

DOI 10.5862/JEST.243.7

УДК 621.313.322-81

*Н.В. Гришин*

## **СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕЖИМНЫХ ЗАДАЧ ШЕСТИФАЗНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ**

*N.V. Grishin*

### **EQUIVALENT CIRCUITS FOR OPERATION CONDITIONS PROBLEMS OF SIX PHASE TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY**

В современной российской энергетике при постройке энергоблоков мощностью больше 1000 МВт находят применение шестифазные турбогенераторы. Режимные вопросы эксплуатации шестифазного турбогенератора могут быть рассмотрены по аналогии с трехфазными машинами на базе уравнений состояния по двум взаимно перпендикулярным осям типа уравнений Парка—Горева, записанным для идеализированной машины. Исследование упрощается, если действительную машину, обмотки ротора и статора которой связаны электромагнитно, эквивалентировать схемами замещения, элементы которых связаны только электрически. Используя изображение переменных в векторной форме и рассматривая установившийся, переходный и сверхпереходный режимы, можно получить схемы замещения, имеющие общую структуру и различающиеся параметрами. При этом появляется возможность рассматривать широкий спектр задач — установившихся и переходных, в том числе при различной нагрузке трехфазных систем. Кроме того, схемы замещения могут применяться для анализа режимов работы энергоблока, для рассмотрения режимных вопросов энергосистемы и т.д. В качестве примера рассмотрены режимы установившихся коротких замыканий. Результаты согласуются с опытными значениями, полученными в ходе испытаний серийного оборудования.

**ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ; ШЕСТИФАЗНЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ; РЕЖИМНЫЕ ЗАДАЧИ; УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ; СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ.**

Six-phase turbine generators are commonly used in the modern Russian power industry when constructing power-generating units of more than 1000 MW. Issues of operation conditions of a six-phase turbine generator could be studied by analogy with three-phase machines based on equations of state for two mutually perpendicular axes of the Park-Gorev type written for an idealized machine. The investigation is simplified if the real machine whose rotor and stator windings are electromagnetically coupled is replaced by equivalent circuits with only electrical coupling between its components. Equivalent circuits could be created by representing the variables in vector form and investigating the steady-state, transient and sub-transient conditions. These circuits have a common structure and differ only by their parameters. In this case, a broad range of steady-state and transient problems could be studied, including those with different loads of three-phase systems. In addition, equivalent circuits could be used for studying the operation conditions of power-generating units, the operation problems of energy systems, and so on. The conditions of steady short circuits of a turbine generator are considered as an example. The obtained results correspond with the experimental values found from serial production tests.

**TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY; SIX-PHASE TURBOGENERATORS; CONDITIONS PROBLEMS; OPERATION CONDITIONS EQUATIONS; EQUIVALENT CIRCUITS.**

#### **Введение**

Одно из решений при постройке энергоблоков мощностью выше 1000 МВт сводится к при-

менению шестифазных двухполюсных турбогенераторов. Подобный опыт впервые был реализован для генератора ТВВ-1200-2УЗ мощ-

ностью 1200 МВт на Костромской ГРЭС [1] и продолжает воплощаться сейчас на ряде АЭС.

Шестифазная обмотка статора представляет собой двойную обмотку, состоящую из двух трехфазных систем со смещенными в пространстве на 30 электрических градусов магнитными осями (системы 1 и 2). Такая схема статорной обмотки позволяет приблизить форму пространственного распределения поля реакции якоря к синусоидальной и тем самым снизить добавочные потери и паразитные электромагнитные моменты, повысить использование машины [2]. Для генераторов предельной мощности подключение шестифазной системы к трехфазной сети, как правило, осуществляется с помощью трехобмоточного блочного повышающего трансформатора за счет соединения обмоток генераторного напряжения в звезду и треугольник.

Шестифазный турбогенератор при одинаковой нагрузке трехфазных обмоток может исследоваться с помощью обычно приводимых в каталогах параметров: продольной, переходной и сверхпереходной реактивностей и ЭДС, т.е. эквивалентированием трехфазной машиной. В более общем случае нагрузка трехфазных систем различна. Из-за электромагнитной связи между трехфазными обмотками общие режимы работы шестифазного турбогенератора не могут быть рассмотрены с достаточной точностью методами трехфазных машин.

Исследование работы машины упрощается, если действительную машину, обмотки ротора и статора которой связаны электромагнитно, эквивалентировать схемами замещения, элементы которых связаны только электрически [3].

Цель излагаемой работы – предложить схемы замещения шестифазного турбогенератора, отражающие особенности электромагнитных связей и позволяющие анализировать установившиеся и переходные процессы при обычных принимаемых в теории электрических машин допущениях [4].

#### Методика решения поставленной задачи

На основе уравнений состояния шестифазного турбогенератора типа уравнений Парка–Горева могут быть составлены схемы замещения, отличающиеся тем, что входящие в них параме-

тры неизменны и не зависят от рассматриваемых режимов (в отличие от [2, 5, 6]).

