

УДК 621.313.333

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-34-39

## Моделирование переходных процессов синхронной машины с несимметрией фазных обмоток статора

Г.В. Глазырин

Рассмотрены переходные процессы синхронной машины с неодинаковыми индуктивностями и активными сопротивлениями фазных обмоток статора. Появление такой несимметрии возможно при повреждении синхронной машины, в частности, при межвитковых коротких замыканиях в обмотке статора. Предполагается использование результатов расчетов переходных процессов поврежденной синхронной машины для анализа работы и создания новых алгоритмов релейной защиты генераторов электростанций.

Предложен метод численного моделирования переходных процессов синхронной машины с несимметричной обмоткой статора. Метод основан на непосредственном решении дифференциальных уравнений равновесия ЭДС и падений напряжений в обмотках в фазных координатах совместно с уравнением движения ротора. При этом контур каждой фазной обмотки статора описан отдельным уравнением, и могут быть учтены отличающиеся параметры фаз.

Разработана и реализована на языке программирования C++ математическая модель синхронного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку в сети с нулевым проводом, не имеющим сопротивления. Использование подобной схемы позволяет упростить математические выкладки, так как в ней отсутствуют связи между фазными контурами вне синхронной машины. В модели учтен один из возможных видов несимметрии — неодинаковое число витков в фазных обмотках, что позволяет моделировать межвитковые короткие замыкания без учета появления дополнительных короткозамкнутых контуров.

Выполнена верификация модели путем сравнения результатов расчета переходных процессов генератора с симметричной обмоткой статора, полученных при использовании разработанной модели и с помощью средств MATLAB Simulink. Проведен анализ результатов моделирования для случая внезапного межвиткового замыкания в обмотке статора гидрогенератора. Полученные результаты позволили сделать вывод об адекватности разработанной модели.

*Ключевые слова:* синхронная машина, переходный процесс, электроэнергетическая система, дифференциальные уравнения, численный метод.

*Для цитирования:* Глазырин Г.В. Моделирование переходных процессов синхронной машины с несимметрией фазных обмоток статора // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 34—39. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-34-39.

## Simulation of Transients in a Synchronous Machine Having Asymmetry in the Stator Phase Windings

G.V. Glazyrin

Transients occurring in a synchronous machine with unequal inductances and resistances of its stator windings are considered. Synchronous machine failures like a turn-to-turn short-circuit fault in the stator winding may give rise to such asymmetry. The results obtained from calculating the transients in a damaged synchronous machine are supposed to be used for analyzing the operation of and elaborating new algorithms for relay protection of power plant generators.

A method for numerically simulating the transients in a synchronous machine with asymmetrical stator phase windings is proposed. The essence of the method consists in directly solving the differential equations describing the balance of the EMFs and voltage drops across the windings in the phase coordinates together with the rotor motion equation. In so doing, the circuit of each stator phase winding is described by a separate equation, and differences in the parameters of the phases can be taken into account.

The mathematical model of a synchronous generator operating on a resistive-inductive load in a network with a zero-impedance neutral conductor is developed and implemented in the C++ programming language. The use of such configuration allows the analysis mathematics to be simplified, since there is no coupling between the phase loops outside the synchronous machine windings. The model takes into account an unequal number of turns in the phase windings as one of possible kinds of asymmetry, a feature that opens the possibility to simulate turn-to-short circuit faults without the need to consider the occurrence of additional short-circuited loops.

The model has been verified by comparing the transients calculated for a generator with symmetrical stator windings by using the developed model and by means of the MATLAB Simulink software tools. The data obtained from simulating the transients triggered by a sudden turn-to-turn short circuit fault in a hydro generator's stator winding were analyzed, and a conclusion has been drawn from the analysis results that the developed model adequately simulates the processes of interest.

*Key words:* synchronous machine, transient, power grid, differential equations, numerical method.

*For citation:* Glazyrin G.V. Simulation of Transients in a Synchronous Machine Having Asymmetry in the Stator Phase Windings. MPEI Vestnik. 2017; 5:34—39. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-34-39.

При практических расчетах переходных процессов в электроэнергетических системах обычно принимаются следующие допущения относительно параметров синхронных машин [1].

1. Вместо действительных кривых распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по расточке статора учитываются только их составляющие первой гармоники.

2. Предполагается, что потери в магнитной системе машины отсутствуют.

