

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СИСТЕМОЙ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ В РЕЖИМЕ ФОРСИРОВКИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков
г. Челябинск, ЮУрГУ

MATHEMATICAL MODEL OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH SELF-EXCITATION SYSTEM IN THE FORCING MODE AT ASYMMETRICAL SHORT CIRCUITS IN THE POWER SYSTEM

M.E. Goldstein, K.E. Gorshkov
Chelyabinsk, SUSU

Разработана математическая модель синхронного генератора с системой самовозбуждения для анализа электромагнитных процессов в режиме форсировки при внешних несимметричных коротких замыканиях. В модели учитываются группы соединения обмоток трансформатора системы самовозбуждения, способы синхронного фазового управления тиристорным преобразователем и элементы автоматического регулятора возбуждения. Приведены результаты исследований режима форсировки блока ТГВ-200-2М.

Ключевые слова: математическая модель, короткое замыкание, синхронный генератор, система самовозбуждения, тиристорный преобразователь, система управления тиристорами.

The model considers the phase displacement group of self-excitation system, methods of synchronous phase control of thyristor rectifier, and elements of automatic exciting regulator. The research results of the generator ТГВ-200-2М forcing mode are given.

Keywords: mathematical model, short circuit, synchronous generator, self-excitation system, thyristor rectifier, rectifier control system.

В режиме форсировки синхронного генератора (СГ) при коротких замыканиях (КЗ) в энергосистеме питающие напряжения тиристорного преобразователя (ТП) системы самовозбуждения (ССВ) несимметричны по амплитуде и фазе [1]. Это приводит к неравномерному токораспределению между тиристорами и, как следствие, к росту тепловых потерь и температуры тиристорov в наиболее нагруженном плече преобразователя. В работе [2] приведены способы управления преобразователем ССВ, позволяющие выравнять длительности работы тиристорov. Для разработки алгоритмов управления и оценки их эффективности необходима математическая модель синхронного генератора, позволяющая исследовать зависимости тепловых потерь и температуры тиристорov от вида, удаленности, длительности КЗ и предшествующего режима работы синхронной машины.

В настоящее время широкое применение нашли математические модели синхронных машин, основанные на численном решении систем дифференциальных уравнений. Инвариантная запись системы уравнений Парка-Горева с уравнениями движения ротора и тиристорного преобразователя системы самовозбуждения позволяет получить модель любой степени точности и сложности. Для решения таких систем уравнений привлекаются специальные программные средства (MATLAB/Simulink, Maple и др.), что исключает применение моделей в программах, использующих системы линейных алгебраических уравнений.

В статье рассматривается математическая модель синхронного генератора с ССВ при несимметричных КЗ в энергосистеме с различными способами управления тиристорным преобразователем. В основе модели лежит приближенное реше-

ние системы дифференциальных уравнений, выполненное в аналитической форме И.А. Глебовым [3, 4]. Такой подход позволяет использовать модель в программах расчета токов КЗ и дает возможности:

- рассчитывать режимы с произвольной длительностью КЗ без привлечения типовых кривых;
- исследовать работу элементов системы самовозбуждения в режиме форсировки;
- моделировать действия секции управления и регулирования ССВ (СУР).

На рис. 1 изображена эквивалентная схема замещения прямой последовательности СГ для начального момента времени при разных видах КЗ (n). Синхронный генератор представлен сверхпереходным сопротивлением x_d'' , сопротивлением обратной последовательности x_2 , активным сопротивлением статорных обмоток r_a и ЭДС \dot{E}_Φ'' . Эквивалентное сопротивление прямой последовательности от выводов синхронного генератора до точки КЗ $x_{вн(1)}$ в соответствии с методом симметричных составляющих можно записать как сумму сопротивлений повышающего трансформатора x_T , эквивалентного сопротивления за трансформатором $x_{эв(1)}$ и добавочного сопротивления в точке КЗ $\Delta x^{(n)}$ [5]. Активное сопротивление внешней цепи учитывается сопротивлением обмоток повышающего трансформатора r_T . Трансформатор системы самовозбуждения (ТСВ) представлен активным $r_{тсв}$ и индуктивным $x_{тсв}$ сопротивлениями, а также комплексным коэффициентом трансформации $\dot{K}_{тсв} = K_{тсв} e^{\pm jN\frac{\pi}{6}}$, позволяющим учитывать группу соединения обмоток (N).

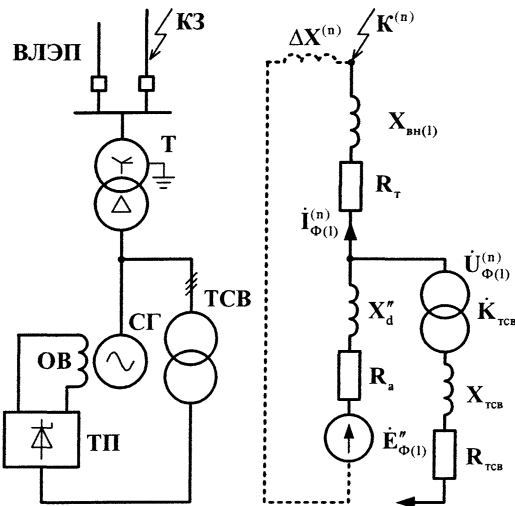


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения прямой последовательности синхронного генератора с ССВ при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