Используя представление переменных в комплексной форме, из рассмотрения установившегося, переходного и сверхпереходного режимов по данным уравнениям можно получить схемы замещения для анализа установившихся, переходных и сверхпереходных процессов шестифазного турбогенератора с использованием симметричных составляющих по аналогии с хорошо разработанными методами трехфазных машин.

#### Уравнения состояния шестифазного турбогенератора

Режимные вопросы эксплуатации шестифазного турбогенератора могут быть рассмотрены по аналогии с трехфазными машинами на базе уравнений состояния по двум взаимно перпендикулярным осям подобно уравнениям Парка–Горева, записанным для идеализированной машины [7],

$$\begin{aligned} U_{d1} &= p\Psi_{d1} - \Psi_{q1}p\gamma - r_{d1}i_{d1}; \\ U_{q1} &= p\Psi_{q1} + \Psi_{d1}p\gamma - r_{q1}i_{q1}; \\ U_{01} &= p\Psi_{01} - r_{i01}i_{01}; \\ U_{fd} &= p\Psi_{fd} + r_{fd}i_{fd}; \\ 0 &= p\Psi_{ed} + r_{ed}i_{ed}; \\ 0 &= p\Psi_{eq} + r_{eq}i_{eq}, \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнений связи токов и потокосцеплений

$$\begin{aligned} \Psi_{d1} &= x_{\sigma 11}i_{d1} + x_{\sigma 12}(i_{d1} + i_{d2}) + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{q1} &= x_{\sigma 11}i_{q1} + x_{\sigma 12}(i_{q1} + i_{q2}) + x_{aq}(i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}); \\ \Psi_{01} &= x_{01}i_{01}, \\ \Psi_{fd} &= x_{\sigma fd}i_{fd} + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{ed} &= x_{\sigma ed}i_{ed} + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{eq} &= x_{\sigma eq}i_{eq} + x_{aq}(i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и далее для краткости будем приводить выражения только для первой трехфазной системы шестифазного неявнополюсного генератора; для второй системы выражения аналогичны и получаются перестановкой индексов 1 и 2. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является представление рассеяния трехфазной системы в виде суммы собственного рассеяния  $x_{\sigma 11}$  и рассеяния  $x_{\sigma 12}$  по путям взаимной индукции с другой трехфазной системой.

**Схемы замещения при динамических режимах**

Согласно структуре уравнений (1) и (2) при рассмотрении режимных задач шестифазный турбогенератор может быть представлен двумя электромагнитно и механически связанными трехфазными синхронными машинами. Для уравнений по продольной оси схема замещения представлена на рис. 1.

Потокосцепления  $\Psi_{d1}, \Psi_{d2}$  определяются напряжениями между точками  $a1-0, a2-0$ :

$$u_{a10} = \frac{d\Psi_{d1}}{d\tau}; \quad u_{a20} = \frac{d\Psi_{d2}}{d\tau}.$$

Аналогичная схема для уравнений поперечной оси, отличающаяся отсутствием цепи возбуждения, напряжениями ( $U_{q1}, U_{q2}$  вместо  $U_{d1}, U_{d2}$ ), параметрами ( $x_{aq}, x_{\sigma eq}, r_{eq}$  вместо  $x_{ad}, x_{\sigma ed}, r_{ed}$ ),

$r_{ed}$ ) и ЭДС вращения ( $\omega\Psi_{d1}, \omega\Psi_{d2}$  вместо  $-\omega\Psi_{q1}, -\omega\Psi_{q2}$ ) представлена на рис. 2.

Подобным образом могут быть синтезированы схемы замещения для различных условий работы машины.

**Установившийся режим прямой последовательности**

В установившемся режиме в уравнениях токи успокоительных контуров отсутствуют; при равенстве нулю производных и пренебрежении активным сопротивлением статора составляющие напряжений первой трехфазной системы обмотки статора равны (для второй получаются заменой индексов 1 на 2):