3. Учитывается только одна продольная и одна или две поперечные эквивалентные демпферные обмотки.

4. Считается, что конструктивное выполнение машины обеспечивает полную симметрию фазных обмоток статора; ротор также симметричен относительно своих продольной и поперечной осей.

В большинстве практических случаев они не приводят к значительной погрешности в расчетах.

С точки зрения анализа работы и создания новых алгоритмов релейной защиты генераторов электростанций представляет интерес расчет переходных процессов поврежденной синхронной машины, в частности, при витковых коротких замыканиях в обмотке статора. В этом случае нарушается симметрия фазных обмоток, и методы расчета, в основе которых лежит четвертое допущение, неприменимы.

Современные компьютерные программы моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах, такие как MATLAB Simulink [2], PSCAD, Mustang, используют для описания электромагнитных процессов синхронной машины уравнения Горева – Парка [1], которые записываются в неподвижной относительно ротора системе координат и предполагают полную симметрию фазных обмоток статора. Очевидно, что такой метод моделирования не может быть применен для расчета процессов в поврежденной синхронной машине с отличающимися параметрами фазных обмоток.

Целью работы является создание математической модели синхронной машины, позволяющей учитывать несимметрию фазных обмоток статора.

Для достижения цели был разработан метод численного моделирования переходных процессов синхронной машины с несимметричной обмоткой статора, реализована и верифицирована путем сравнения рассчитанных переходных процессов с результатами, полученными в MATLAB Simulink, математическая модель.

### Основная идея предложенного метода

Переходные процессы синхронной машины с несимметричной обмоткой статора могут быть рассчитаны путем непосредственного решения дифференциальных уравнений равновесия электродвижущей силы (ЭДС) и падений напряжений в обмотках [1, 2] без перехода к системе координат, неподвижной относительно ротора. В этом случае контур каждой фазной обмотки статора описывается отдельным уравнением, и могут быть учтены отличающиеся параметры фаз.

### Вывод системы дифференциальных уравнений

Для упрощения математических выкладок взят синхронный генератор, работающий на автономную активно-индуктивную нагрузку, подключенную по схеме «звезда» с нулевым проводом, не имеющим сопротивления (рис. 1).

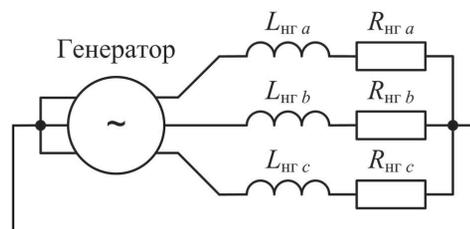


Рис. 1. Схема подключения нагрузки

В этом случае система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы, принимает вид

$$\begin{cases} \frac{d\psi_\eta}{dt} = -L_{нr,\eta} \frac{di_\eta}{dt} - (R_\eta + R_{нr,\eta})i_\eta & (\eta = a, b, c); \\ \frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f i_f; \\ \frac{d\psi_{yd}}{dt} = -R_{yd} i_{yd}; \\ \frac{d\psi_{yq}}{dt} = -R_{yq} i_{yq}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\psi_\eta, \psi_f, \psi_{yd}, \psi_{yq}$  — результирующие потокосцепления фазных обмоток, обмотки возбуждения, продольной и поперечной демпферных обмоток соответственно;  $i_\eta, i_f, i_{yd}, i_{yq}$  — мгновенные значения токов в обмотках;  $R_\eta, R_f, R_{yd}, R_{yq}$  — активные сопротивления обмоток;  $L_{нr,\eta}, R_{нr,\eta}$  — индуктивность и активное сопротивление нагрузки в фазах.

В [1, 2] приведены уравнения, связывающие потокосцепления  $\psi_\eta$  и  $\psi_f$  с токами в обмотках, для синхронной машины без демпферных обмоток. Если учесть одну продольную и одну поперечную демпферные обмотки, получим систему из шести уравнений, описывающую связь потокосцеплений и токов:

