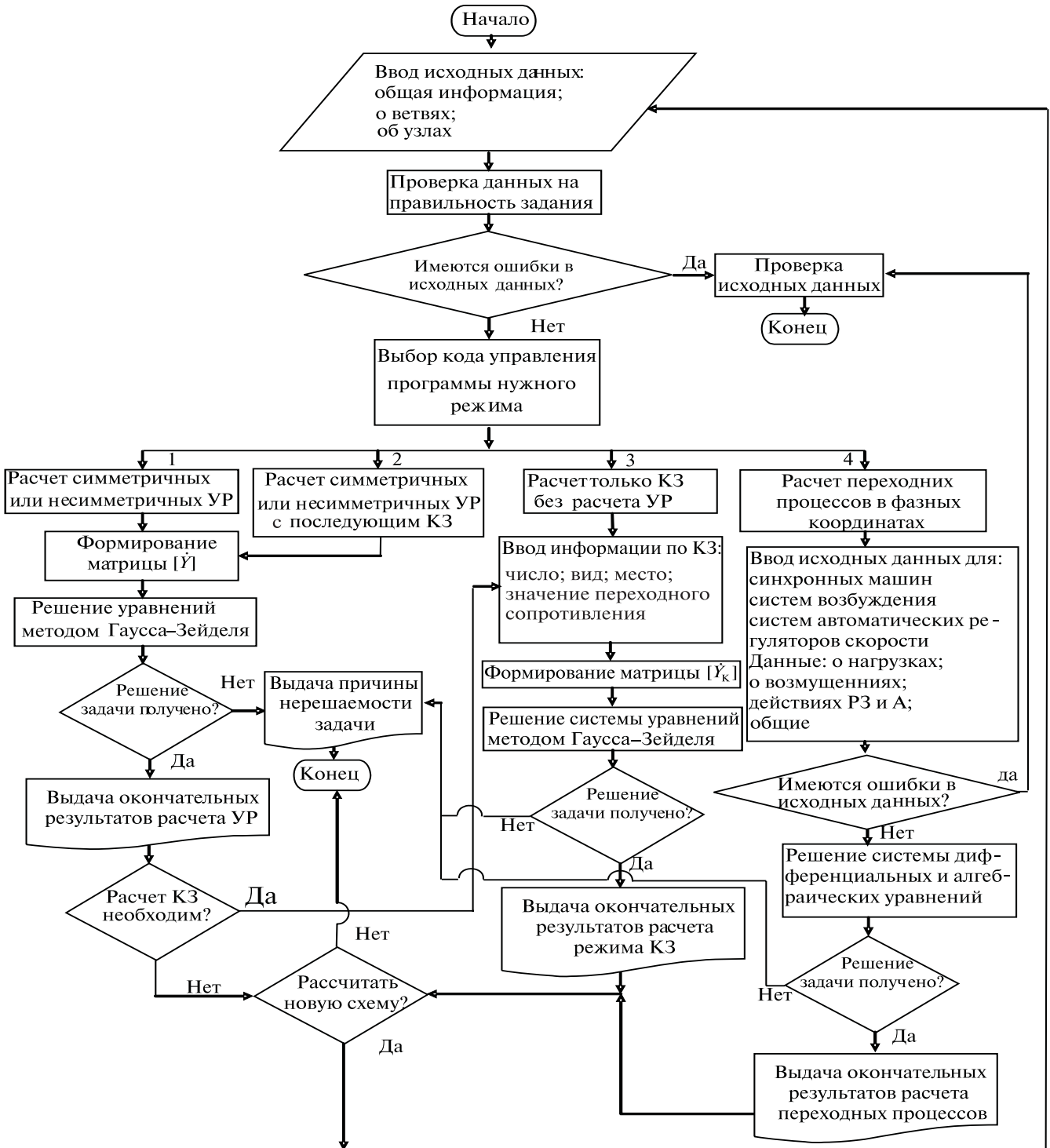


Рис. 5. Структурная схема алгоритма расчета несимметричных УР, режимов КЗ и переходных процессов в фазных координатах

Учет действия систем регулирования турбин.

Модели регулятора скорости приняты как в [1, 2]:

простейшая модель регулятора скорости включает в себя одно дифференциальное уравнение, которое описывает поведение самого регулятора скорости, где задаются следующие параметры: значение статизма, постоянные времени на открытие и закрытие направляющего аппарата;

модель регулятора скорости с учетом влияния паровых объемов, где дополнительными параметрами задаются: доля паровых объемов, постоянная времени паровых объемов.

