

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Константин Сергеевич Алешин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: alyoshin@rza.ru

Алексей Александрович Семушкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: siomushkin@rza.ru

Владимир Александрович Шуин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Имитационная модель для исследования третьей гармоники в ЭДС синхронного генератора

Авторское резюме

Состояние вопроса. В основе принципа действия известных исполнений защит от однофазных замыканий на землю в обмотке статора, основанных на использовании ЭДС третьей гармоники, как правило, лежат упрощенные представления о равномерном и линейном распределении ЭДС и, соответственно, напряжения данной гармоники вдоль обмотки статора. Как показывают опытные данные, приведенные в ряде публикаций, такие упрощенные представления не всегда соответствуют действительному распределению напряжения третьей гармоники в обмотке статора, что в ряде случаев приводит к ложным срабатываниям защит данного типа в режимах без замыканий на землю. Учитывая трудности экспериментальных измерений на работающем генераторе, актуальной задачей является разработка имитационной модели генератора, достоверно отражающей реальный характер поведения напряжения третьей гармоники с учетом режима работы и конструктивных особенностей синхронной машины и необходимой как для разработки эффективной защиты от замыканий на землю обмотки статора, так и для оценки технического совершенства существующих защит генераторов от данного вида повреждений.

Материалы и методы. Для разработки имитационной модели синхронного генератора использована среда SIMULINK программного комплекса MATLAB. Модель выполнена в соответствии с теорией электрических машин. Для верификации модели использованы типовые характеристики и опытные данные, приведенные в научных публикациях, учебных и справочных пособиях.

Результаты. Разработана имитационная модель синхронного генератора, отражающая сложный и нелинейный характер распределения напряжения третьей гармоники вдоль обмотки статора, с учетом конструкции, режима работы машины и места замыкания на землю.

Выводы. Разработанная модель может использоваться как для разработки защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на основе третьей гармоники, обладающей более высоким техническим совершенством по сравнению с известными исполнениями, так и для оценки эффективности функционирования существующих защит от данного вида повреждений.

Ключевые слова: синхронный генератор, однофазные замыкания на землю в обмотке статора, ЭДС третьей гармоники, защита от замыканий на землю обмотки статора, имитационная модель синхронного генератора

Konstantin Sergeevich Aleshin

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alyoshin@rza.ru

Alexey Alexandrovich Semushkin

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: siomushkin@rza.ru

Vladimir Alexandrovich Shuin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Simulation model to study the third harmonic in the EMF of a synchronous generator

Abstract

Background. The principle of operation of the known versions of ground fault protection systems in stator windings, based on the use of third harmonic in EMF (electromotive force) of generators, is usually based on a simplified idea of uniform and linear distribution of EMF and, consequently, the voltage of this harmonic along the stator winding. However, as experimental data presented in several scientific papers show, such simplified assumptions do not always reflect the actual distribution of third harmonic voltage in stator windings. This can lead to false operation of these protection systems during non-ground fault conditions. Due to the difficulties to conduct experimental measurements on an operating generator, it is essential to develop a simulation model that accurately represents the actual behavior of the third harmonic voltage. This model should take into account the operational mode and design characteristics of the synchronous machine. Such a model is necessary to both develop efficient protection against ground faults in the stator windings and assess the technical effectiveness of existing generator protection against this type of failure.

Materials and methods. To develop a simulation model of a synchronous generator, the authors have used the SIMULINK environment in the MATLAB software package. The model has been developed based on the theory of electrical machines. To validate the model, the authors have used typical characteristics and experimental data from scientific publications and educational and reference books.

Results. A simulation model of a synchronous generator has been designed, which takes into account complex and non-linear nature of the third harmonic voltage distribution along the stator winding. The model considers the design and operation mode of the machine as well as the location of any ground faults.

Conclusions. The developed model can be used to both develop protection against ground faults in the stator winding of generators based on the third harmonic, which has higher technical perfection compared to existing designs, and evaluate the effectiveness of current protections against this type of damage.

Key words: synchronous generator, single-phase ground faults in the stator winding, third harmonic of EMF, ground fault protection of the stator winding, synchronous generator simulation model

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.2.018-027

Введение. В соответствии с приказом № 101 Министерства энергетики РФ для синхронных генераторов мощностью более 30 МВт, работающих в блоке с трансформатором, требуется защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), охватывающая всю обмотку статора (100 %-я защита). Если фиксация ОЗЗ в пределах 85–95 % обмотки статора со стороны линейных выводов генератора не вызывает затруднений и реализуется достаточно просто с помощью максимального измерительного органа по напряжению нулевой последовательности $3U_0$, то обеспечение селективности и требуемой чувствительности защиты при замыканиях в пределах оставшихся 5–15 % обмотки вблизи нейтрали является более сложной задачей.

По принципу действия 100 %-е защиты от ОЗЗ можно разделить на два основных типа [1]:

1) использующие наложение на обмотку статора постоянного или переменного напряжения от специального источника;

2) использующие напряжения нулевой последовательности основной и третьей гармоник на выводах обмотки статора.

В России и других странах более широкое применение получили комбинированные защиты второго типа. В таких защитах измерительный орган, реагирующий на напряжение основной гармоники, обеспечивает фиксацию ОЗЗ в зоне до 85–95 % обмотки статора со стороны линейных выводов, а измерительный орган третьей гармоники – фиксацию ОЗЗ вблизи нейтрали.