$$\begin{cases} \psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M_{af} i_f + M_{ayd} i_{yd} + M_{ayq} i_{yq}; \\ \psi_b = M_{ab} i_a + L_b i_b + M_{bc} i_c + M_{bf} i_f + M_{byd} i_{yd} + M_{byq} i_{yq}; \\ \psi_c = M_{ac} i_a + M_{bc} i_b + L_c i_c + M_{cf} i_f + M_{cyd} i_{yd} + M_{cyq} i_{yq}; \\ \psi_f = M_{af} i_a + M_{bf} i_b + M_{cf} i_c + L_f i_f + M_{fyd} i_{yd}; \\ \psi_{yd} = M_{ayd} i_a + M_{byd} i_b + M_{cyd} i_c + M_{fyd} i_f + L_{yd} i_{yd}; \\ \psi_{yq} = M_{ayq} i_a + M_{byq} i_b + M_{cyq} i_c + L_{yq} i_{yq}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_a, L_b, L_c, L_f, L_{yd}, L_{yq}$  — собственные индуктивности фазных обмоток, обмотки возбуждения, продольной и поперечной демпферных обмоток соответственно;  $M$  — взаимная индуктивность обмоток.

Большинство индуктивностей, входящих в (2), являются функциями угла поворота ротора  $\gamma$ . Для синхронной машины, фазные обмотки которой симметричны, данные индуктивности могут быть определены по формулам, приведенным в [3]. В случае повреждения синхронной машины эти параметры могут существенно отличаться от своих «нормальных» значений, причем возможно появление дополнительных контуров (например, при витковых замыканиях). В рамках настоящей статьи рассмотрен только один из возможных случаев неисправности — уменьшенное число витков в фазной обмотке статора, тем самым моделируется витковое короткое замыкание без учета появления дополнительных короткозамкнутых контуров. Отношение числа витков в обмотке к числу витков в исправном состоянии обозначим  $k_{\eta}$ ,  $\eta = a, b, c$ .

Учитывая, что взаимные индуктивности обмотки пропорциональны числу витков в ней, а собственная индуктивность — квадрату числа витков, получим выражения для определения индуктивностей, входящих в (2):

$$\begin{cases} L_a = k_{wa}^2 \{l_0 + l_2 \cos 2\gamma\}; \\ L_b = k_{wb}^2 \{l_0 + l_2 \cos[2(\gamma - 120^\circ)]\}; \\ L_c = k_{wc}^2 \{l_0 + l_2 \cos[2(\gamma + 120^\circ)]\}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} M_{ab} = k_{wa}k_{wb} \{m_0 + m_2 \cos[2(\gamma - 60^\circ)]\}; \\ M_{bc} = k_{wb}k_{wc} \{m_0 + m_2 \cos[2(\gamma - 180^\circ)]\}; \\ M_{ac} = k_{wa}k_{wc} \{m_0 + m_2 \cos[2(\gamma + 60^\circ)]\}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} M_{af} = M_{ayd} = k_{wa}m_d \cos \gamma; \\ M_{bf} = M_{byd} = k_{wb}m_d \cos(\gamma - 120^\circ); \\ M_{cf} = M_{cyd} = k_{wc}m_d \cos(\gamma + 120^\circ); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} M_{ayq} = k_{wa}m_q \cos(\gamma - 90^\circ); \\ M_{byq} = k_{wb}m_q \cos(\gamma + 150^\circ); \\ M_{cyq} = k_{wc}m_q \cos(\gamma + 30^\circ); \end{cases} \quad (6)$$

где  $l_0, l_2, m_0, m_2, m_d, m_q$  — постоянные, определяемые из паспортных данных синхронной машины [3].

Для решения системы уравнений (1) необходимо свести ее к такому виду, чтобы в уравнения в качестве переменных входили только токи в обмотках, их производные по времени, угол поворота ротора и частота. Для этого из (2) определим производные потокоцеплений по времени, используя формулу производной сложной функции

$$\frac{d\psi_k}{dt} = \frac{\partial\psi_k}{\partial\gamma} \frac{d\gamma}{dt} + \sum_m \frac{\partial\psi_m}{\partial i_m} \frac{di_m}{dt} \quad (k, m = a, b, c, f, yd, yq),$$

и подставим полученные выражения в (1). Получаемые при этом формулы весьма громоздки, поэтому рассмотрим только одно уравнение для контура фазы  $A$  обмотки статора:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial\psi_a}{\partial\gamma} \omega + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + \\ & + M_{af} \frac{di_f}{dt} + M_{ayd} \frac{di_{yd}}{dt} + M_{ayq} \frac{di_{yq}}{dt} = \\ & = -L_{\text{нр.}a} \frac{di_a}{dt} - (R_a + R_{\text{нр.}a}) i_a. \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения для остальных контуров могут быть получены тем же способом.