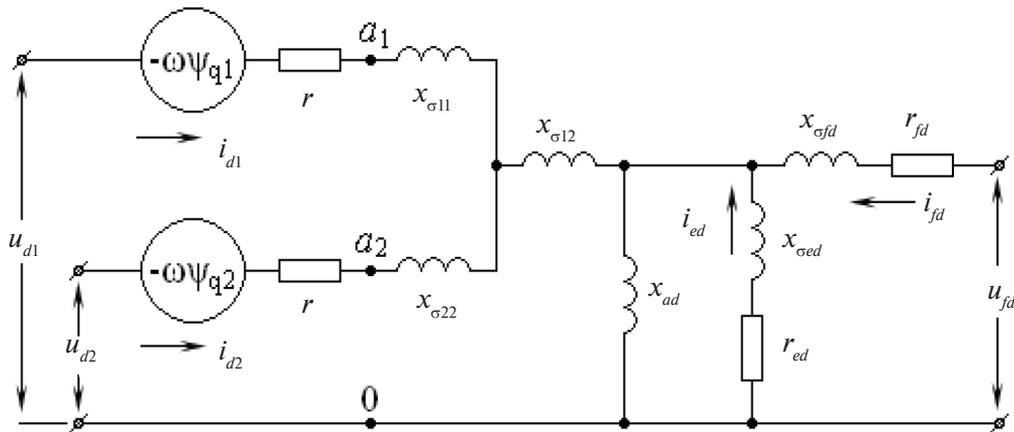


Рис. 1. Схема замещения по продольной оси

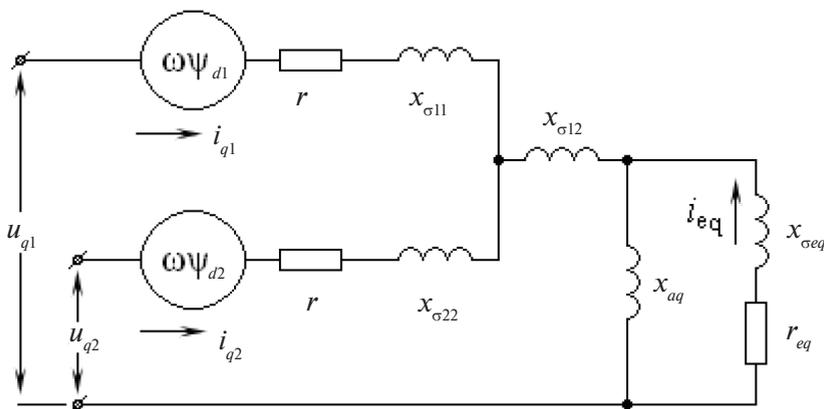


Рис. 2. Схема замещения по поперечной оси

$$\begin{aligned}
 U_{d1} &= -\omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x_{\sigma 12} (i_{q1} + i_{q2}) - \omega x_{aq} (i_{q1} + i_{q2}) = \\
 &= -\omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x_{q3} (i_{q1} + i_{q2}); \\
 U_{q1} &= \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x_{\sigma 12} (i_{d1} + i_{d2}) + \omega x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd}) = \\
 &= \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x_{d3} (i_{d1} + i_{d2}) + \omega x_{ad} i_{fd}.
 \end{aligned}$$

Эти выражения можно представить в комплексной форме. Координаты  $d, q$  совмещаются соответственно с вещественной и мнимой осями комплексной плоскости. При  $x_{ad} = x_{aq}$ , введя обозначения

$$\dot{U}_1 = U_{d1} + jU_{q1}; \quad \dot{U}_2 = U_{d2} + jU_{q2};$$

$$\dot{I}_1 = i_{d1} + ji_{q1}; \quad \dot{I}_2 = i_{d2} + ji_{q2}; \quad \dot{E} = -j\omega x_{ad} i_{fd},$$

получим

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E} + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2), \\
 \dot{U}_2 &= -\dot{E} + j\omega x_{\sigma 22} \dot{I}_2 + j\omega x_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2).
 \end{aligned} \quad (3)$$

### Переходный режим прямой последовательности

Рассматривая переходные процессы в энергосистеме, зачастую можно пренебречь трансформаторными ЭДС и активным сопротивлением обмотки статора:

$$\frac{d\Psi_{d1}}{d\tau} = \frac{d\Psi_{d2}}{d\tau} = \frac{d\Psi_{q1}}{d\tau} = \frac{d\Psi_{q2}}{d\tau} = 0; \quad r = 0.$$

Тогда запишем для первой системы (для второй – аналогично с заменой индексов 1 на 2):  $U_{d1} = -\Psi_{q1}\omega$ ;  $U_{q1} = \Psi_{d1}\omega$ .

Токи успокоительных контуров ротора быстро затухают, поэтому для переходного режима  $i_{ed} = i_{eq} = 0$ . Используя принцип постоянства потокосцепления с обмоткой возбуждения, можно записать согласно (2)

$$\begin{aligned}
 \Psi_{fd} \frac{x_{ad}}{x_{fd}} &= x_{ad} i_{fd} + \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} (i_{d1} + i_{d2}) = \\
 &= x_{ad} i_{fd0} + \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} (i_{d10} + i_{d20}).
 \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $i_{fd0}, i_{d10}, i_{d20}$  – начальные значения переменных, соответствующие исходному режиму при возникновении возмущения. Определяя из этого уравнения ток возбуждения и подставляя его в потокосцепления (2), определим

$$\begin{aligned}
 U_{d1} &= -\omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x_{q3} (i_{q1} + i_{q2}), \\
 U_{q1} &= \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x'_{d3} (i_{d1} + i_{d2}) + E'_d.
 \end{aligned}$$

Здесь переходная ЭДС равна  $E'_d = \Psi_{fd} \frac{x_{ad}}{x_{fd}} = E_0 + (x_{d3} - x'_{d3})(i_{d10} + i_{d20})$  при начальном значении ЭДС  $E_0 = \omega x_{ad} i_{fd0}$  и продольных составляющих токов статора  $i_{d10}, i_{d20}$ . Переходное сопротивление по продольной оси

$$x'_{d3} = x_{\sigma 12} + \frac{x_{ad} x_{\sigma fd}}{x_{ad} + x_{\sigma fd}}. \quad (5)$$