Известно [2, 3], что многие защиты, основанные на использовании контроля третьей гармоники напряжения нулевой последовательности, подвержены ложной работе при изменении нагрузки и не всегда обеспечивают достаточную чувствительность при ОЗЗ в защищаемой зоне в некоторых режимах работы генератора. Это обусловлено зависимостью напряжения третьей гармоники от конструкции и режима работы генератора. В связи с этим разработка эффективной комбинированной за-

щиты от ОЗЗ в обмотке статора и обоснование возможности ее применения на конкретном типе генератора возможны только на основе исследования реального поведения напряжения третьей гармоники нулевой последовательности во всех возможных установившихся режимах работы синхронной машины.

Степень разработанности проблемы. Обоснование направления исследований. Принципы действия традиционных защит от замыканий на землю в статоре генератора, работающего в блоке с трансформатором, основаны на использовании приближенных допущений о равномерном распределении емкостей фаз на землю и пропорциональности ЭДС третьей гармоники числу витков обмотки статора. С учетом указанных допущений схемы замещения для анализа поведения напряжений третьей гармоники со стороны линейных выводов $U_{3в}$ и нейтрали генератора $U_{3н}$ и эпюры распределения напряжения U_3 вдоль обмотки статора в режимах без ОЗЗ и при ОЗЗ, как правило, представляют в виде, показанном на рис. 1,а,б [1].

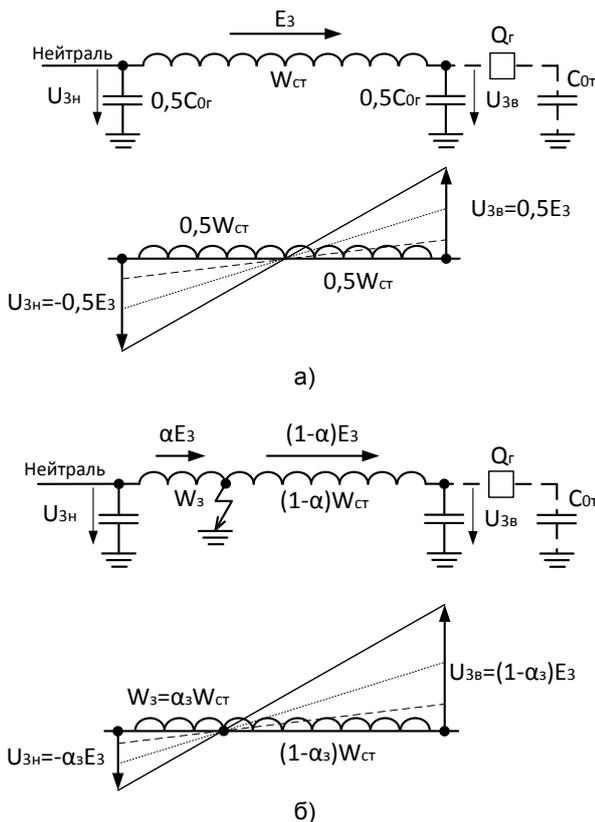


Рис. 1. Упрощенные схемы замещения статора генератора и эпюры распределения напряжения третьей гармоники U_3 при отключенном выключателе генератора Q_f в режиме без ОЗЗ (а) и при ОЗЗ в обмотке статора (б): E_3 – ЭДС третьей гармоники генератора; C_{0r} – емкость фазы обмотки статора генератора; $C_{0т}$ – емкость фазы обмотки низшего напряжения блочного трансформатора; $W_{ст}$ – число витков обмотки статора; W_3 – число замкнутых на землю витков обмотки статора со стороны нейтрали; $\alpha_3 = W_3 / W_{ст}$ – доля замкнутых на землю витков

На рис. 1,а,б пунктиром показаны также эпюры распределения напряжения U_3 вдоль обмотки статора при изменениях ЭДС третьей гармоники E_3 в различных режимах работы генератора (уровень E_3 минимален в режимах малой нагрузки или холостом ходе генератора). В нормальном режиме при включенном выключателе генератора Q_f на значения и соотношение напряжений $U_{3н}$ и $U_{3в}$ может также оказывать влияние емкость $C_{0т}$ обмотки низшего напряжения блочного трансформатора.

Для выполнения защиты от ОЗЗ, возникающих вблизи нейтрали обмотки статора (см. рис. 1,б), могут быть использованы:

- 1) способ одностороннего замера напряжения третьей гармоники $U_{3в}$ со стороны линейных выводов генератора (защита относительной селективности);
- 2) способ двустороннего замера напряжений третьей гармоники $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ (защита абсолютной селективности).

Защиты, выполненные по способу двустороннего замера, обеспечивают лучшую селективность в режимах без ОЗЗ и чувствительность при замыканиях вблизи нейтрали, поэтому защиты одностороннего замера напряжения третьей гармоники применяются только в тех случаях, когда технически невозможно установить трансформатор напряжения для измерения напряжения на нейтрали генератора [4].