Частную производную потокоцепления по углу, входящую в (7), выразим из (2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial\psi_a}{\partial\gamma} &= \frac{dL_a}{d\gamma} i_a + \frac{dM_{ab}}{d\gamma} i_b + \frac{dM_{ac}}{d\gamma} i_c + \\ & + \frac{dM_{af}}{d\gamma} i_f + \frac{dM_{ayd}}{d\gamma} i_{yd} + \frac{dM_{ayq}}{d\gamma} i_{yq}. \end{aligned} \quad (8)$$

Производные индуктивностей по углу, входящие в правую часть (8), можно определить из (3) — (6):

$$\frac{dL_a}{d\gamma} = -2k_{wa}^2 l_2 \sin 2\gamma; \quad (9)$$

$$\frac{dM_{ab}}{d\gamma} = -2k_{wa}k_{wb} m_2 \sin[2(\gamma - 60^\circ)]; \quad (10)$$

$$\frac{dM_{ac}}{d\gamma} = -2k_{wa}k_{wc} m_2 \sin[2(\gamma + 60^\circ)]; \quad (11)$$

$$\frac{dM_{af}}{d\gamma} = \frac{dM_{ayd}}{d\gamma} = -k_{wa} m_d \sin \gamma; \quad (12)$$

$$\frac{dM_{ayq}}{d\gamma} = -k_{wa} m_q \sin(\gamma - 90^\circ). \quad (13)$$

Таким образом, при подстановке (8) в (7) получим уравнение, связывающее функции времени (токи в обмотках и угол поворота ротора) и их производные.

При анализе всех контуров синхронной машины вместо одного уравнения (7) получим следующую систему уравнений в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} L_{a\Sigma} & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{ayd} & M_{ayq} \\ M_{ab} & L_{b\Sigma} & M_{bc} & M_{bf} & M_{byd} & M_{byq} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{c\Sigma} & M_{cf} & M_{cyd} & M_{cyq} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f & M_{fyd} & 0 \\ M_{ayd} & M_{byd} & M_{cyd} & M_{fyd} & L_{yd} & 0 \\ M_{ayq} & M_{byq} & M_{cyq} & 0 & 0 & L_{yq} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \\ \frac{di_f}{dt} \\ \frac{di_{yd}}{dt} \\ \frac{di_{yq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\partial\psi_a/\partial\gamma)\omega - R_{a\Sigma} i_a \\ -(\partial\psi_b/\partial\gamma)\omega - R_{b\Sigma} i_b \\ -(\partial\psi_c/\partial\gamma)\omega - R_{c\Sigma} i_c \\ -(\partial\psi_f/\partial\gamma)\omega - R_f i_f + u_f \\ -(\partial\psi_{yd}/\partial\gamma)\omega - R_{yd} i_{yd} \\ -(\partial\psi_{yq}/\partial\gamma)\omega - R_{yq} i_{yq} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где  $L_{\eta\Sigma} = L_\eta + L_{\text{нр.}\eta}$ ;  $R_{\eta\Sigma} = R_\eta + R_{\text{нр.}\eta}$ ,  $\eta = a, b, c$ .

Система уравнений (14) позволяет определять производные токов в обмотках по известным значениям функций (токов, угла поворота ротора и частоты). Для описания электромеханических процессов синхронной машины в рассматриваемом случае удобно использовать дифференциальное уравнение движения ротора в форме д'Аламбера [3]

$$M_T - J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\partial W_M}{\partial\gamma} = 0, \quad (15)$$

где  $M_T$ ,  $J$  — моменты турбины и инерции ротора;  $W_m$  — энергия магнитных полей машины, которая определяется по формуле [3]:

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_k i_k \Psi_k \quad (k = a, b, c, f, yd, yq). \quad (16)$$

После подстановки (16) в (15) и преобразований получим следующее выражение для расчета производной частоты по известным значениям функций

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_T}{J\omega} + \frac{1}{2J} \times \left( i_a \frac{\partial \Psi_a}{\partial \gamma} + i_b \frac{\partial \Psi_b}{\partial \gamma} + i_c \frac{\partial \Psi_c}{\partial \gamma} + i_f \frac{\partial \Psi_f}{\partial \gamma} + i_{yd} \frac{\partial \Psi_{yd}}{\partial \gamma} + i_{yq} \frac{\partial \Psi_{yq}}{\partial \gamma} \right), \quad (17)$$

где  $P_T$  — мощность турбины.