Используется модель для описания процесса регулирования гидротурбин.

Программная реализация и проведение численных расчетов. Структурная схема алгоритма программы расчета несимметричных УР режимов КЗ и переходных процессов в фазных координатах показана на рис. 5.

В результате расчета симметричных либо несимметричных УР для каждой фазы определяются: модули и углы напряжений в узлах, потоки активной и реактивной мощности по линиям и трансформаторам, потери в каждом элементе и по системе в целом, генерация реактивной мощности в тех узлах, где заданы модули напряжения, и другая информация, если она необходима.

При расчетах режимов КЗ выходная информация также выдается на экран дисплея в табличной форме и включает: токи в точке КЗ, остаточные напряжения в узлах схемы и их фазы, токи либо потоки мощности по ветвям, включая потери в каждом элементе и в системе в целом. Допускается

выполнение расчетов при КЗ в промежуточной точке ветви без введения в расчетную схему дополнительных узлов.

Для иллюстрации работоспособности разработанной методики и программы расчета симметричных и сложносимметричных режимов в сложных многомашинных ЭЭС рассмотрим несколько примеров для конкретной схемы, представленной на рис. 6.

Все необходимые данные (в отн. ед.) для исследуемой системы – ЛЭП, генераторов, трансформаторов – представлены в табл. 2–4 соответственно. Трансформаторы $T1–T3$ имеют схему соединения Y_0/D ; трансформаторы $T4$ и $T5$ имеют схемы соединения трехфазно-двухфазную и звезда–зигзаг соответственно.

Расчеты проводились с точностью до 0,0001 отн. ед. В генераторных узлах задаются P_G и $|\dot{U}_G|$, а значение Q_G определяется из расчета (тип узла $N=4$). Заметим, что если точное значение Q_G известно, то для таких узлов можно задавать P_G и Q_G (тип узла $N=2$). Тогда значение U_G не закрепляется. Нагрузочные узлы могут задаваться как $P_H + jQ_H = \text{const}$ (тип узла $N=3$) либо $\dot{Y}_{H,ш} = \text{const}$ (тип узла $T=6$). Нейтраль генераторных узлов определяется как тип узла $N=5$, а балансирующий узел – как тип узла $N=1$.

В табл. 5 и 6 приведены результаты расчета симметричного УР в фазных координатах (значения показателей без скобок), где нагрузка $P_H + jQ_H = \text{const}$. Заметим, что значения напряжений во вторичных обмотках трехфазно-двухфазно-