В получившей широкое распространение в России и странах СНГ защите двустороннего замера типа ЗЗГ-11 (БРЭ1301.01) и ее аналогах, выполненных на микропроцессорной базе, условие срабатывания по величинам напряжений третьей гармоники $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ может быть представлено в следующем виде [4, 5]:

$$U_{раб} = |\dot{U}_{3н} + \dot{U}_{3в}| \geq U_{торм} = K_T |\dot{U}_{3н}|, \quad (1)$$

где $U_{раб}$ – рабочая величина; $U_{торм}$ – тормозная величина; K_T – коэффициент торможения.

Используя соотношения для $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$, приведенные на рис. 1,б, условие срабатывания защиты получим из (1) в следующей форме:

$$U_{раб} = E_3 |1 - 2\alpha_3| \geq U_T = K_T \alpha_3 E_3. \quad (2)$$

Характеристики срабатывания защиты двустороннего замера по уравнению (2) приведены на рис. 2. Анализ этих характеристик срабатывания показывает, что в нормальном режиме работы при $K_T > 0$ обеспечивается $U_{торм} > U_{раб}$ и защита не срабатывает. При ОЗЗ вблизи нейтрали $U_{раб}$ увеличивается, а $U_{торм}$ снижается (в пределе до 0) и защита срабатывает. При $K_T \geq 1$ защита реагирует только на ОЗЗ в зоне $\alpha_{заш} < 0,5$ со стороны нейтрали, при $K_T < 1$ защита может также реагировать и на замыкания со стороны линейных выводов обмотки статора. Как правило, рекомендуется принимать $K_T = 1$ [5].

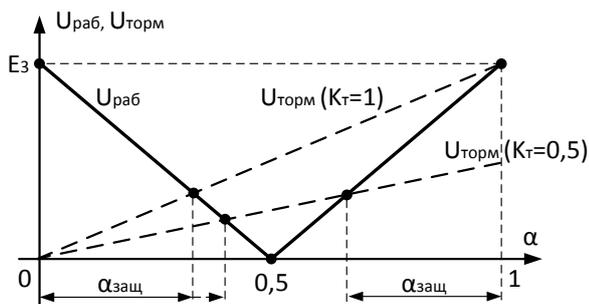


Рис. 2. Характеристики срабатывания и зоны действия $\alpha_{зщ}$ защиты двустороннего замера напряжений третьей гармоники (ЗЗГ-11, БРЭ1301.01) при различных значениях коэффициента торможения K_{τ}

В [4] показано, что измерительный орган рассматриваемой защиты представляет собой минимальное реле сопротивления, отстроенное от минимального сопротивления в рабочем режиме. На наш взгляд, в соответствии с соотношением (1), защиту двустороннего замера следует рассматривать как продольную дифференциальную защиту напряжения, реагирующую на векторную сумму напряжений по концам обмотки статора генератора $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ с торможением от напряжения $\dot{U}_{3н}$ со стороны нейтрали.

Защиты от ОЗЗ в обмотке статора генераторов на основе рассмотренного принципа получили широкое применение не только в России, но и во многих других странах. Как показывает опыт эксплуатации, основным недостатком защиты по данному способу является возможность ее ложных срабатываний при изменениях соотношения напряжений $U_{3н}$ и $U_{3в}$ в нагрузочных режимах. Согласно результатам исследований [2], соотношение сравниваемых величин $U_{3н}$ и $U_{3в}$ в режимах без ОЗЗ не остается постоянным, а может изменяться в достаточно широких пределах в зависимости от величины и характера нагрузки и от типа генератора. Например, для одного из 6 исследованных в [2] генераторов наибольшее зафиксированное изменение соотношения $U_{3н}$ и $U_{3в}$ составило 105 %, в то время как для трех других машин изменение не превысило 10 %. По данным исследований [3], выявлено также изменение соотношения напряжений $U_{3н}$ и $U_{3в}$ для синхронного генератора мощностью 360 МВт, работающего в блоке с трансформатором, в зависимости от активной нагрузки, но при этом реактивная нагрузка машины практически не влияет на это соотношение. Таким образом, на эффективность функционирования защит от ОЗЗ, основанных на контроле соотношений векторов напряжений третьей гармоники $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$, существенное влияние оказывают характер нагрузки и конструктивные особенности защищаемого генератора.

Изложенное выше позволяет сделать вывод, что характер изменений напряжений третьей гармоники $U_{3н}$ и $U_{3в}$ в синхронных генераторах в нагрузочных режимах и при ОЗЗ в обмотке статора существенно сложнее существующих традиционных представлений. В связи с этим повышение технического совершенства рассматриваемой защиты от замыканий на землю в обмотке статора, прежде всего селективности несрабатываний в режимах без ОЗЗ, требует более глубокого анализа процессов, определяющих соотношения векторов $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ с учетом конструктивных особенностей и характера нагрузки защищаемого генератора.

Методы исследования. Выполнение экспериментальных исследований на действующих синхронных генераторах для анализа зависимости модулей и фазовых соотношений векторов $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ от особенностей конструкции и режимов работы защищаемого генератора представляет значительные сложности, поэтому наиболее эффективным методом решения данной задачи является имитационное моделирование. В настоящем исследовании имитационная модель генератора реализована в среде SIMULINK программного комплекса MATLAB.