Частные производные потокосцеплений по углу, полученные в (17), входят также в систему уравнений (14). Для получения полной системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы синхронной машины, необходимо (14) и (17) дополнить связью между угловой частотой и углом поворота ротора:

$$d\gamma/dt = \omega. \quad (18)$$

### Алгоритм расчета производных при численном решении системы дифференциальных уравнений

Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (разностными методами) требует расчета производных функций по известным значениям самих функций на каждом шаге интегрирования [4, 5]. Для этого система обычно представляется в форме Коши. В рассматриваемом случае уравнения (17), (18) содержат по одной производной в левой части, в то время как оставшиеся уравнения заданы в матричном виде (14), причем разделение переменных затруднительно из-за большого порядка матриц.

Кроме того, указанные уравнения имеют переменные коэффициенты, зависящие от угла поворота ротора  $\gamma$ . В результате требуется пересчет большинства коэффициентов на каждом шаге интегрирования, и представление (14) в явной форме Коши не обеспечивает существенного снижения объема вычислений.

Для расчета значений производных  $\frac{di_a}{dt}$ ,  $\frac{di_b}{dt}$ ,  $\frac{di_c}{dt}$ ,  $\frac{di_f}{dt}$ ,  $\frac{di_{yd}}{dt}$ ,  $\frac{di_{yq}}{dt}$ ,  $\frac{d\omega}{dt}$ ,  $\frac{d\gamma}{dt}$  по известным значениям функций  $i_a, i_b, i_c, i_f, i_{yd}, i_{yq}, \omega, \gamma$  в заданный момент времени использован следующий алгоритм.

1. Определение индуктивностей обмоток по (3) — (6).  
2. Расчет производных индуктивностей по углу с помощью (9) — (13).

3. Вычисление производных потокосцеплений по углу по (8) и аналогичным формулам для других обмоток.

4. Нахождение значений производных  $\frac{di_a}{dt}$ ,  $\frac{di_b}{dt}$ ,  $\frac{di_c}{dt}$ ,  $\frac{di_f}{dt}$ ,  $\frac{di_{yd}}{dt}$ ,  $\frac{di_{yq}}{dt}$  численным решением системы линейных алгебраических уравнений (14).

5. Расчет  $\frac{d\omega}{dt}$ ,  $\frac{d\gamma}{dt}$  по формулам (17), (18).

### Реализация модели синхронного генератора

Первоначально для реализации предложенной математической модели синхронного генератора разрабатывалась программа в среде MATLAB. Для увеличения скорости расчета окончательный вариант программно-го обеспечения реализован на языке C++.

Для решения системы дифференциальных уравнений использован метод Рунге – Кутты – Фельберга [4] с переменной длиной шага. Определение числовых значений производных токов по времени на каждом шаге интегрирования (п. 4 алгоритма) проводилось решением системы линейных алгебраических уравнений (14) методом прогонки [5].

### Верификация разработанной модели

Для проверки разработанной модели выполнены тестовые расчеты переходных процессов генератора СВ-1343/140-96 УХЛ4 с полной симметрией фазных обмоток статора и следующими параметрами:  $S_{ном} = 76,5$  МВ·А;  $U_{ном} = 13,8$  кВ;  $f_{ном} = 50$  Гц;  $x_d = 0,755$ ;  $x'_d = 0,308$ ;  $x''_d = 0,214$ ;  $x_q = 0,527$ ;  $x'_q = 0,219$ ;  $x''_q = 0,15$ ;  $T'_d = 1,78$  с;  $T''_d = 0,029$  с;  $T''_q = 0,029$  с; активное сопротивление обмотки статора  $R_s = 0,00953$  Ом.

Рассмотрен переходный процесс при трехфазном коротком замыкании на землю на выводах генератора, работающего на холостом ходу с номинальным напряжением на выводах обмотки статора. Результаты расчетов в среде MATLAB Simulink и с помощью разработанной модели приведены на рис. 2, 3.

Анализ расчетных зависимостей показал, что результаты, полученные с помощью разработанной модели, идентичны результатам расчетов в MATLAB Simulink. При этом время, затраченное на расчет в MATLAB Simulink, приблизительно в 10 раз больше.