Уравнения питающих напряжений ТП ССВ. Запишем обобщенное выражение для величин и углов линейных напряжений на вводах ТП при внешнем двухфазном КЗ между фазами «А» и «В» и однофазном КЗ фазы «С» в соответствии с работой [2]:

$$\begin{cases} U_{Л}(t) = \frac{\sqrt{3}E_{\Phi(1)}''(t)}{K_{тсв}} \times \\ \times \frac{\sqrt{(x_{вн}^{(n)} + k^{(n)}x_2)^2 - 4x_{вн}^{(n)}k^{(n)}x_2 \sin^2(\alpha_{Л})}}{x_d'' + x_{вн}^{(n)}}, \\ \varphi_{Л} = \beta_{Л} + \text{arctg} \left(\frac{x_{вн}^{(n)} + k^{(n)}x_2}{x_{вн}^{(n)} - k^{(n)}x_2} \text{ctg}(\alpha_{Л}) \right), \end{cases} \quad (1)$$

где $x_{вн}^{(n)} = x_{вн(1)} + \Delta x^{(n)}$;

$$k^{(n)} = \begin{cases} 0 \text{ при } K^{(3)}, \\ -1 \text{ при } K^{(2)}, \\ -\frac{x_{вн}^{(n)} - x_{вн(1)}}{x_2 + x_{вн(1)}} \text{ при } K^{(1,1)}, \\ +1 \text{ при } K^{(1)}; \end{cases}$$

$$\alpha_{Л} = \begin{cases} (\pm N + 5) \frac{\pi}{6} \text{ для } U_{AB}, \\ (\pm N + 9) \frac{\pi}{6} \text{ для } U_{BC}, \\ (\pm N + 1) \frac{\pi}{6} \text{ для } U_{CA}; \end{cases}$$

$$\beta_{Л} = \begin{cases} 0 \text{ при } 0 \leq \alpha_{Л} \leq \pi, \\ \pi \text{ при } \pi < \alpha_{Л} < 2\pi. \end{cases}$$

Углы $\alpha_{Л}$ и $\beta_{Л}$ - величины, учитывающие группу соединения обмоток ТСВ. В выражениях запись «+N» соответствует схемам обмоток YN/Y, Д/Д и YN/Д, а запись «-N» соответствует Д/YN. Для расчета величин при других видах КЗ достаточно изменить индексы напряжений в записи $\alpha_{Л}$ в соответствии с комбинацией замкнутых фаз.

Внешняя характеристика ТП ССВ. Современные тенденции увеличения единичной мощности тиристоров и уменьшения их числа в плече преобразователя, а также применение микропроцессорных СУР привели к отказу от разработки двухгрупповых систем возбуждения при проектировании СГ и замене существующих ССВ на одногрупповые при модернизации [6]. Для преобразователей таких ССВ не характерны режимы работы с большими углами коммутации тиристоров, в связи с этим достаточно получить внешнюю характеристику ТП для режима 2-3.

Управление ТП осуществляется многоканальной или одноканальной системой синхронного фазового управления тиристорами (МСУТ,

ОСУТ) с синхронизацией по линейным напряжениям питающей сети [7]. Запишем внешнюю характеристику тиристорного преобразователя при произвольном способе синхронизации СУТ. Обозначим углы смещения управляющих импульсов СУТ относительно моментов естественной коммутации тиристоров при угле управления $\alpha_y = 0$ как

$\varepsilon_{1,4}, \varepsilon_{2,5}, \varepsilon_{3,6}$. Формулы для расчета значений величин приведены в работе [2]. Используя выражение (1), внешнюю характеристику можно привести к виду

$$U_d(I_d) = \frac{3\sqrt{6} E_{\Phi(1)}''(t) \sqrt{A^2(n, \varepsilon) + B^2(n, \varepsilon)}}{\pi K_{\text{тсв}} 3(x_d'' + x_{\text{вн}}^{(n)})} \times \cos\left(\alpha_y(t) + \arctg \frac{A(n, \varepsilon)}{B(n, \varepsilon)}\right) - \frac{3}{\pi} \left(x_\gamma + \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6}\right) r_\gamma\right) I_d, \quad (2)$$

где $A(n, \varepsilon) = \sum_{i=1}^3 \sin(\varepsilon_i) \times \sqrt{(x_{\text{вн}}^{(n)} + k^{(n)} x_2)^2 - 4x_{\text{вн}}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2(\alpha_i)}$,
 $B(n, \varepsilon) = \sum_{i=1}^3 \cos(\varepsilon_i) \times \sqrt{(x_{\text{вн}}^{(n)} + k^{(n)} x_2)^2 - 4x_{\text{вн}}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2(\alpha_i)}$,

r_γ, x_γ – активное и индуктивное сопротивление коммутации преобразователя,
 γ_{i-j} – угол коммутации при выключении i -го и включении j -го тиристоров.