Требования к имитационной модели генератора. Требования к имитационной модели исследуемого объекта определяются, прежде всего, ее назначением, ограничивающим решаемые с ее использованием задачи и область возможного применения. Разработанная модель предназначена, прежде всего, для использования при решении задач, связанных с совершенствованием принципов выполнения, методики выбора уставок и оценки чувствительности 100 %-й защиты от ОЗЗ в обмотках статора блочных турбо- и гидрогенераторов, основанной на использовании ЭДС третьей гармоники. К таким задачам относятся, как отмечалось выше, исследования реального характера изменения значений и фазовых соотношений напряжений третьей гармоники $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ в нагрузочных режимах и при ОЗЗ в различных точках обмотки статора генераторов, работающих в блоке с трансформатором.

Турбогенераторы и гидрогенераторы имеют принципиальные конструктивные отличия, главным из которых является тип ротора.

Турбогенераторы представляют собой быстроходные машины с частотой вращения 3000 (с одной парой полюсов) или, реже, 1500 (с двумя парами полюсов) оборотов в минуту при частоте вырабатываемого тока 50 Гц, имеющие неявнополюсный цельный ротор в виде цилиндра с пазами, в которые уложена обмотка возбуждения. При этом кривая магнитного поля возбуждения имеет форму трапеции, геометрия которой определяется соотношением обмотанной и полной поверхностей ротора [6–8].

Гидрогенераторы – тихоходные машины со значительно меньшей частотой вращения (60–500 об/мин), имеющие явнополюсный сборный ротор, при этом число пар полюсов может достигать нескольких десятков [9, 10]. Обмотка возбуждения в гидрогенераторах выполняется в виде последовательно соединенных катушек, расположенных на сердечниках полюсов. Кривая магнитного поля возбуждения определяется формой полюсных наконечников, а также магнитным рассеянием в межполюсном пространстве.

Разрабатываемая модель должна быть универсальной, чтобы обеспечить возможность моделирования как турбо-, так и гидрогенераторов различных типов, но при этом достаточно простой и требующей задания минимума технических характеристик.

Так как основное назначение модели заключается в уточнении общих закономерностей, определяющих характер изменения третьей гармоники в нагрузочных режимах и при ОЗЗ в обмотке статора генератора, а не в определении точных параметров третьей гармоники для конкретной машины, в расчетах на имитационной модели наиболее целесообразно использовать относительные единицы [6]. Это позволяет уйти от многообразия параметров реальных машин и сосредоточиться на основных конструктивных особенностях и режимах работы генераторов. Следует отметить также, что многие характеристики синхронных генераторов являются типовыми (например, характеристика холостого хода [6, 7]).

Построение имитационной модели генератора, учитывающей все конструктивные факторы, влияющие на кривую магнитного поля в воздушном зазоре и, соответственно, форму напряжения обмоток статора, является крайне сложной и избыточной задачей. Так, например, не имеет смысла учитывать роль пазов статора в неравномерности магнитного сопротивления воздушного зазора, так как этот фактор не влияет на гармоники нулевой последовательности ($\nu = 3, 9, 15 \dots$) [6], поэтому модель должна учитывать только те конструктивные особенности генераторов, которые существенно влияют на параметры генерируемой ими ЭДС третьей гармоники. К таким особенностям, в частности, относятся отношение обмотанной и полной поверхностей ротора (для турбогенераторов), форма полюсных наконечников (для гидрогенераторов), схема соединения и укорочение шага обмотки статора.

Как уже отмечалось выше, для некоторых типов генераторов характерны изменения соотношения напряжений третьей гармоники $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$ при изменении параметров установившегося нагрузочного режима их работы (активной мощности P и реактивной мощности Q). Изменение напряжений третьей гармоники $\dot{U}_{3н}$ и $\dot{U}_{3в}$

при возникновении ОЗЗ в обмотке статора происходит практически мгновенно по сравнению с процессами, обусловленными изменениями параметров нагрузочного режима генератора P и Q , и не влияет на условия срабатывания защиты. Для решения сформулированных выше задач в принципе достаточно иметь статическую имитационную модель, позволяющую рассчитывать только установившиеся режимы работы генератора.

С учетом изложенного выше имитационная модель генератора должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) универсальность, т.е. возможность моделирования как турбо-, так и гидрогенераторов различных типов;
- 2) выполнение расчетов на имитационной модели в относительных единицах;
- 3) моделирование установившихся нагрузочных режимов и режимов ОЗЗ в различных точках обмотки статора;
- 4) учет конструктивных особенностей машины, влияющих на ЭДС третьей гармоники, а именно:

- отношения обмотанной и полной поверхностей ротора (для турбогенераторов);
- формы полюсных наконечников (для гидрогенераторов);
- схемы соединения и укорочение шага обмотки статора;
- характеристики холостого хода.

Структура имитационной модели генератора. На рис. 3 приведена структурная схема разработанной универсальной модели для исследований высших гармоник нулевой последовательности в ЭДС генератора.

Главная особенность модели заключается в расчете магнитного поля в воздушном зазоре машины с дискретностью 5 градусов на одну пару полюсов, а также в построении электрических цепей обмоток статора в виде катушек, соединенных в соответствии со схемой моделируемого генератора (на схеме обозначены как K_1 , K_2 и K_3), каждая из которых имеет свой мультичастотный источник ЭДС, емкость на землю, а также является источником МДС.