### Переходный процесс при внезапном межвитковом замыкании

На рис. 4 показан результат расчета переходного процесса при внезапном межвитковом замыкании в обмотке статора генератора СВ-1343/140-96 УХЛ4, приводящем к уменьшению числа витков в фазе А в 2 раза ( $k_{wa} = 0,5$ ;  $k_{wb} = k_{wc} = 1$ ). В исходном режиме генератор работает с номинальной активной (65 МВт) и реактивной (40,3 Мвар) мощностями и номинальным напряжением на линейных выводах.

В результате повреждения напряжение и ток фазы А уменьшаются приблизительно в 2 раза, а напряжения и токи здоровых фаз несколько возрастают из-за ослабления реакции статора. В поврежденном генераторе наблюдаются колебания тока возбуждения небольшой амплитуды из-за несимметрии магнитных потоков, создаваемых токами в фазных обмотках статора.

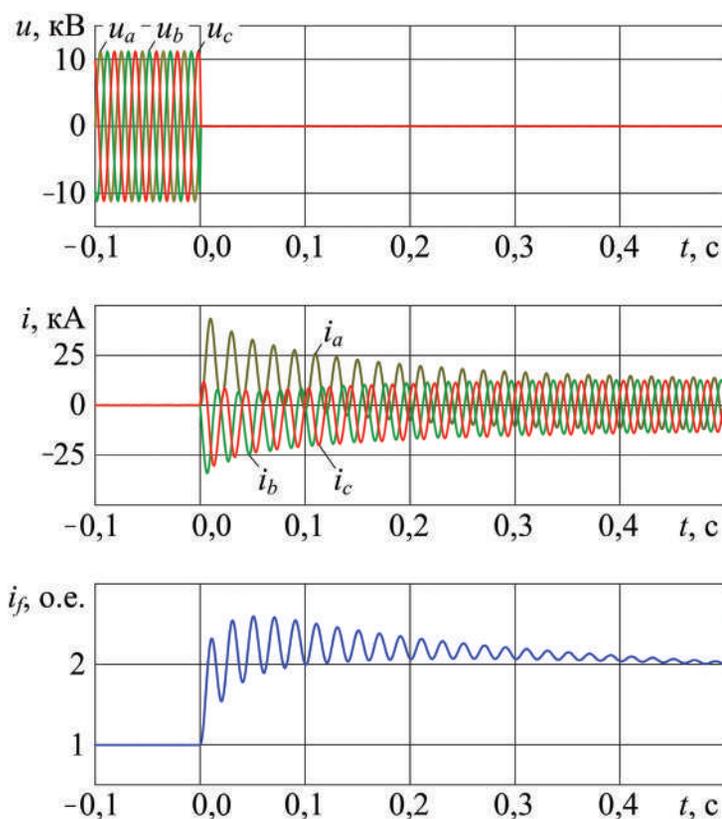


Рис. 2. Результат расчета переходного процесса при коротком замыкании на выводах генератора в MATLAB Simulink

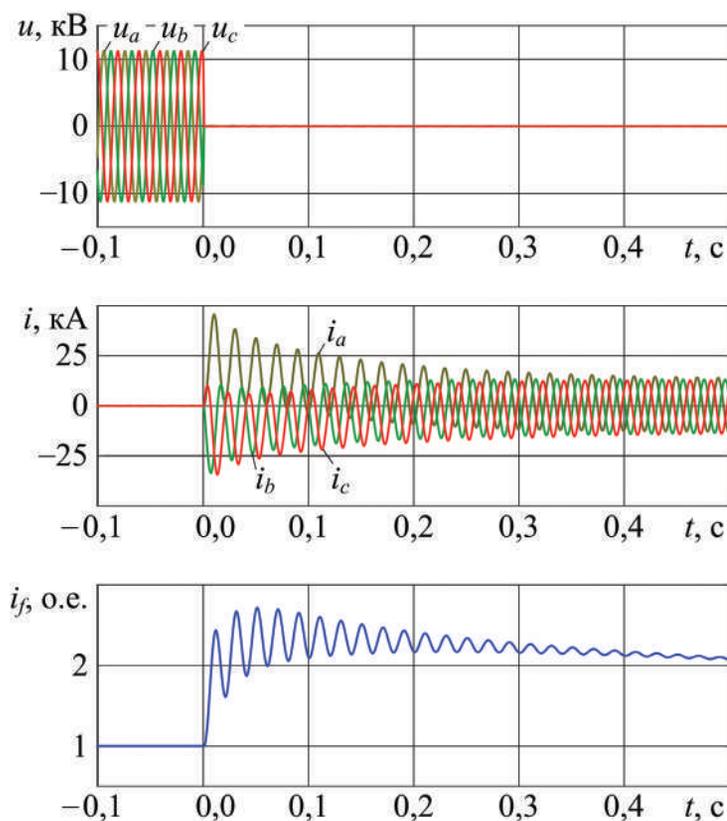


Рис. 3. Результат расчета переходного процесса при коротком замыкании на выводах генератора с помощью разработанной модели