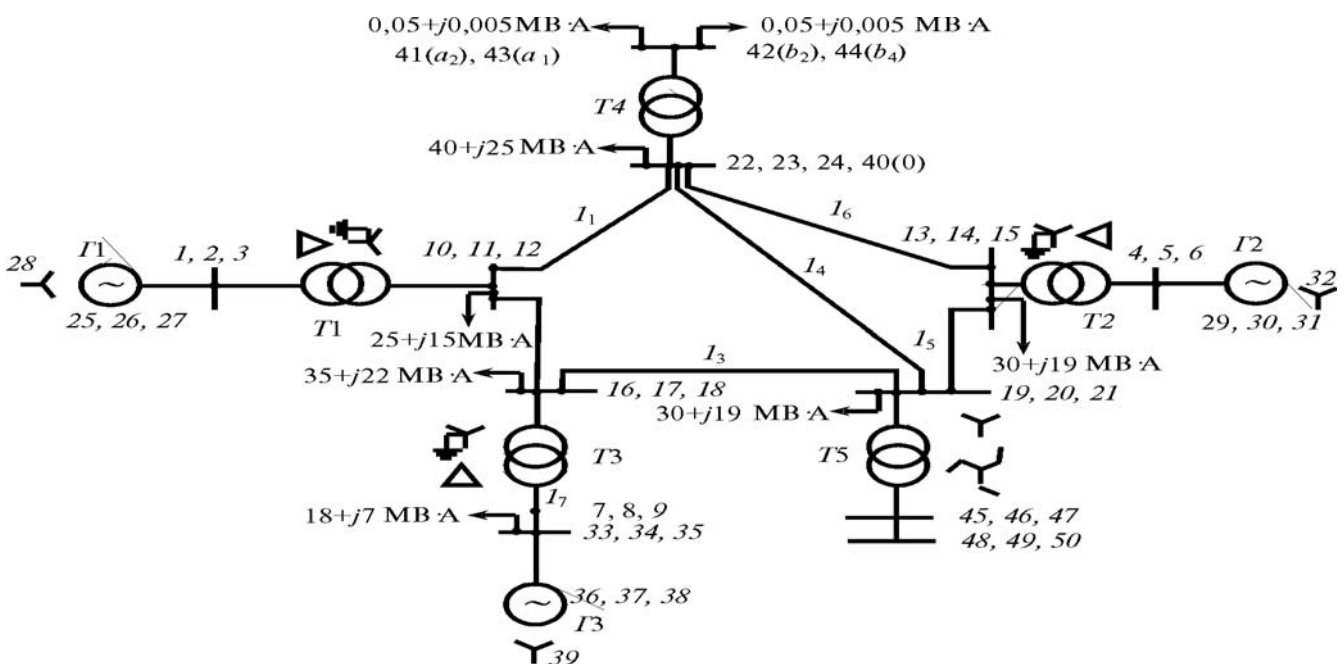


Рис. 6. Схема исследуемой многомашинной ЭЭС ($S_{\text{баз}}=100 \text{ МВА}$)

го трансформатора распределяются следующим образом: $\dot{U}_{a2-a1} = (\dot{U}_{41} - \dot{U}_{43})$, $\dot{U}_{b2-b1} = (\dot{U}_{42} - \dot{U}_{44})$, где $\dot{U}_{a2-a1} = 0,855\text{Е}83,15^\circ - 0,197\text{Е} - 76,996^\circ = 1,0424\text{Е}86,83^\circ$; $\dot{U}_{b2-b1} = 0,836\text{Е} - 5,011^\circ - 0,209\text{Е} - 175,166^\circ = 1,043\text{Е} - 3,05^\circ$.

Следует заметить, что напряжение \dot{U}_{a2-a1} имеет идентичное значение для фазы *A* первичной обмотки (узел $N=22$), что соответствует трехфазно-двухфазным трансформаторам. Кроме того, согласно схемам соединения трехфазно-двухфазных трансформаторов, \dot{U}_{b2-b1} имеет одинаковое значение с

\dot{U}_{a2-a1} и сдвинуты друг относительно друга на 90° . Результаты расчетов также показывают, что напряжение \dot{U}_D узла \dot{U}_{40} сдвинуто по отношению первичному узлу $N=22$ на 180° . Как видно из табл. 5, узловые напряжения на выводах «зигзаг» (узлы \dot{U}_{48} , \dot{U}_{44} , \dot{U}_{50}) имеют одинаковые значения по отношению к первичной обмотке и сдвинуты на 30° . В узлах «зигзаг» (узлы \dot{U}_{45} , \dot{U}_{46} , \dot{U}_{47}) значения напряжения отличаются от значений в первичной обмотке.

Таким образом, результаты расчетов свидетельствуют о правильности работы методики и про-

Таблица 2

Узел		Сопротивление					
начальный	конечный	прямой последовательности			нулевой последовательности		
		R_1	X_1	B_1	R_0	X_0	B_0
10, 11, 12	22, 23, 24	0,0145	0,0660	0,0108	0,0456	0,1944	0,0058
10, 11, 12	16, 17, 18	0,0110	0,0496	0,0080	0,0342	0,1458	0,0050
16, 17, 18	19, 20, 21	0,0091	0,0413	0,0068	0,0285	0,1215	0,0043
19, 20, 21	22, 23, 24	0,0056	0,0248	0,0041	0,0171	0,0729	0,0025
19, 20, 21	13, 14, 15	0,0035	0,0155	0,0021	0,0114	0,0486	0,0027
13, 14, 15	22, 23, 24	0,0013	0,0330	0,0054	0,0228	0,0972	0,0034
7, 8, 9	33, 34, 35	0,0073	0,0330	0,0054	0,0228	0,0972	0,0034

Таблица 3

Узел		Сопротивление	
начальный	конечный	прямой последовательности ($R_1 = 0$)	нулевой последовательности ($R_0 = 0$)
		X_1	X_0
1, 2, 3	25, 26, 27	0,0967	0,0467
4, 5, 6	29, 30, 31	0,17	0,085
33, 34, 35	36, 37, 38	0,17	0,085