В структуре модели можно выделить четыре главных составляющих:

- магнитодвижущая сила (МДС) ротора;
- МДС реакции статора;
- магнитное поле в воздушном зазоре;
- электрическая цепь обмотки статора.

Результирующее магнитное поле в воздушном зазоре модели турбогенератора определяется суммой МДС ротора и реакции статора с учетом кривой насыщения машины, соответствующей типовой характеристике холостого хода. Для модели гидрогенератора также учитывается форма полюсных наконечников как неравномерность магнитной проводимости воздушного зазора.

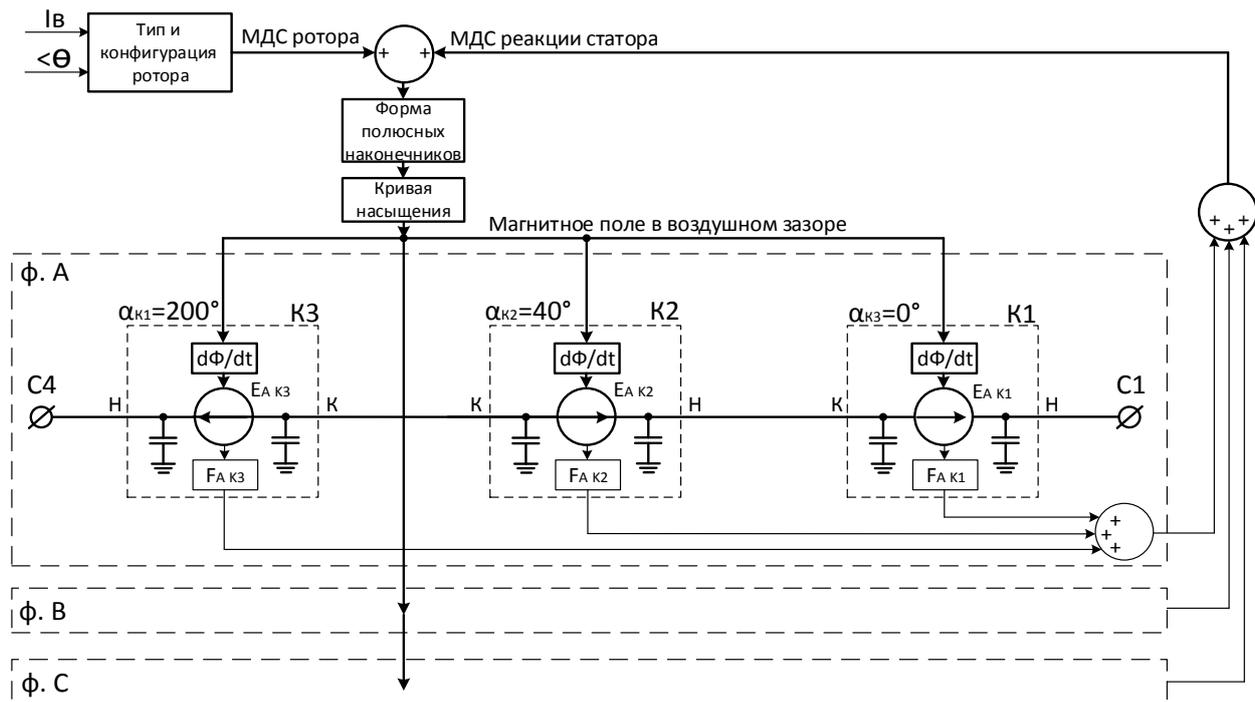


Рис. 3. Структурная схема разработанной имитационной модели синхронного генератора для исследований ЭДС третьей гармоники: I_b – ток возбуждения; $\angle\theta$ – угол нагрузки; $K1(2,3)$ – катушка статора 1(2,3); $\alpha_{K1(2,3)}$ – механический угол катушки $K1(2,3)$; $F_{AK1(2,3)}$ – МДС катушки $K1(2,3)$; $E_{AK1(2,3)}$ – ЭДС катушки $K1(2,3)$; H – начало катушки; K – конец катушки

Кривая МДС ротора имеет форму трапеции, амплитуда которой определяется током возбуждения I_b , а пространственное положение относительно статора задается углом θ . Изменение этих параметров позволяет задать режим работы генератора.

В случае турбогенератора геометрия трапеции, а значит, и уровень высших гармоник, включая третью, МДС обмотки возбуждения определяются отношением γ обмотанной и полной поверхностей ротора.

На рис. 4 приведены примеры полученных на модели кривых МДС ротора турбогенератора для крайних значений используемого диапазона отношения обмотанной и полной поверхностей ротора $\gamma = 0,67$ и $\gamma = 0,8$, а также кривая для $\gamma = 0,75$, которой соответствует минимальный уровень высших гармоник в МДС индуктора [7]. Таким образом, в режимах холостого хода и минимальной нагрузки турбогенератора при отсутствии насыщения магнитной цепи машины уровень третьей гармоники значительно зависит от параметра γ .

Для модели гидрогенератора форма кривой МДС полюса ротора обусловлена магнитным рассеянием в межполюсном пространстве, а также малой дискретностью моделирования поля в зазоре, которая составляет 5 градусов на пару полюсов, и приближенно, как и для турбогенератора, имеет вид трапеции.