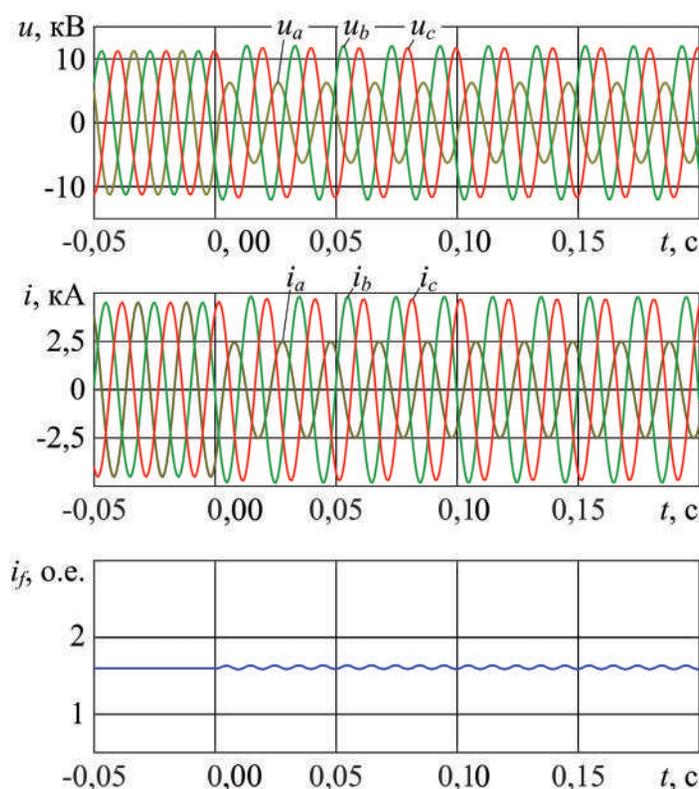


Рис. 4. Результат расчета переходного процесса при внезапном межвитковом замыкании в фазе  $A$  обмотки статора

## Выводы

Предложен новый метод численного моделирования переходных процессов синхронной машины с несимметрией фазных обмоток статора. На его основе создана математическая модель синхронного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку в сети с нулевым проводом. Адекватность модели подтверждена путем сравнения полученных с ее помощью расчетных зависимостей с результатами расчетов в MATLAB Simulink.

Для моделирования переходных процессов мощных синхронных генераторов при межвитковых коротких замыканиях необходим вывод системы дифференциальных уравнений для схемы с изолированной нейтралью, а также учет появления дополнительных короткозамкнутых контуров.

## Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970.
2. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2012.
3. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.: Наука, 1985.
4. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. М.: Вильямс, 2001.

5. Турчак Л.И. Основы численных методов. М.: Наука, 1987.

## References

1. Ulyanov S.A. Elektromagnitnye Perekhodnye Protssesy v Elektricheskikh Sistemah. M.: Energiya, 1970. (in Russian).
2. Modelirovanie Elektrotekhnicheskikh Ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink. M.: DMK Press, 2012. (in Russian).
3. Gorev A.A. Perekhodnye Protssesy Sinhronnoy Mashiny. L.: Nauka, 1985. (in Russian).
4. Met'yuz D.G., Fink K.D. Chislennyye Metody. Ispol'zovanie MATLAB. M.: Vil'yams, 2001. (in Russian).
5. Turchak L.I. Osnovy Chislennyh Metodov. M.: Nauka, 1987. (in Russian).

## Сведения об авторе

Глазырин Глеб Владимирович — кандидат технических наук, заведующий кафедрой электрических станций Новосибирского государственного технического университета, e-mail: glazyring@gmail.com

## Information about author

Glazyrin Gleb V. — Ph.D. (Techn.), Head of Electrical Stations Dept., Novosibirsk State Technical University, e-mail: glazyring@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.12.2016