Несимметрия питающих напряжений ТП может приводить к появлению режима, который не наблюдается при симметричной работе. Значительное сближение последовательных интервалов коммутации двух тиристоров в анодной и катодной группах вызывает появление угла естественного запаздывания переключения. В результате две пары тиристоров переходят в режим 3-3. Угол естественного запаздывания может, как увеличивать, так и снижать несимметрию токораспределения между тиристорами. Обозначим угол запаздывания i -го тиристора как ψ_i . Тогда действительный угол включения тиристора $\alpha_i = \alpha_y + \varepsilon_i + \psi_{i-2}$. Для уточнения внешней характеристики ТП в выражении (2) следует заменить ε_i на $\alpha_i - \alpha_y$.

Уравнения синхронного генератора с ССВ.

Для учета предшествующего режима работы СГ зададимся в относительных единицах значениями полной мощности S_0 , коэффициента мощности $\cos \varphi_0$ и действующей величины напряжения на вводах ВН повышающего трансформатора $U_{\text{вн}0}$. Тогда напряжение на выводах генератора и ток в статоре:

$$\begin{cases} U_0 = \frac{U_{\text{вн}0}}{2} + \sqrt{\left(\frac{U_{\text{вн}0}}{2}\right)^2 + S_0 \sqrt{r_t^2 + x_t^2}}, \\ I_0 = \frac{S_0}{U_0}. \end{cases} \quad (3)$$

Составляющие тока ротора в d, q -осях в предшествующем режиме:

$$\begin{cases} i_{d0} = I_0 \sin(\delta_0 - \varphi_0), \\ i_{q0} = I_0 \cos(\delta_0 - \varphi_0), \end{cases} \quad (4)$$

где $\delta_0 = -\arctg\left(\frac{I_0 x_q \cos \varphi_0}{U_0 + I_0 x_q \sin \varphi_0}\right)$.

Введем систему базисных величин напряжений (в вольтах) и токов (в амперах) для связи обмоток статора и ротора генератора:

$$\begin{cases} i_6 = \sqrt{2} I_{\text{ном}}, \\ u_6 = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{\text{ном}}. \end{cases} \quad \begin{cases} I_{\text{fxx}} = I_{\text{fxx}} x_{\text{ад}}, \\ U_{\text{f6}} = \frac{3u_6 i_6}{2I_{\text{f6}}}. \end{cases}$$

Величина ЭДС синхронного генератора и тока возбуждения в долях от базисных значений:

$$\begin{cases} E_{q0} = U_0 \cos \delta_0 - i_{d0} x_d, \\ I_{f0} = \frac{E_{q0}}{x_{\text{ад}}}. \end{cases} \quad (5)$$

Запишем систему дифференциальных уравнений синхронной машины в относительных единицах в операторной форме с учетом уравнения ТП ССВ и эквивалентного демпферного контура в продольной оси:

$$\begin{vmatrix} x_d + x_{\text{вн}}^{(n)} & x_{\text{ад}} & x_{\text{ад}} \\ r_e + x_{\text{ад}} p & r_f + r_d + x_f p & x_{\text{ад}} p \\ x_{\text{ад}} p & x_{\text{ад}} p & r_{kd} + x_{kd} p \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_d \\ I_d \\ I_{kd} \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

где $r_e = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{U_6}{U_{\text{ф6}}} \frac{\sqrt{A^2(n, \varepsilon) + B^2(n, \varepsilon)}}{3K_{\text{тсв}}} \times \cos\left(\alpha_y(t) + \arctg \frac{A(n, \varepsilon)}{B(n, \varepsilon)}\right)$,
 $r_d = \frac{3}{\pi} x_\gamma + \left(2 - 3 \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6\pi}\right) r_\gamma$,
 $x_\gamma = x_{\text{тсв}} + \frac{1}{K_{\text{тсв}}^2} \left(\frac{2}{x_d'' + x_2} + \frac{1}{x_{\text{вн}}^{(n)}}\right)^{-1} \frac{u_6 I_{\text{ф6}}}{i_6 U_{\text{ф6}}}$,

$$r_\gamma = r_{\text{тсв}} + \frac{1}{K_{\text{тсв}}^2} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_r} \right)^{-1} \frac{u_6 I_{\text{тсв}}}{i_0 U_{\text{тсв}}}$$

Значения остальных сопротивлений можно найти, применив обычные схемы замещения синхронного генератора в продольной и поперечной осях. Приближенное решение системы уравнений относительно токов i_d и I_d сводится к виду:

$$\begin{cases} i_d(t) = i'_{d0} e^{p_1 \omega t} + i''_{d0} e^{p_2 \omega t}, \\ I_f(t) = I'_{f0} e^{p_1 \omega t} + I''_{f0} e^{p_2 \omega t}. \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{где } i'_{d0} = -\frac{I_{f0} X_{ad} + i_{d0} (X_d + X_{\text{вн}}^{(1)})}{X'_d + X_{\text{вн}}^{(1)}} + i_{d0};$$

$$i''_{d0} = (I_{f0} X_{ad} + i_{d0} (X_d + X_{\text{вн}}^{(1)})) \left(\frac{1}{X'_d + X_{\text{вн}}^{(1)}} - \frac{1}{X''_d + X_{\text{вн}}^{(1)}} \right);$$

$$I'_{f0} = I_{f0} + (I_{f0} X_{ad} + i_{d0} (X_d + X_{\text{вн}}^{(1)})) \frac{X_d - X'_d}{X_{ad} (X'_d + X_{\text{вн}}^{(1)})};$$