МДС реакции статора обусловлена протеканием токов нагрузки в обмотках фаз генерато-

ра. Каждая из обмоток состоит из соединенных между собой катушек, уложенных в пазы статора, итоговая МДС реакции статора формируется как сумма МДС фаз, а МДС каждой фазы – как сумма МДС образующих ее катушек с учетом их пространственного сдвига и укорочения шага.

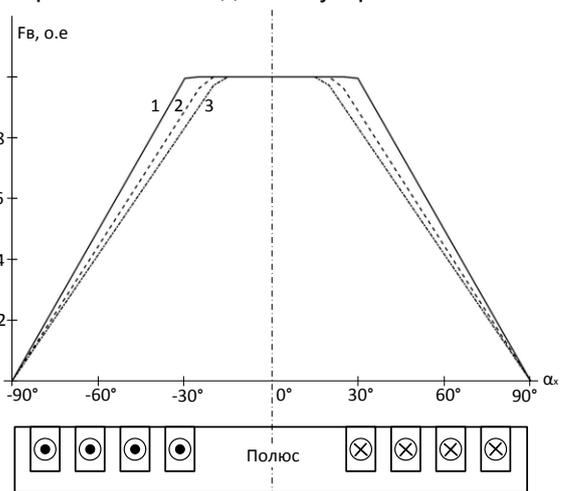


Рис. 4. Кривые МДС ротора F_B турбогенератора, полученные на модели для различных значений параметра γ : 1 – $\gamma = 0,8$; 2 – $\gamma = 0,75$; 3 – $\gamma = 0,67$; α_x – механический угол полюса

МДС отдельной катушки имеет форму прямоугольника, а ее амплитуда определяется протекающим в ней током [6, 7]. Укорочение шага приводит к несимметричному распределению МДС катушки по воздушному зазору, со

стороны сокращения шага МДС катушки возрастает, а со стороны увеличения шага МДС уменьшается. Это обеспечивает равенство входящего и исходящего магнитных потоков через катушку, т.е. отсутствие униполярного эффекта [8]. Полученные на модели кривые МДС катушки статора показаны на рис. 5.

В разработанной модели катушка принята за базовый блок, из которых формируется электрическая схема обмоток статора генератора. Емкости обмоток статора на землю представлены в виде сосредоточенных емкостей по концам катушек. Крайне важно, что каждая катушка представляет собой отдельный мультичастотный источник ЭДС, форма и величина напряжения которого определяются параметрами магнитного поля в воздушном зазоре машины с учетом пространственного расположения и укорочения шага катушки. Таким образом, результирующее напряжение статора определяется суммой ЭДС отдельных катушек в соответствии с заданной схемой обмотки.

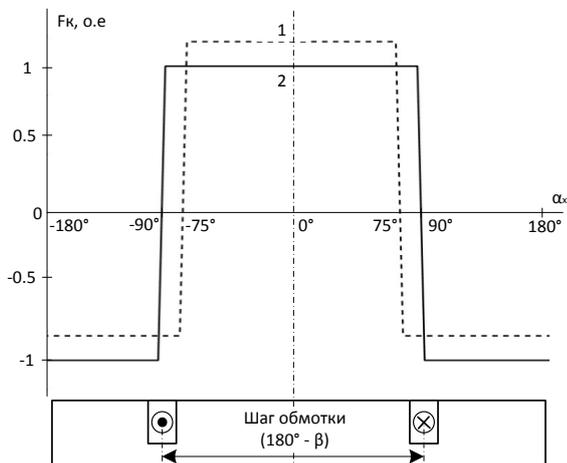


Рис. 5. Полученные на модели кривые МДС катушки статора F_k : 1 – для катушки с укорочением шага $\beta = 30^\circ$; 2 – для катушки с диаметральной шагом

Отметим, что обмотки статора по своей конструкции делятся на однослойные и двухслойные. В однослойной обмотке в паз укладывается только одна пазовая сторона катушки. Данная конструкция обмоток применяется достаточно редко [9, 11]. В двухслойной обмотке пазовая сторона катушки занимает половину паза, а вторая половина паза заполняется другой катушкой. Данный тип обмоток получил наибольшее распространение, главным его преимуществом является возможность любого укорочения шага, что позволяет максимально приблизить форму генерируемого напряжения к синусоидальной.

Верификация имитационной модели на основе опытных данных. Верификация модели производилась сравнением характеристик и зависимостей, полученных на разработанной модели, с типовыми характеристиками синхронных машин и представленными в литературе опыт-

ными данными, полученными на крупных генераторах в условиях работы на реальную сеть.

Ниже приводятся данные по верификации модели гидрогенератора, как более сложной по сравнению с моделью турбогенератора. В целях упрощения модели принято, что генератор имеет только 1 пару полюсов. Для моделируемого гидрогенератора принята трехфазная двухслойная дробная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу $q = 1\frac{1}{2}$. Характеристика холостого хода принята типовой для гидрогенератора, а $OK3 = 1,2$, что соответствует среднему значению для гидрогенераторов [7].