Таблица 4



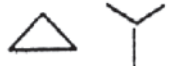
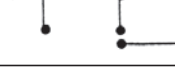
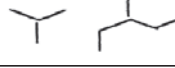
Узел		Тип соединения трансформатора	Сопротивление X , отн. ед.
начальный	конечный		
1, 2, 3	10, 11, 12		0,0533
4, 5, 6	13, 14, 15		0,12
7, 8, 9	16, 17, 18		0,16
22, 23, 24	41, 42, 43, 44		0,09(X_M); 0,16 (X_T)
19, 20, 21	45, 46, 47, 48, 49, 50		0,17

Таблица 5

Номер узла	Тип узла	$ U_i $, отн.ед.	Угол, град	P_r , МВт	Q_r , Мвар	P_H , МВт	Q_H , Мвар
1	3	1,056 (1,050/1,050)	-1,527 (-1,916/-1,692)	0	0	0	0
2	3	1,056 (1,051/1,051)	-121,656 (-121,674/-121,447)	0	0	0	0
3	3	1,056 (1,055/1,057)	118,479 (116,154/114,511)	0	0	0	0
4	3	1,054 (1,052/1,054)	-1,540 (68,661/89,110)	0	0	0	0
5	3	1,054 (1,050/1,051)	-121,575 (-30,575/-30,149)	0	0	0	0
6	3	1,054 (1,062/1,063)	116,490 (-150,839/-150,400)	0	0	0	0
7	3	1,055 (1,053/1,054)	-2,431(87,380/87,897)	0	0	0	0
8	3	1,055 (1,056/1,057)	-122,460 (-32,461/-31,924)	0	0	0	0
9	3	1,055 (1,056/1,058)	117,608 (-152,688/-152,142)	0	0	0	0
10	3 (6/3)	1,048 (1,046/1,048)	87,473 (87,388/87,779)	0	0	8,333 (9,111/8,333)	5,0 (5,466/5,0)
11	3 (6/3)	1,048 (1,044/1,047)	-32,453 (-33,011/-32,619)	0	0	8,333 (9,089/8,333)	5,0 (5,453/5,0)
12	3 (6/3)	1,048 (1,037/1,040)	-152,507 (-152,765/-152,435)	0	0	8,333 (8,968/8,333)	5,0 (5,361/5,0)
13	3 (6/3)	1,043 (1,041/1,044)	87,153 (87,096/87,536)	0	0	10,000 (10,833/10,0)	6,333 (6,861/6,333)
14	3 (6/3)	1,043 (1,039/1,042)	-32,757 (-33,436/-32,956)	0	0	10,000 (10,791/10,0)	6,333 (6,834/6,333)
15	3 (6/3)	1,043 (1,029/1,032)	-152,809 (-153,101/-152,720)	0	0	10,000 (10,587/10,0)	6,333 (6,705/6,333)
16	3 (6/3)	1,045 (1,042/1,045)	87,183 (87,080/87,529)	0	0	11,670 (12,676/11,670)	7,333 (7,965/7,333)
17	3 (6/3)	1,045 (1,045/1,044)	-32,741 (-32,377/-32,917)	0	0	11,670 (12,625/11,670)	7,333 (7,934/7,333)
18	3 (6/3)	1,045 (1,032/1,035)	-152,736 (-153,073/-152,700)	0	0	11,670 (12,428/11,670)	7,333 (7,809/7,333)
19	3 (6/3)	1,043 (1,040/1,043)	87,099 (87,025/87,484)	0	0	10,0 (10,820/10,0)	6,333 (6,352/6,333)
20	3 (6/3)	1,043 (1,038/1,042)	-32,819 (-33,469/-32,994)	0	0	10,0 (10,778/10,0)	6,333 (6,525/6,333)
21	3 (6/3)	1,043 (1,029/1,032)	-152,861 (-153,152/-152,771)	0	0	10,0 (10,588/10,0)	6,333 (6,706/6,333)
22	3 (6/3)	1,043 (1,040/1,043)	87,086 (87,014/87,468)	0	0	13,333 (14,420/13,333)	8,333 (9,012/8,333)
23	3 (6/3)	1,043 (1,038/1,042)	-32,830 (-33,458/-32,992)	0	0	13,333 (14,368/13,333)	8,333 (8,980/8,333)
24	3 (6/3)	1,043 (1,029/1,032)	-152,872 (-153,148/-152,770)	0	0	13,333 (14,129/13,333)	8,333 (8,830/8,333)
25	1	1,070 (1,070/1,070)	0	32,373 (38,839/34,380)	16,230 (23,199/20,857)	0	0
26	1	1,070 (1,070/1,070)	-120,072 (-120,072/-120,072)	32,306 (32,511/27,948)	15,976 (21,553/19,995)	0	0
27	1	1,070 (1,070/1,070)	120,072 (120,072/120,072)	32,497 (37,072/31,881)	16,081 (16,920/14,876)	0	0
28	5	0	0	0	0	0	0