В векторной форме по аналогии с (3) для установившегося режима получаем

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}'_d + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x'_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \\
 \dot{U}_2 &= -\dot{E}'_d + j\omega x_{\sigma 22} \dot{I}_2 + j\omega x'_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2).
 \end{aligned} \quad (6)$$

### Сверхпереходный режим прямой последовательности

Сверхпереходным считается переходный режим при постоянстве потокосцеплений  $\Psi_{fd} = \text{const}$ ;  $\Psi_{ed} = \text{const}$ ;  $\Psi_{eq} = \text{const}$ .

При этом условии можно связать приращение токов  $\Delta i_{fd} = i_{fd} - i_{fd0}$ ;  $\Delta i_{d1} = i_{d1} - i_{d10}$ ;  $\Delta i_{d2} = i_{d2} - i_{d20}$ ;  $\Delta i_{d1} = i_{d1} - i_{d10}$ ;  $\Delta i_{d2} = i_{d2} - i_{d20}$  при изменении режима:

$$x_{fd} \Delta i_{fd} + x_{ad} (\Delta i_{d1} + \Delta i_{d2}) + x_{ad} i_{ed} = 0;$$

$$x_{ed} i_{ed} + x_{ad} (\Delta i_{d1} + \Delta i_{d2}) + x_{ad} \Delta i_{fd} = 0;$$

$$x_{eq} i_{eq} + x_{aq} (\Delta i_{q1} + \Delta i_{q2}) = 0.$$

Записывая в приращениях потокосцепление первой системы в продольной оси, получаем

$$\begin{aligned}
 \Psi_{d1} &= \Psi_{d10} + \Delta \Psi_{d1} = \\
 &= \Psi_{d10} + x_{\sigma 11} \Delta i_{d1} + x''_{d3} (\Delta i_{d1} + \Delta i_{d2})
 \end{aligned}$$

и напряжение в поперечной оси

$$U_{q1} = \omega \Psi_{d1} = E''_d + \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x''_{d3} (i_{d1} + i_{d2}).$$

Сюда входят сверхпереходная продольная ЭДС

$$E''_d = E_0 + \omega (x_{d3} - x''_{d3})(i_{d10} + i_{d20})$$

и сверхпереходная продольная реактивность

$$x''_{d3} = x_{\sigma 12} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma fd}} + \frac{1}{x_{\sigma ed}}}.$$

Аналогично можно получить выражения для напряжений продольной оси:

$$U_{d1} = -\omega\Psi_{q1} = -E''_q - \omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x''_{q3} (i_{q1} + i_{q2}).$$

Здесь – сверхпереходная поперечная ЭДС

$$E''_q = \omega (x_{q3} - x''_{q3}) (i_{q10} + i_{q20})$$

и сверхпереходная поперечная реактивность

$$x''_{q3} = x_{\sigma 12} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma ed}}}.$$

В комплексной форме, полагая  $x''_{d3} = x''_{q3}$ , получаем напряжения

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}'' + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x''_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \quad (7)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}'' + j\omega x_{\sigma 22} \dot{I}_2 + j\omega x''_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)$$

и ЭДС

$$\begin{aligned} \dot{E}' &= \dot{E}_0 - j\omega (x_{d3} - x''_{d3}) (i_{d10} + i_{d20}) - \\ &- j\omega (x_{q3} - x''_{q3}) (i_{q10} + i_{q20}). \end{aligned}$$

### Схема замещения для прямой последовательности

Полученные выражения (3), (6) и (7) по форме аналогичны друг другу; в зависимости от рассматриваемого режима изменяются индуктивные сопротивления и ЭДС. Для анализа установившегося режима используются  $x_{d3}$  и  $E$ , рассчитанная по току возбуждения; для исследования переходного режима – переходные параметры  $x'_{d3}$  и  $E'_d$ ; при рассмотрении сверхпереходного режима – сверхпереходные  $x''_{d3}$  и  $E''$ .

В приведенных выражениях указанные параметры  $x_{d3}$ ,  $x'_{d3}$ ,  $x''_{d3}$  отличаются от аналогичных

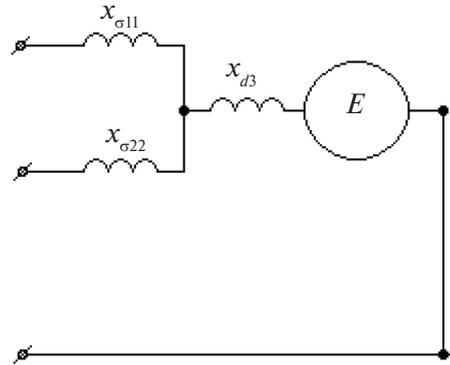


Рис. 3. Схема замещения шестифазного турбогенератора для установившегося режима прямой последовательности

общепринятых для трехфазных машин, потому что определяются без учета собственного рассеяния статорных обмоток  $x_{\sigma 11}$ ,  $x_{\sigma 22}$ .