На рис. 6 представлены полученные на данной модели характеристики холостого хода и короткого замыкания. Пунктирной линией показана типовая характеристика холостого хода для гидрогенератора, приведенная в [6]. Максимальная погрешность для полученных на модели характеристик не превышает 3 % по сравнению с заданными.

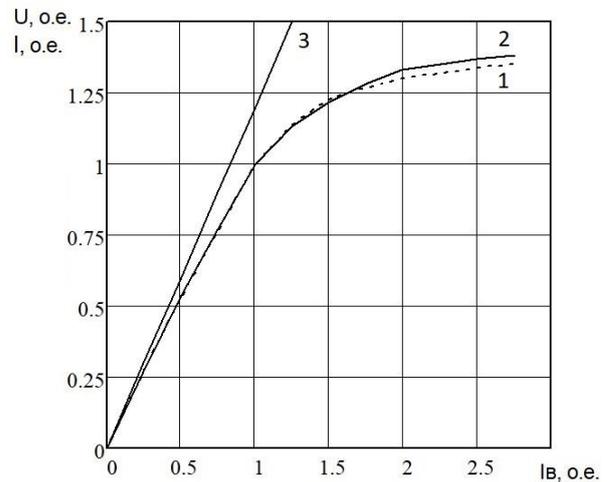


Рис. 6. Типовая (1) и полученные на модели (2) характеристики холостого хода и характеристика короткого замыкания (3): U – напряжение статора; I – ток статора; I_B – ток возбуждения

Форма и гармонический состав ЭДС, наводимой в элементарных проводниках обмотки статора, определяются магнитным полем в воздушном зазоре между статором и ротором. В связи с этим верификация модели в части достоверности отображения гармонического состава ЭДС генератора может быть выполнена на сравнении полученных на модели кривых синхронного поля с опытными кривыми, приведенными в [10] для крупных гидрогенераторов в различных режимах работы на реальную сеть.

На рис. 7 приведено сравнение опытных [10] и полученных на модели кривых синхронного поля для гидрогенератора СВ 712/227-24 Ингури ГЭС (Грузия) в режимах генерации и потребления реактивной мощности при $P \approx 220$ МВт. Анализ кривых показал, что максимальная погрешность по значению индукции в воздушном зазоре не превышает 20 % от амплитуды кривой, а погрешность по фазе не превышает 15° .

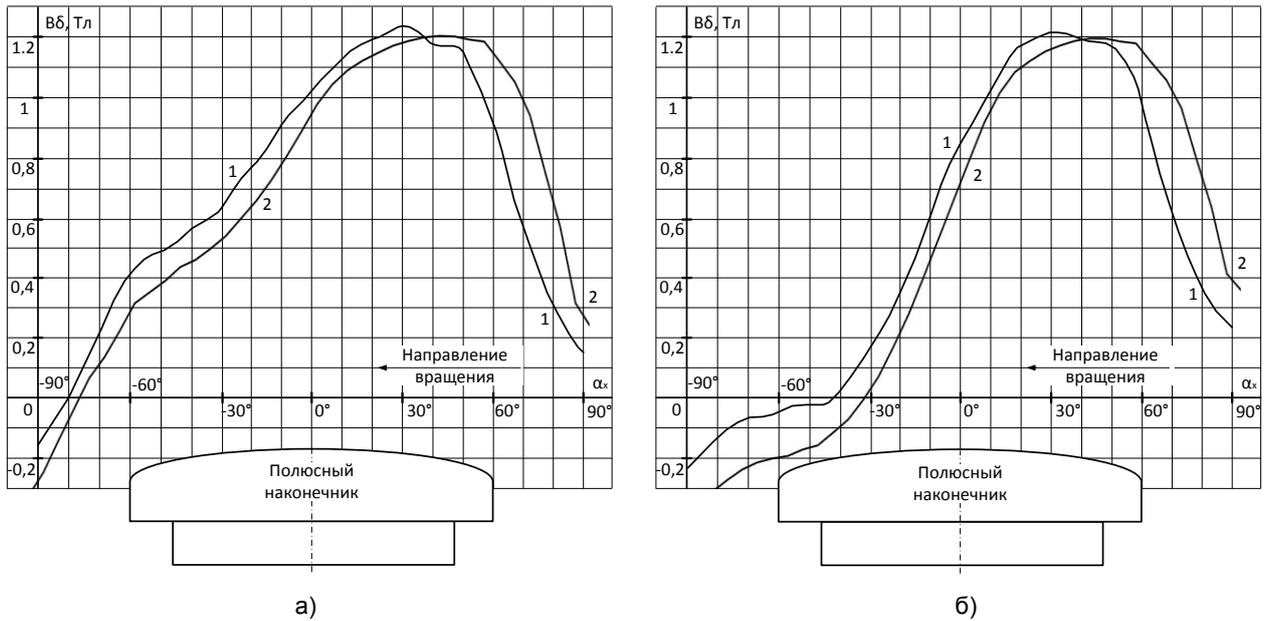


Рис. 7. Сравнение опытных, снятых на гидрогенераторе ст. № 5 Ингури ГЭС [10] (1), и полученных на модели (2) кривых синхронного поля в зазоре: а – при $P = 220,7$ МВт, $\varphi = 21,2^\circ$, $\theta = 24,9^\circ$; б – при $P = 218,3$ МВт, $\varphi = -16,5^\circ$, $\theta = 44,6^\circ$; $B\delta$ – индукция в воздушном зазоре; α_x – механический угол полюса

Проверка модели по уровню генерируемой третьей гармоники также производилась сравнением с опытными данными, приведенными в литературных источниках. Как отмечается в последних, уровень третьей гармоники в среднем составляет несколько процентов от основной [12], при этом сильно изменяется в зависимости от режима работы машины

Наиболее подробно зависимости уровня третьей гармоники от режима нагрузки приведены в исследованиях [13] для гидрогенератора мощностью 106 МВА, расположенного в Испании. На рис. 8 представлено сравнение данных зависимостей с результатами, полученными на модели в приближенно близких условиях.