29	4	1,070 (1,070/1,070)	0,185 (90,856/91,292)	19,985 (24,543/24,429)	10,151 (11,722/10,793)	0	0
30	4	1,070 (1,070/1,070)	-119,839 (-29,168/-28,732)	20,105 (16,229/16,367)	10,292 (13,057/12,169)	0	0
31	4	1,070 (1,070/1,070)	120,209 (-149,192/-148,756)	19,912 (19,228/19,204)	10,329 (5,183/4,496)	0	0
32	5	0	0	0	0	0	0
33	3 (6/3)	1,057 (1,055/1,056)	-2,385 (87,412/87,946)	0	0	6,0 (6,680/6,0)	2,333 (2,598/2,333)
34	3 (6/3)	1,057 (1,058/1,059)	-122,414 (-32,443/-31,893)	0	0	6,0 (6,710/6,0)	2,333 (2,610/2,333)
35	3 (6/3)	1,057 (1,058/1,059)	117,649 (-152,634/-152,077)	0	0	6,0 (6,714/6,0)	2,333 (2,611/2,333)
36	4	1,070 (1,070/1,070)	-1,522 (85,282/88,828)	10,047 (10,083/10,239)	8,272 (9,429/8,576)	0	0
37	4	1,070 (1,070/1,070)	-121,546 (-31,670/-31,124)	10,075 (8,970/8,938)	8,292 (7,914/7,239)	0	0
38	4	1,070 (1,070/1,070)	118,502 (-151,694/-151,143)	9,880 (10,947/10,823)	8,428 (7,732/6,828)	0	0
39	5	0	0	0	0	0	0
40	3	0,521 (0,520/0,521)	-93,090 (-93,147/-92,693)	0	0	0	0
41	3	0,855 (0,863/0,867)	83,150 (82,090/83,205)	0	0	0	0
42	3	0,836 (0,751/0,756)	-5,011 (-9,572/-8,394)	0	0	0	0
43	3	0,297 (0,192/0,187)	-76,996 (-72,025/-74,105)	0	0	0	0
44	3	0,004 (0,297/0,291)	-175,166 (-167,711/-168,986)	0	0	0	0
45	3	0,602 (0,601/0,602)	67,101 (67,024/87,484)	0	0	0	0
46	3	0,602 (0,599/0,601)	-32,817 (-33,474/-32,999)	0	0	0	0
47	3	0,602 (0,594/0,596)	-152,660 (-153,152/-152,772)	0	0	0	0
48	3	1,043 (1,034/1,036)	-122,888 (-122,883/-122,452)	0	0	0	0
49	3	1,043 (1,042/1,045)	117,158 (116,762/117,260)	0	0	0	0
50	3	1,043 (1,032/1,035)	-2,545 (-3,459/-3,043)	0	0	0	0

Таблица 6

Узел		P, МВт	Q, Мвар	Узел		P, МВт	Q, Мвар
начальный	конечный			начальный	конечный		
1	25	-32,373 (-38,839/-34,380)	-15,122 (-21,470/-19,491)	25	1	32,373 (38,839/34,380)	16,230 (23,199/20,857)
2	26	-32,306 (-32,511/-27,948)	-14,879 (-20,268/-18,998)	26	2	32,306 (32,511/27,948)	15,976 (21,553/19,995)
3	27	-32,497 (-37,071/-31,881)	-14,971 (-15,517/-13,830)	27	3	32,497 (37,072/31,881)	16,081 (16,920/14,876)
4	29	-19,985 (-24,543/-24,428)	-9,405 (-10,624/-9,734)	29	4	19,985 (24,543/24,428)	10,151 (11,722/10,793)
5	30	-20,105 (-16,229/-16,367)	-9,534 (-12,413/-11,552)	30	5	20,105 (16,229/16,367)	10,292 (13,057/12,169)
6	31	-19,912 (-19,228/-19,204)	-9,582 (-4,594 /-3,919)	31	6	19,912 (19,228/19,204)	10,329 (5,183/4,496)