$$I''_{f0} = (I_{f0} X_{ad} + i_{d0} (X_d + X_{\text{вн}}^{(1)})) \times \left(\frac{1}{X'_d + X_{\text{вн}}^{(1)}} \frac{(X_{kd} - X_{ad}) X_{ad}}{X_f X_{kd} - X_{ad}^2} - \frac{X_d - X'_d}{X_{ad} (X'_d + X_{\text{вн}}^{(1)})} \right);$$

$$p_1 = \frac{-(r_f + r_d) (X_d + X_{\text{вн}}^{(n)}) + r_e X_{ad}}{X'_d + X_{\text{вн}}^{(n)}} \times \left(x_f + \left(2 - 3 \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6\pi} \right) x_\gamma \right)^{-1};$$

$$p_2 = -r_{kd} \left[x_{kd} - X_{ad} + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_\sigma + X_{\text{вн}}^{(n)}} + \left(x_f + \left(2 - 3 \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6\pi} \right) x_\gamma \right)^{-1} \right)^{-1} \right].$$

Система уравнений (6) описывает процессы в статоре и роторе довольно приближенно, отсутствует уравнение движения ротора, а также не учитывается влияние поперечной оси. В первом случае при малых длительностях КЗ (0,1-0,25 с) скорость ротора можно рассматривать постоянной, при больших длительностях необходим анализ взаимного влияния электрических машин, как это делается при расчете электромеханических переходных процессов. Во втором случае влияние токов в поперечной оси можно учесть, если составить более полную систему уравнений и решить ее относительно q-оси, после чего добавить решение к формулам (7):

$$i_q(t) = i''_{q0} e^{p_3 \omega t},$$

$$\text{где } i''_{q0} = \frac{X_{aq}^2}{X_{aq}^2 - (X_q + X_{\text{вн}}^{(n)}) X_{kq}} i_{q0};$$

$$p_3 = \frac{r_{kq} (X_q + X_{\text{вн}}^{(n)})}{X_{aq}^2 - (X_q + X_{\text{вн}}^{(n)}) X_{kq}}.$$

Коэффициенты затухания составляющих токов получены путем разложения корней характеристического уравнения выражения (6) по степеням малых параметров и удержания только членов первого порядка малости. При более точном расчете можно учитывать члены второго порядка для этого достаточно умножить p_1 на $(1-A)$ и p_2 на $(1+A)$, если величины $1 \pm A$ существенно отличаются от единицы.

$$A = \left(1 - \frac{X'_{fsl}}{X_{fsl}} \right) \frac{\rho'_f}{p_2} + \left(\frac{X'_{fsl}}{X_{fsl}} \frac{(X_{kd} - X_{ad}) X_{ad}}{(X_\sigma + X_{\text{вн}}^{(n)}) X_{kd} + (X_{kd} - X_{ad}) X_{ad}} - \frac{X_{ad}}{X_d + X_{\text{вн}}^{(n)}} \right) \frac{\rho'_e}{p_2},$$

$$\text{где } x'_{fsl} = x_f + \left(2 - 3 \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6\pi} \right) x_\gamma -$$

$$\frac{(X_d - X_\sigma) X_{ad}}{X_d + X_{\text{вн}}^{(n)}},$$

$$x''_{fsl} = x_f + \left(2 - 3 \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6\pi} \right) x_\gamma - x_{ad} +$$

$$\left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_\sigma + X_{\text{вн}}^{(n)}} + \frac{1}{X_{kd} - X_{ad}} \right)^{-1},$$

$$\rho'_f = (r_f + r_d) \frac{X_d + X_{\text{вн}}^{(n)}}{X'_d + X_{\text{вн}}^{(n)}} \times$$

$$\left(x_f + \left(2 - 3 \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6\pi} \right) x_\gamma \right)^{-1},$$

$$\rho'_e = r_e \frac{X_d + X_{\text{вн}}^{(n)}}{X'_d + X_{\text{вн}}^{(n)}} \times$$

$$\left(x_f + \left(2 - 3 \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{6\pi} \right) x_\gamma \right)^{-1}.$$

Используя формулу для обобщенного вектора тока прямой последовательности генератора $i_{m(1)}(t) = \sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}$, находим мгновенные значения периодических фазных токов в статоре:

$$\begin{cases} i_A(t) = -\left(\cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) + k^{(n)} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})\right) i_{m(1)}(t), \\ i_B(t) = -\left(\cos(\omega t + \frac{5\pi}{6}) + k^{(n)} \cos(\omega t - \frac{5\pi}{6})\right) i_{m(1)}(t), \\ i_C(t) = -\left(\cos(\omega t + \frac{\pi}{6}) + k^{(n)} \cos(\omega t - \frac{\pi}{6})\right) i_{m(1)}(t). \end{cases}$$

Расчет углов коммутации тиристорov в выражении (7) следует выполнять рекуррентно, разбивая ось времени на интервалы малой длины. Такой прием используется повсеместно в программах расчета токов короткого замыкания при произвольной длительности КЗ:

$$\gamma_{i-j}(t) = \arccos \left(\cos \alpha_j - \frac{2I_f(t) \sqrt{r_\gamma^2 + x_\gamma^2} U_{фб}}{\sqrt{2} U_{Л}(t) u_\phi} \right) - \alpha_j. \quad (8)$$

Для перерасчета питающих напряжений ТП $U_{Л}(t)$ можно использовать выражение (1), если в него подставить равенство $E_{Ф(1)}''(t) / (x_d'' + x_{вн}^{(n)}) = i_{m(1)}(t)$.