По уравнениям (3), (6) и (7) могут быть построены схемы замещения для анализа режимных задач шестифазного турбогенератора, которые, в отличие от схем на рис. 1, 2, характеризуют связь между комплексными переменными.

Схема замещения для установившегося режима прямой последовательности приведена на рис. 3.

Данная схема может быть использована для анализа режимов энергоблока «шестифазный турбогенератор–трансформатор», при этом блочный повышающий трехобмоточный трансформатор представляется лучевой схемой замещения (рис. 4) [8].

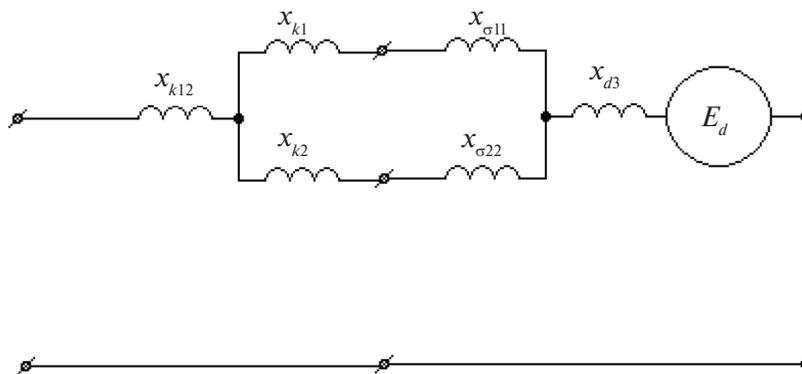


Рис. 4. Схема замещения энергоблока «шестифазный турбогенератор–трансформатор»

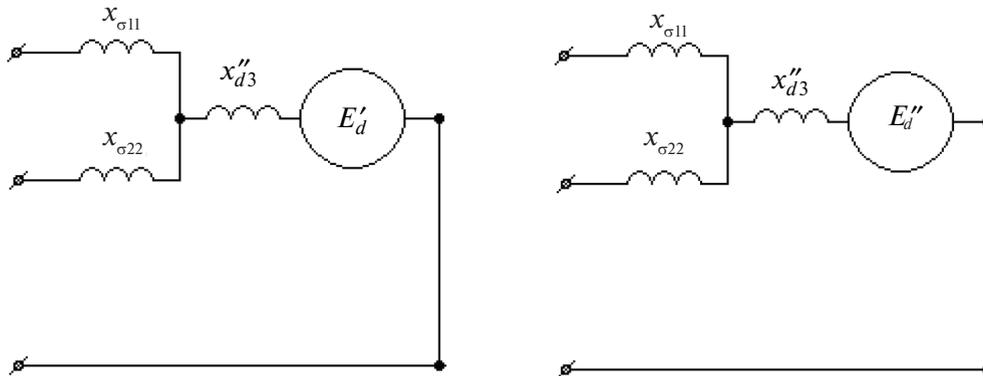


Рис. 5. Схемы замещения для переходного и сверхпереходного режимов прямой последовательности

Схемы замещения, соответствующие выражениям (6) и (7), приведены на рис. 5.

**Схема замещения для обратной последовательности**

Токи обратной последовательности создают магнитное поле, вращающееся в сторону противоположную направлению вращения ротора. При этом, как и для прямой последовательности, часть потока статора соответствует собственному рассеянию трехфазных систем статорной обмотки, а часть – взаимному рассеянию. Особенность режима обратной последовательности обусловлена тем, что ЭДС возбуждения относится только к прямой последовательности, а основной поток перемещается относительно ротора с двойной скоростью, индуцируя в демпферных контурах и обмотке возбуждения токи двойной частоты.

В случае синусоидальных напряжений статора и несинусоидальных токов сопротивление обратной последовательности трехфазной машины определяется [9] так:

$$x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q},$$

а в обратном случае – при несинусоидальных напряжениях статора и синусоидальных токах, что соответствует включенным последовательно индуктивным сопротивлениям (трансформаторы, линии электропередач) – согласно выражению

$$x_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2}.$$

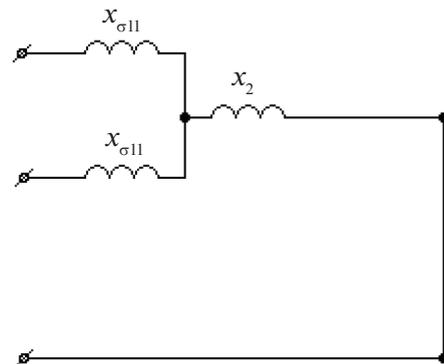


Рис. 6. Схема замещения шестифазного турбогенератора для обратной последовательности

В целом при наличии массивного ротора, обладающего значительными демпфирующими свойствами, для турбогенератора можно принять  $x''_d = x''_q$ , и, значит, как следует из представленных выше выражений,  $x_2 \approx x''_d$  [9].