10	16	12,079 (12,622/10,274)	3,889 (4,220/3,771)	16	10	-12,063 (-12,605/-10,265)	-4,690 (-5,008/-4,592)
11	17	12,106 (15,593/13,233)	3,965 (5,171/4,612)	17	11	-12,090 (-15,566/-13,212)	-4,768 (-5,913/-5,399)
12	18	11,943 (13,322/11,482)	4,030 (7,676/7,335)	18	12	-11,926 (-13,295/-11,461)	-4,833 (-5,419/-8,105)
10	22	12,317 (11,936/10,004)	5,404 (5,932/5,399)	22	10	-12,292 (-11,913/-9,989)	-6,470 (-6,993/-6,497)
11	23	12,230 (14,615/12,629)	5,382 (6,308/5,689)	23	11	-12,207 (-14,580/-12,600)	-6,452 (-7,324/-5,751)
12	24	12,103 (12,881/11,307)	5,536 (8,829/8,302)	24	12	-12,077 (-12,844/-11,278)	-6,610 (-9,824/-9,331)
13	19	6,511 (8,625/8,813)	1,803 (1,825/1,599)	19	13	-6,509 (-8,523/-8,810)	-2,090 (-2,105/-1,881)
14	20	6,437 (4,315/4,753)	1,662 (2,852/2,657)	20	14	-6,436 (-4,314/-4,752)	-1,950 (-3,139/-2,945)
15	21	6,466 (5,362/5,559)	1,749 (-1,541/-1,627)	21	15	-6,465 (-5,361/-5,558)	-2,037 (1,260/1,344)
13	22	4,002 (5,114/5,530)	0,986 (1,095/1,010)	22	13	-4,001 (-5,111/-5,527)	-1,568 (-1,671/-1,589)
14	23	3,912 (1,412/2,040)	0,880 (1,713/1,604)	23	14	-3,911 (-1,411/-2,040)	-1,463 (-2,293/-2,138)
15	24	3,974 (2,381/2,696)	0,972 (-2,027/-2,104)	24	15	-3,973 (-2,381/-2,696)	-1,555 (1,458/1,532)
16	19	4,617 (3,321/2,786)	3,748 (4,121/3,793)	19	16	-4,614 (-3,319/-2,784)	-4,470 (-4,942/-4,520)
17	20	4,489 (5,276/4,599)	3,649 (3,489/3,188)	20	17	-4,487 (-5,272/-4,596)	-4,373 (-4,203/-3,911)
18	21	4,444 (4,866/4,380)	3,785 (5,752/5,352)	21	18	-4,440 (-4,861/-4,375)	-4,508 (-6,446/-6,054)
19	22	0,996 (1,068/1,498)	0,186 (0,315/0,353)	22	19	-0,996 (-1,067/-1,497)	-0,626 (-0,753/-0,793)
20	23	0,924 (-0,993/-0,448)	0,139 (0,455/0,440)	23	20	-0,924 (0,994/0,448)	-0,579 (-0,892/-0,880)
21	24	0,988 (-0,400/-0,113)	0,203 (-1,603/-1,649)	24	21	-0,988 (0,400/0,113)	-0,643 (1,175/1,218)
7	33	-3,966 (-3,408/-4,242)	-6,288 (-7,157/-6,600)	33	7	3,969 (3,412/4,246)	5,701 (6,575/6,016)
8	34	-4,024 (-2,302/-2,965)	-6,332 (-5,661/-5,284)	34	8	4,028 (2,305/2,967)	5,745 (5,068/4,690)
9	35	-3,837 (-4,268/-4,855)	-6,442 (-5,472/-4,867)	35	9	3,841 (4,270/4,858)	5,856 (4,882/4,275)
33	36	-10,047 (-10,082/-10,238)	-8,021 (-9,145/-8,311)	36	33	9,880 (10,083 10,239)	8,272 (9,429/8,576)
34	37	-10,074 (-8,970/-8,938)	-8,038 (-7,701/-7,043)	37	34	10,075 (8,970 8,938)	8,292 (7,914/7,239)
35	38	-9,881 (-10,947/-10,823)	-8,178 (-7,463/-6,585)	38	35	10,047 (10,947 10,323)	8,428 (7,732/6,828)

граммы в сложных системах при использовании различных видов трансформаторов.