Наконец, зная величины основных составляющих токов обмоток генератора, несложно рассчитать среднее значение напряжения на обмотке возбуждения:

$$U_f(t) = r_e i_{m(1)}(t) - \left(r_d + \left(2 - \frac{\gamma_{1-3} + \gamma_{3-5} + \gamma_{5-1}}{2\pi} \right) x_\gamma \right) I_f(t).$$

Рассмотренных выше уравнений достаточно для исследований и других параметров синхронного генератора и системы возбуждения. Используя выражение (1), можно найти напряжения на выводах СГ, а также построить диаграммы мгновенных значений напряжений на элементах ТП и его выпрямленного напряжения. Диаграмму токов тиристорov можно получить, если, используя выражения (8), записать уравнения коммутаций. Для перехода от относительных единиц к именованным значениям следует умножить токи и напряжения на одноименные базисные величины.

Введение в модель элементов СУР. Основным элементом управления режимом синхронного генератора является автоматический регулятор возбуждения (АРВ). Рассмотрим простейший вариант АРВ с ПИ-регулятором и каналом регулирования по напряжению на выводах генератора [8].

Напряжение на входе регулятора

$$U_g(t) = \left(\sqrt{(x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} x_2)^2 - 4x_{вн}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2\left(\frac{5\pi}{6}\right)} + \sqrt{(x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} x_2)^2 - 4x_{вн}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2\left(\frac{3\pi}{2}\right)} + \sqrt{(x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} x_2)^2 - 4x_{вн}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2\left(\frac{\pi}{6}\right)} \right) \frac{i_{m(1)}(t)}{3}.$$

Сигнал управления, передаваемый в СУТ:

$$\alpha_y = \arccos \left(\Delta U_{уст} k_{y1} + k_{y2} \sum_{i=1}^n \Delta U_{уст i} k_{y1} \Delta t_i \right),$$

где $\Delta U_{уст} = U_{уст} - U_g$;

k_{y1}, k_{y2} – коэффициенты усиления.

Величину уставки представим таким образом, чтобы при снижении напряжения на выводах СГ ниже 85% появлялся режим форсировки:

$$U_{уст} = \begin{cases} U_0, & \text{если } U_g > 0,85, \\ 2,5, & \text{если } U_g \leq 0,85. \end{cases}$$

В установленном режиме форсировки предельная допустимая величина тока возбуждения ограничивается двойным номинальным значением. Для этого предусмотрен блок ограничения тока ротора БОР-21. Сигнал управления, формируемый блоком:

$$\alpha_y = \arccos \left(\Delta I_{уст} k_{y3} + k_{y2} \sum_{i=1}^n \Delta I_{уст i} k_{y3} \Delta t_i \right),$$

где $\Delta I_{уст} = 2,0 - I_f$;

k_{y3} – коэффициент усиления по току ротора.

Условием вступления в работу БОР-21 является превышение током возбуждения двойного номинального значения $I_f > 2I_{фном}$. При соотношении сигналов $\Delta U_{уст} < \Delta I_{уст}$ управление возвращается к регулятору напряжения. Величины коэффициентов усиления пропорциональных звеньев в большинстве случаев можно принять равными 50 о.е. Для дифференциального звена величина коэффициента определяется индивидуальной настройкой.

Исследование режима форсировки блока 200 МВт. В соответствии с изложенной методикой был выполнен расчет переходного процесса для блока турбогенератор ТГВ-200-2М с повышающим трансформатором ТДЦ-250000/110/15,75. Номинальные данные и параметры генератора: $P_{ном} = 220$ МВт, $U_{ном} = 15,75$ кВ, $I_{ном} = 9490$ А, $\cos \phi_{ном} = 0,85$, $U_{фном} = 450$ В, $I_{фном} = 2015$ А, $I_{фхх} = 706$ А, $x_d = 2,090$, $x_d' = 0,357$, $x_d'' = 0,233$, $x_d - x_{ад} = 0,213$, $x_2 = 0,285$, $T_{d0}' = 6,480$ с, $T_d' = 1,096$ с, $T_d'' = 0,137$ с, $T_a = 0,326$ с. Параметры обмоток блочного трансформатора: $u_{кв-н} = 11,3$ % и $P_k = 651$ кВт. Генератор оснащен тиристорной системой самовозбуждения с трансформатором Ун/Д-11 с параметрами: $S_{ном} = 3,6$ МВ·А, $U_{нн} = 902$ В, $u_{кв-н} = 7,24$ % и $P_k = 33$ кВт.