В случае  $x_{\sigma 11} = x_{\sigma 22}$  для составляющих обратной последовательности можно использовать схему замещения рис. 6, при этом параметр этой последовательности равен  $x_2 = x''_{d3} - \frac{x_{\sigma 11}}{2}$ .

**Схема замещения нулевой последовательности**

Поскольку, как следует из (1) и (2), первые гармоники для потоков нулевой последовательности каждой трехфазной системы не взаимодействуют между собой, напряжения  $U_{01}, U_{02}$  уравниваются падением напряжения на сопротивлениях нулевой последовательности  $x_{01}, x_{02}$  от токов  $i_{01}, i_{02}$ .

### Обсуждение результатов

В отечественной научно-технической литературе схемы замещения шестифазных турбогенераторов рассмотрены в серии статей. В [2, 5] приводятся отдельные схемы при шестифазном коротком замыкании из режима холостого хода. При этом каждая трехфазная система эквивалентуется своей схемой. Однако, схемы не отражают электромагнитных связей между контурами машины, сложны для использования при составлении эквивалентных схем энергоблока, узла энергосистемы и ориентированы на один переходный режим генератора. На их основе в [6] для симметричного установившегося режима интуитивно построены схемы замещения отдельных трехфазных систем и общая для генератора. Указанные схемы рассматривают лишь узкую совокупность симметричных шестифазных режимов, наглядность физической трактовки явлений с использованием этих схем неоднозначна, с их помощью не проследить влияние определяющих параметров.

В зарубежной практике шестифазные обмотки якоря не нашли применения в сверхмощных турбогенераторах и рассматриваются применительно к синхронным [10] и асинхронным машинам [11, 12], работающим с устройствами преобразования частоты. Возникающие при этом режимные задачи существенно отличаются от задач, характерных для турбогенераторов мощных энергоблоков.

Полученные в настоящей статье схемы замещения, во-первых, обладают существенной наглядностью и упрощают физическую трактовку протекающих процессов. Например, с их помощью легко объяснить факт снижения ударных токов и токов установившихся режимов при сравнении шестифазных и трехфазных коротких замыканий, ибо данные режимы различаются параллельным включением двух собственных индуктивностей рассеяния: две индуктивности в первом случае против одной во втором.

Во-вторых, эти схемы позволяют использовать современные схемно-ориентированные программные продукты (PSpice, KTechLab, TcGate и др.), не прибегая к непосредственному решению дифференциальных уравнений, как

это в настоящее время практикуется при проектировании электростанций и сетей.

В-третьих, при известных параметрах появляется возможность синтезировать схемы замещения для анализа широкого спектра задач. Преимущество изложенного метода заключается в возможности не изменять параметры машины в зависимости от рассматриваемых режимов и при заданных единожды параметрах исследовать любые режимы, в том числе установившиеся и переходные, симметричные и несимметричные, учитывать неодинаковые сопротивления ветвей блочного трансформатора, различные нагрузки трехфазных систем от собственных нужд станции и т.д.

В-четвертых, схемы замещения позволяют достаточно наглядно проследить основное влияние отдельных контуров на параметры машины в целом и иллюстрируют, какие дополнительные сведения можно получить из опытов при промышленных испытаниях шестифазных турбогенераторов, при этом нет необходимости проводить преобразования уравнений.

Например, схема рис. 3 показывает, что величина собственной индуктивности рассеяния может быть определена из опыта установившегося трехфазного короткого замыкания, т.к. напряжение на открытой трехфазной системе будет равно напряжению на этой индуктивности. Кроме того, как следует из схемы, индуктивное сопротивление собственного рассеяния может быть определено как удвоенная разность продольных индуктивных сопротивлений установившихся режимов трех- и шестифазных коротких замыканий.

**Пример.** В качестве примера рассмотрим режим установившегося трехфазного короткого замыкания. При этом  $\dot{U}_1 = 0$ ,  $\dot{I}_2 = 0$ ; при пренебрежении активным сопротивлением векторы  $\dot{U}_2$  и  $\dot{E}$  направлены по поперечной оси,  $\dot{I}_1$  совпадает с продольной осью. Тогда согласно (3) имеем

$$0 = j\omega x_{ad} i_{fd} + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x_{\sigma 12} \dot{I}_1 + j\omega x_{ad} \dot{I}_1;$$

$$\dot{U}_2 = j\omega x_{ad} i_{fd} + j\omega x_{\sigma 12} \dot{I}_1 + j\omega x_{ad} \dot{I}_1.$$

Из первого выражения при известных параметрах можно построить характеристику трехфазного короткого замыкания. На рис. 7 приведена расчетная и опытная характеристики для