Рассмотрим другой пример, где требуется оценить различные представления нагрузок ($S_H = \text{const}$ либо в виде эквивалентной проводимости) в несимметричных режимах, а также оценить допустимость таких режимов с точки зрения уровня несимметрии в узлах схемы ЭЭС.

Заметим, что при рассмотрении УР для однолинейных ЭЭС нагрузка, как правило, представлялась в виде $\dot{S}_H = P_H + jQ_H = \text{const}$. Однако при исследовании несимметричных режимов, вызванных различными причинами, напряжения по фазам не одинаковы. Следовательно, для таких режимов представление нагрузки в виде $S_H = \text{const}$ нереально. Одним из альтернативных вариантов является представление нагрузок в виде эквивалентных постоянных проводимостей. Для перехода системы

(рис. 6) в несимметричный режим работы предполагается, что в трансформаторах $T2$ и $T3$ со стороны треугольника имеется обрыв (в расчетах они представляются в виде открытого треугольника), а также не учитывается нагрузка в узлах 42 и 43. Результаты расчета несимметричного УР при представлении нагрузок в узлах схемы в виде $Y_{н.ш} = \text{const}$ и $\dot{S}_H = P_H + jQ_H = \text{const}$ отражены также в табл. 5, 6 (значения указаны в скобках).

Сравнение результатов расчета несимметричных УР, представленных в табл. 5 и 6, свидетельствует о том, что уровни значений напряжения в узлах различны из-за различного представления нагрузок в узлах схемы.

Полученные результаты расчета несимметричного УР свидетельствуют, что отмеченные нарушения симметричного режима не вызывают глубоких

нарушений уровня несимметрии режимных параметров в схеме в сети и такой режим допустим.

Для иллюстрации работоспособности разработанной методики и программы расчета переходных режимов рассмотрен тестовый пример [15] для синхронной машины, работающей на систему. Все данные для исследуемого генератора (машина явно-полюсная): напряжение 6 кВ; мощность 1290 кВА; скорость вращения 300 об/мин; число полюсов 20; напряжение возбудителя 80 В; реактивные сопротивления (в отн. ед.): $X_d = 0,957$; $X'_d = 0,354$; $X''_d = 0,193$; $X_2 = 0,196$; $X'_2 = 0,282$; $X_0 = 0,0573$; $T_d = 1,03$ с; $T'_d = 0,052$ с; $T_a = 0,0168$ с; параметры возбудителя: $X_{ff} = 0,17$ отн.ед.; $X_{af} = 0,15$ отн.ед.; $R_f = 0,2$ Ом $\varnothing 75^\circ$.

Результаты расчетов при трехфазном и однофазном КЗ на выводах генератора представлены на рис. 7, где показано полное совпадение с экспериментально снятыми кривыми переходного процесса.

Вывод. Разработанные методика и комплексная программа могут быть использованы для решения следующих практических задач: проверки возможности длительной работы в рассматриваемом несимметричном режиме с точки зрения условий работы генераторов ЭЭС и электроприемников; выяснения необходимости применения симметрирующих устройств, выбора их параметров и мест установки, обеспечения экономичности несимметричных режимов; проведения различных испытаний, анализа происшедших аварий; выбора параметров срабатывания и оценки чувствительности устройств релейной защиты, параметров устройств автоматики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Применение** цифровых вычислительных машин в электроэнергетике /Под ред. Щербачева О.В. —Л.: Энергия, 1980.
2. **Инструкция** к программе МУСТАНГ (Описание алгоритмов и моделей). — Рига, 2003.
3. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.; Л.: «Энергия», 1962.
4. **Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М.** Формирование математической модели энергосистемы для расчетов электромеханических переходных процессов. — Электричество, 2008, №12.
5. **Вайнштейн Р.А., Лозинский К.С., Иванов В.П., Кобычев М.И.** Усовершенствование расчетов несимметричных режимов в программах расчета электромеханических переходных процессов. — Электричество, 2008, №7.
6. **Лосев С.Б., Чернин А.Б.** Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. —М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. **Гусейнов А.М.** Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах. — Электричество, 1989, №3.
8. **Горев А.А.** Переходные процессы синхронной машины. — М.: Госэнергоиздат, 1950.
9. **Казовский Е.Я.** Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. — М.;Л.: Изд. АН СССР, 1962.