Исследования проводились для режима несимметричного КЗ на отходящей линии электропередач. Удаленность точки КЗ от вводов повышающего трансформатора задавалась как отношение $\lambda = x_{экв.(1)} / x_T$. Для линии электропередач

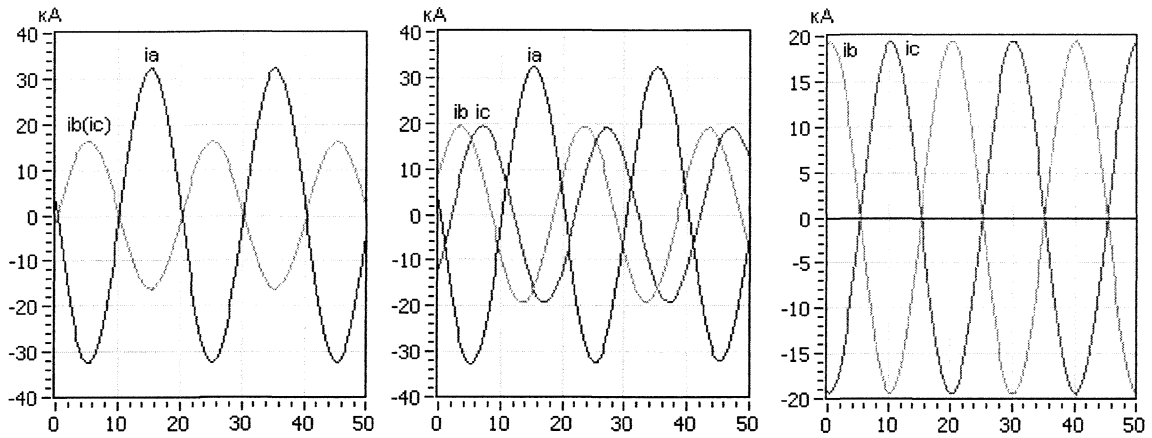


Рис. 2. Периодические токи в статоре синхронного генератора в начале форсировки при двухфазном, двухфазном на землю и однофазном КЗ ($\lambda=1,0$)

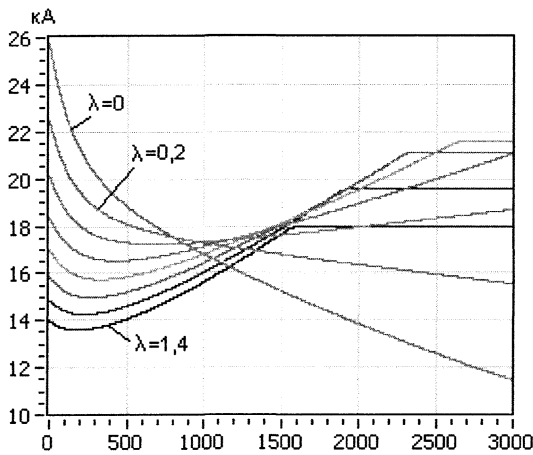


Рис. 3. Действующее значение обобщенного вектора тока прямой последовательности $i_{m(t)}(t)$

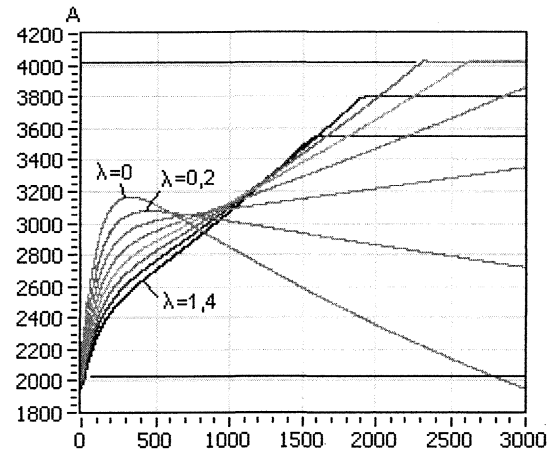


Рис. 4. Среднее значение выпрямленного тока обмотки возбуждения $I_r(t)$

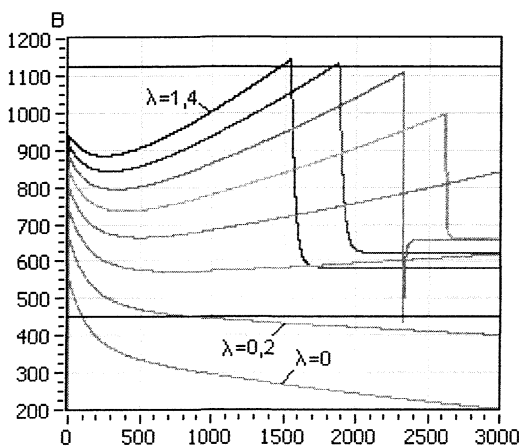


Рис. 5. Среднее значение выпрямленного напряжения на обмотке возбуждения $U_f(t)$

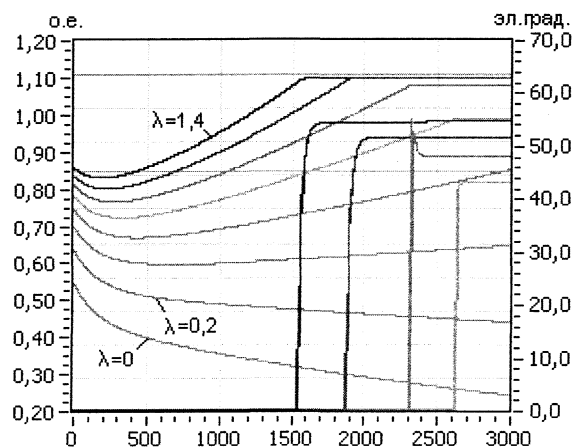


Рис. 6. Напряжение на входе регулятора возбуждения $U_g(t)$ и угол управления $\alpha_f(t)$ на выходе