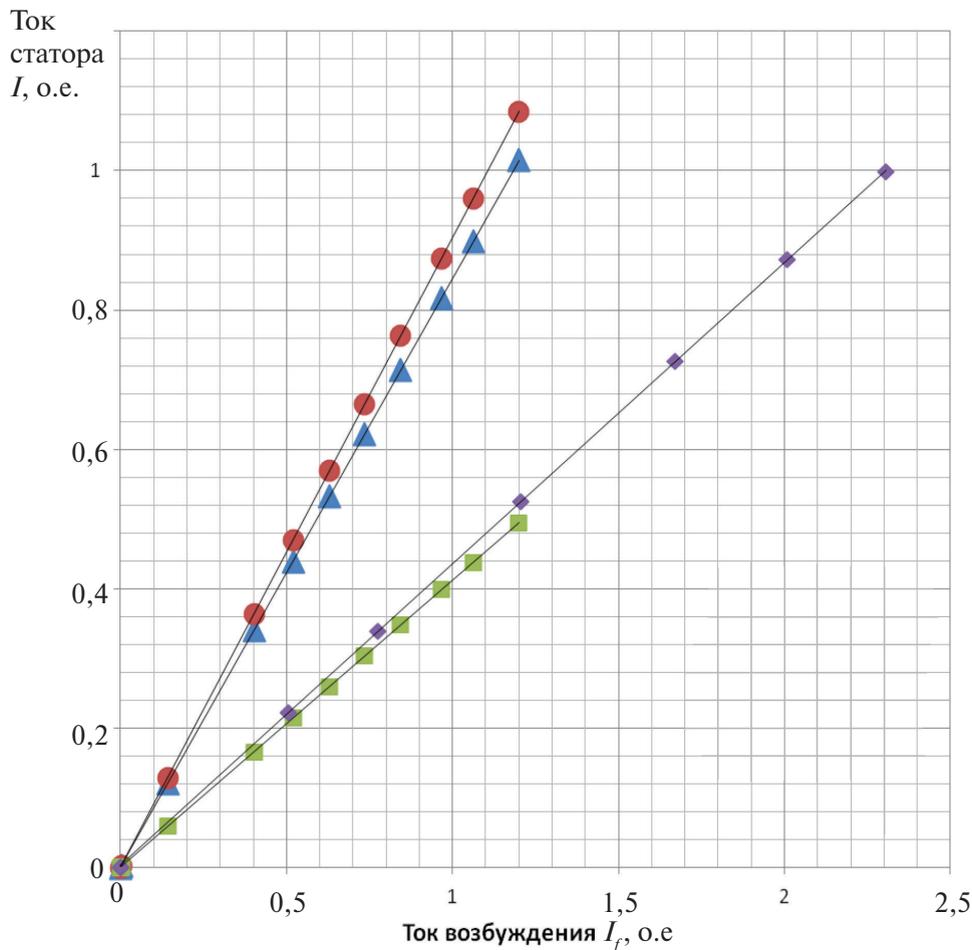


Рис. 7. Опытные и расчетные характеристики трехфазного ( $\blacktriangle$  — опыт;  $\bullet$  — расчет) и шестифазного ( $\blacklozenge$  — опыт;  $\blacksquare$  — расчет) коротких замыканий шестифазного турбогенератора

турбогенератора мощностью 1200 МВт, при этом максимальное различие между ними составило меньше 7%.

Как следует из схемы рис. 3, для шестифазного короткого замыкания собственные индуктивности рассеяния  $x_{\sigma 11}$  и  $x_{\sigma 22}$  обмотки статора включены параллельно, и при  $x_{\sigma 11} = x_{\sigma 22}$  суммарная собственная индуктивности рассеяния обмотки статора будет составлять  $0,5x_{\sigma 11}$ . Построенная на основании указанных соображений характеристика установившегося шестифазного короткого замыкания приведена на рис. 7; максимальное отклонение от опытных данных составляет менее 6 %.

Следует отметить, что результаты анализа существенно зависят от точности используемых

параметров; вопрос определения параметров будет рассмотрен в дальнейших публикациях.

### Выводы

1. Полученные на базе уравнений вида Парка–Горева схемы замещения позволяют рассматривать режимы работы шестифазного турбогенератора для широкого спектра задач: при различной нагрузке трехфазных систем, при различном распределении токов по отдельным фазам статора и т.д.

2. Схемы замещения обладают достаточной наглядностью, иллюстрируя реальные магнитные связи между трехфазными системами, позволяют проследить взаимосвязь параметров машины и проводить анализ с помощью

схемно-ориентированных программ без решения системы дифференциальных уравнений.

3. Эти схемы могут быть использованы как составные части в схемах замещения энергоблока и энергосистемы.

4. Расчетные результаты согласуются с опытными данными, полученными во время испытаний серийного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздова Л.А., Курилович Л.В., Фомин И.Ф., Хуторецкий Г.М. Результаты испытаний первого двухполюсного турбогенератора мощностью 1200 МВт на стенде завода «Электросила» // Сб. «Электросила». 1979. №32. С. 52–54.

2. Хуторецкий Г.М., Воронов Г.Г. Шестифазные турбогенераторы // Сб. «Электросила». 1970. № 28. С. 33–40.