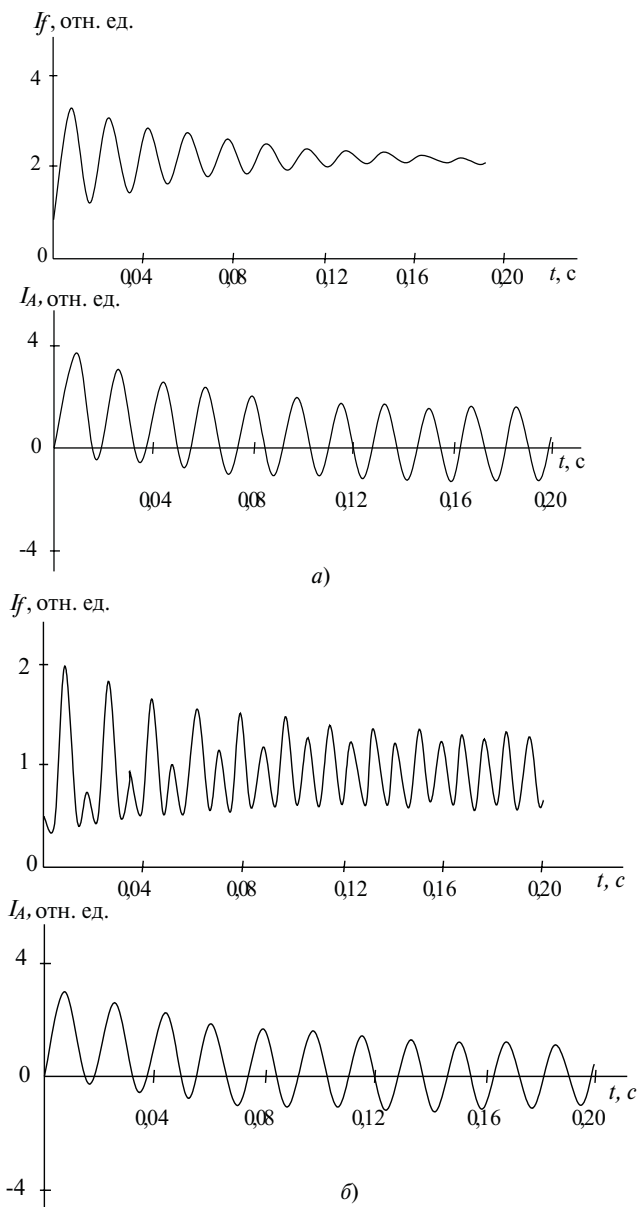


Рис. 7. Ток в обмотке возбуждения и в фазе А при трехфазном КЗ (а) и однофазном (б)

10. **Казовский Е.Я., Данилевич Я.Б., Кашарский Э.Г., Руби-сов Г.В.** Анормальные режимы работы крупных синхронных машин. – Л.: Наука, 1969.
11. **Важнов А.Н.** Основы теории переходных процессов синхронной машины. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960.
12. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1981, 502 с.
13. **Демидович Б.П., Марон И.А.** Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1966.
14. **Гусейнов А.М.** Оценка степени влияния различных факторов на синхронную динамическую устойчивость электроэнергетической системы. – Проблемы энергетики, 2007, №3 (часть 1), №4 (часть 2).
15. **Rafian M., Laughton M.A.** Determination of synchronous-machine phase-co-ordinate parameters. – Proc. IEE, August 1976, vol.123, № 8.

[05/12/2011]

Авторы: Гусейнов Акиф Магеррам оглы окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии в 1972 г. В 1993 г. в АЗНИИЭ защитил докторскую диссертацию «Методы расчета режимов работы сложных электроэнергетических систем при оперативном управлении». Заведующий кафедрой «Электрические станции» Азербайджанской государственной нефтяной академии (АГНА).

Ибрагимов Фамиль Шамиль оглы окончил энергетический факультет АГНА в 2000 г., получил степень бакалавра. В 2002 г. окончил магистратуру по кафедре «Электрические станции» АГНА. Аспирант той же кафедры.