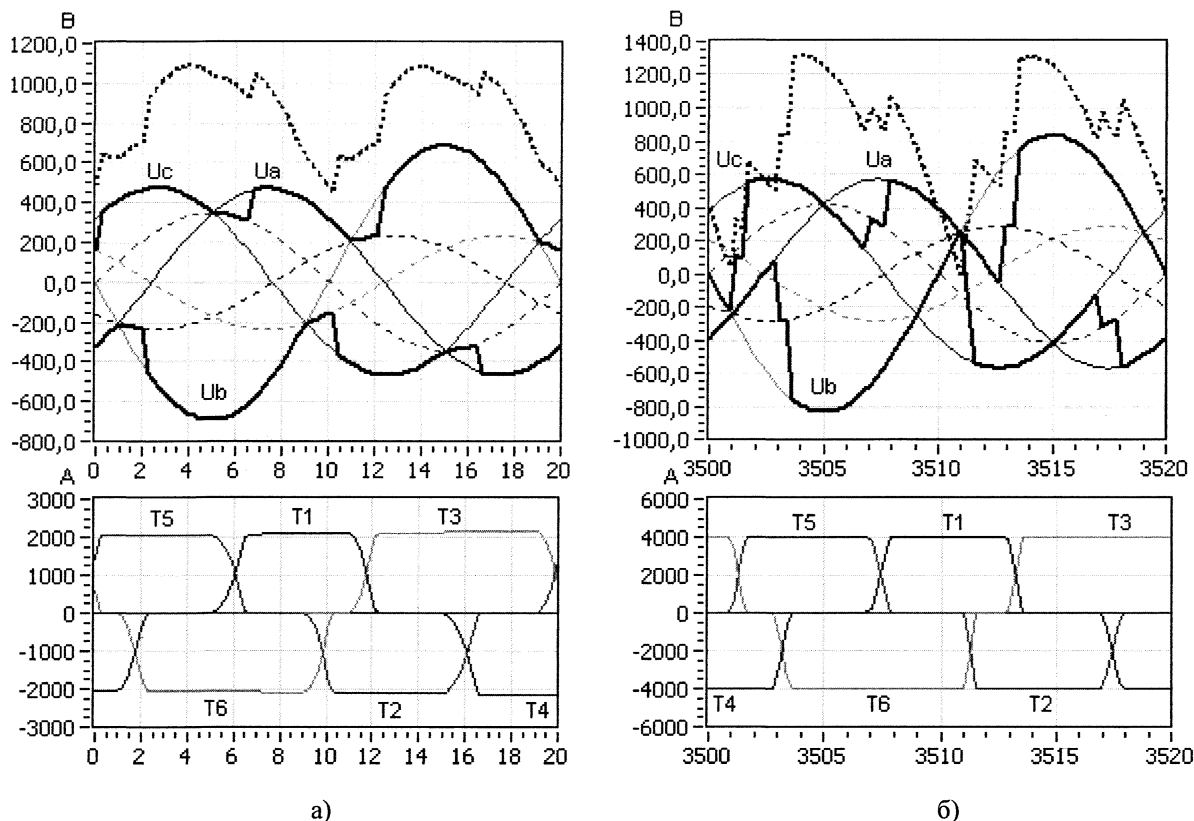


Рис. 7. Диаграммы напряжений и токов элементов тиристорного преобразователя при двухфазном на землю КЗ ($\lambda=0,6$) в начале (а) и в установившемся режиме форсировки (б)