3. Данилевич Я.Б., Домбровский В.В., Казовский Е.Я. Параметры электрических машин переменного тока. М., Л.: Наука, 1965. 339 с.

4. Важнов А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М., Л.: ГЭИ, 1960. 312 с.

5. Хуторецкий Г.М. Схемы замещения шестифазной неявнополюсной машины // Известия вузов. Электромеханика. 1970. №1. С. 27–33.

6. Хуторецкий Г.М., Воронов Г.Г. Схемы замещения, диаграммы и параметры шестифазного неявнополюсного генератора в установившихся режимах // Электромеханика. 1982. №11. С. 34–38.

7. Гришин Н.В. Уравнения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности. // НТВ СПбГПУ. 2016. № 2 (243) . С. 16–23 DOI 10.5862/JEST.243.2

8. Отчёт Б-ГЭ-5-76. по теме «Исследование сложных коротких замыканий в турбогенераторах» / карагандинский политехнический институт. Караганда, 1978. 166 с.

9. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия. 1974. 840 с.

10. Jatskevich J., Pekarek S. Six-phase synchronous generator-rectifier parametric average value modeling considering operational modes // HAIT Journal of Science and Engineering. 2005. Vol. 2, Is. 3–4. С. 365–385.

11. Singh G.K. Multi-phase induction machine drive research – a survey // Electric Power Systems Research. 2002. №61. С. 139–147.

12. Lipo T.A. A d–q model for six-phase induction machine // Proceedings on International conference. Electric machines. Athens. Greece. 1980. С. 860–867.

#### REFERENCES

1. Drozdova L.A., Kurilovich L.V., Fomin I.F., Khutoretskiy G.M. Rezultaty ispytaniy pervogo dvukhpolyusnogo turbogeneratora moshchnostyu 1200 MVt na stende zavoda «Elektrosila» [First two-pole turbine generator capacity 1200 MW Electrosila shop-tests results]. Collection «Elektrosila». 1979. № 32, S. 52–54. (rus)

2. Khutoretskiy G.M., Voronov G.G. Shestifaznyye turbogeneratory. [Six-phase turbogenerators]. Collection «Elektrosila». 1970. № 28. S. 33 – 40. (rus)

3. Danilevich Ya.B., Dombrovskiy V.V., Kazovskiy Ye.Ya. Parametry elektricheskikh mashin peremennogo toka [Alternating current electrical machines parameters]. Moscow – Leningrad: Nauka, 1965. 339 p. (rus)

4. Vazhnov A.I. Osnovy teorii perekhodnykh protsessov sinkhronnoy mashiny [Foundation of transient analysis for synchronous machines]. Moscow – Leningrad: GEI, 1960. 312 s. (rus)

5. Khutoretskiy G.M. Skhemy zameshcheniya shestifaznoy neyavnopolyusnoy mashiny. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. 1970. №1. S. 27–33. (rus.)

6. Khutoretskiy G.M., Voronov G.G. Skhemy zameshcheniya, diagrammy i parametry shestifaznogo neyavnopolyusnogo generatorya v ustanovivshikhsya rezhimakh [Equivalent circuits, diagrams and parameters

of six-phase non-silentpole generators at steady state conditions]. *Elektromekhanika*. 1982. № 11. S. 34–38. (rus)

7. Grishin N.V. Uravneniia rezhimnykh zadatch chestifaznykh turbogeneratoryov predelnoii moshchnosti. [Conversion to rational form of equations for operation conditions problems of six phase turbine generators]. *NTV SPbGPU*. 2016. № 2. S. 16–23. DOI 10.5862/JEST.243.2 (rus)

8. Otchet B-GE-5-76 po teme «Issledovaniye slozhnykh korotkikh zamykaniy v turbogeneratorakh» [Difficult turbine generators short circuits research report] / Karagandinskiy politekhnicheskii institut. Karaganda, 1978. 166 s. (rus)

9. Voldek A.I. Elektricheskiye mashiny [Electrical machines]. Leningrad: Energiya, 1974. 840 s. (rus)

10. Jatskevich J., Pekarek S. Six-phase synchronous generator-rectifier parametric average value modeling considering operational modes. *HAIT Journal of Science and Engineering*. 2005. Vol. 2, Is.3-4. P. 365–385.

11. Singh G.K. Multi-phase induction machine drive research – a survey. *Electric Power Systems Research*. 2002. № 61. P. 139–147.

12. Lipo T.A. A d–q model for six-phase induction machine. *Proceedings on International conference. Electric machines*. Athens. Greece. 1980. P. 860–867.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS**

**ГРИШИН Николай Васильевич** – руководитель группы ОАО «Силовые машины».  
195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А..

E-mail: kostroma44@gmail.com

**GRISHIN Nikolai V.** – OJSC “Power Machines”.  
3A, Vatutina str., St.Petersburg, Russia, 195009..

E-mail: kostroma44@gmail.com