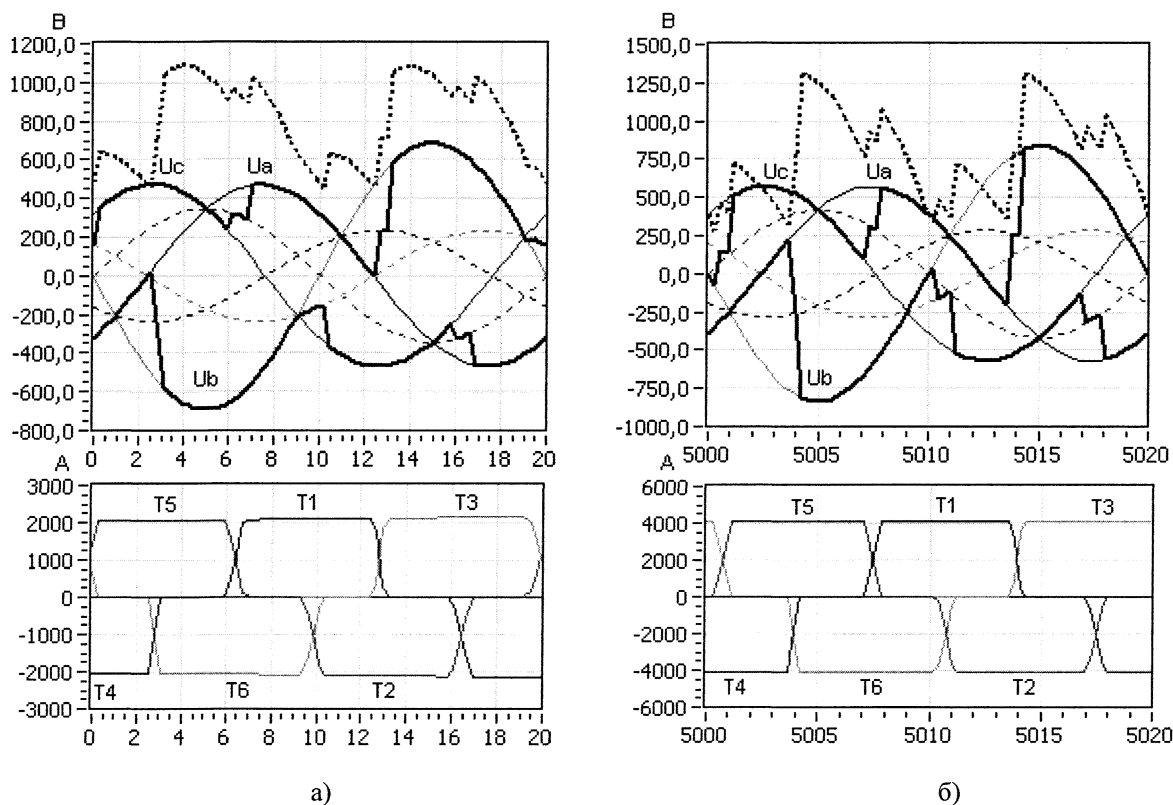


Рис. 8. Диаграммы напряжений и токов элементов тиристорного преобразователя при двухфазном на землю КЗ ($\lambda=0,6$) при использовании ОСУТ с синхронизацией по напряжению U_c (U_{bc})

отношение индуктивных сопротивлений нулевой и прямой последовательности принималось равным трем. В предшествующем режиме синхронный генератор работал с параметрами: $S_0=1$, $U_0=1,1$, $\cos \varphi_0 = 0,85$. В соответствии с выражениями (4) и (5) легко найти $I_0=0,9$ и $I_{f0}=0,93$.

На рис. 2 приведены кривые периодических фазных токов статора генератора при разных видах КЗ в одной и той же точке. Отдельный интерес представляет влияние на режим форсировки удаленности точки КЗ. Для этого были выполнены расчеты с $\lambda=[0, 0,2, \dots, 1,4]$, полученные кривые изображены на рис. 3-6. Исследуя характер изменения кривых, можно выявить границу зоны лавинообразного снижения напряжения на выводах генератора. В данном случае $0,2 < \lambda_n < 0,4$ для двухфазного на землю КЗ.

На рис. 7 и 8 показаны диаграммы токов и напряжений элементов ТП ССВ. В первом случае для МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям питающей сети, во втором случае для ОСУТ с синхронизацией по напряжению U_c (УВС). Из графиков видно, что способ управления тиристорами оказывает влияние на величину выпрямленного напряжения, а также на равномерность распределения длительностей работы тиристоров.

Выводы. Таким образом, рассмотренная математическая модель синхронного генератора с системой самовозбуждения может быть полезна:

1. В программах расчета токов короткого замыкания для точного расчета при малых длительностях КЗ и приближенного при больших.

2. Для исследования влияния вида, удаленности и длительности КЗ на работу элементов системы самовозбуждения без привлечения специальных программ математического моделирования.

3. При изучении вопросов эффективного управления режимами работы синхронного гене-

ратора, предотвращения лавинного снижения напряжения на его выводах.

Литература

1. Гольдштейн, М.Е. Исследование работы системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2008. - Вып. 10. - № 26(126). - С. 36-41.
2. Гольдштейн, М.Е. Токораспределение между тиристорами в преобразователе системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2009. - Вып. 11. - № 15. - С. 10-16.
3. Глебов, И.А. Системы возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями / И. А. Глебов. - М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. - 335 с.
4. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов. - Л.: Наука, 1987. - 344 с.
5. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б. Н Неклепаева. - М.; Изд-во НИ ЭНАС, 2002. - 152 с.
6. Логинов, А.Г. Системы возбуждения турбо- и гидрогенераторов ОАО «Электросила» / А.Г. Логинов // Электротехника. - 2003. - № 5. - С. 43-48.
7. Писарев, А.Л. Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления) / А.Л. Писарев, Л.П. Деткин. — М.; Энергия, 1975. - 264 с.
8. СО 34.45.629-2002. Методические указания по техническому обслуживанию микропроцессорных АРВ и систем управления силовых преобразователей систем возбуждения генераторов. — М.: СПО ОРГРЭС, 2003.

Поступила в редакцию 10.09.2009 г.

Гольдштейн Михаил Ефимович, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, профессор. Научные интересы связаны с развитием систем электроэнергетики с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Goldstein Michail Efimovich. Head of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: power electronic systems, development of synchronous generator excitation systems, engineering education.

Горшков Константин Евгеньевич, аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. Окончил ЮУрГУ в 2006 г. по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Gorshkov Konstantin Evgenievich. Graduated from South Ural State University in the field of study "Relay protection and automation of electrical power systems". Post-graduate student of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University. Scientific interests: modeling and simulation of power electronics systems, synchronous generator excitation systems, transition processes.