Нужно отметить, что результирующий уровень третьей гармоники значительно зависит от таких характеристик машины, как форма по-

люсных наконечников, кривая насыщения магнитной цепи и схема соединения обмотки статора, которые для рассматриваемого генератора неизвестны, поэтому сравнение в данном случае носит, прежде всего, качественный характер. Как опытные, так и модельные зависимости демонстрируют минимальный уровень третьей гармоники при нулевой активной мощности и отсутствии генерации реактивной мощности.

В случае, когда уровень генерируемой реактивной мощности составляет более половины от номинальной, доля третьей гармоники значительно возрастает, но при этом практически не зависит от активной нагрузки. В случае же потребления реактивной мощности рост уровня третьей гармоники растет при увеличении генерируемой активной мощности.

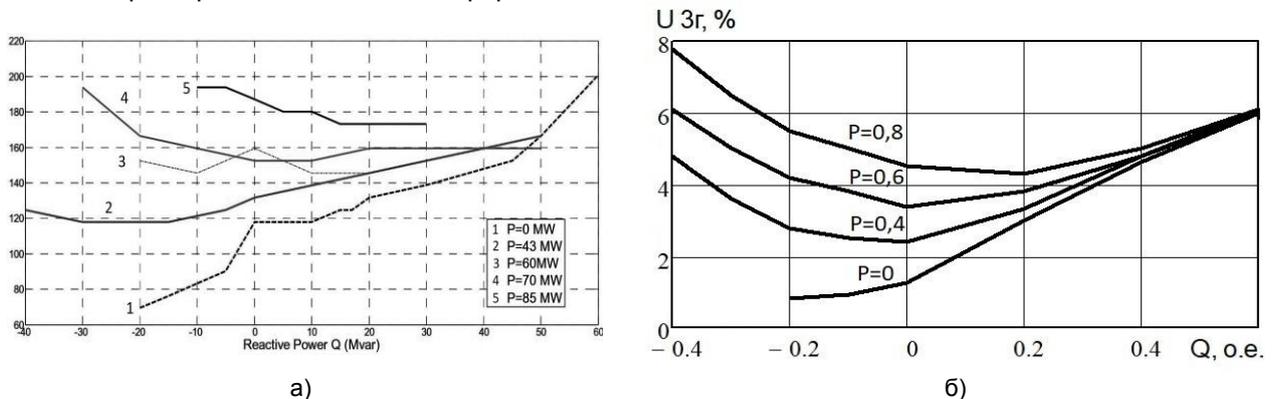


Рис. 8. Сравнение опытных, снятых на гидрогенераторе 106 МВА в Испании [13] (а), и полученных на модели (б) зависимостей напряжения третьей гармоники статора от активной и реактивной мощности: P – активная мощность; Q – реактивная мощность; U_3 – напряжение третьей гармоники

На рис. 9 рассмотрены векторные диаграммы, полученные на модели генератора в двух режимах работы для наиболее распространенной двухслойной обмотки с укороченным шагом с целым числом пазов на полюс и фазу. Фазная зона обмотки составляет 60 градусов, каждая фаза состоит из 8 катушек – 4 катушки включены прямо, а 4 встречно, т.е. обмотка имеет симметрию относительно средних точек фаз.

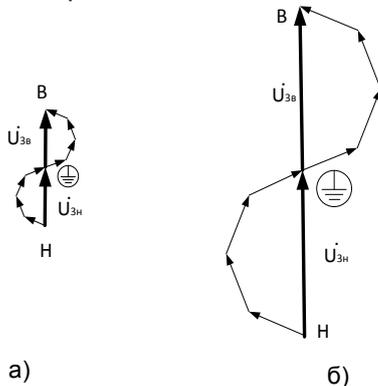


Рис. 9. Векторные диаграммы напряжения третьей гармоники статора, полученные на модели для двухслойной обмотки с укороченным шагом с целым числом пазов на полюс и фазу для холостого хода (а) и при $P = 0$, $Q = 0,5$ (б): \dot{U}_{3B} – напряжение третьей гармоники на линейных выводах генератора В; \dot{U}_{3N} – напряжение третьей гармоники на нейтрали Н

Для удобства восприятия векторы \dot{U}_{3N} и \dot{U}_{3B} на рис. 9 показаны последовательно и их противофазному включению для защиты соответствует угол, равный нулю, а векторы напряжений третьей гармоники катушек показаны тонкими линиями. Данные диаграммы в режиме без ОЗЗ в определенной степени соответствуют традиционным представлениям, а именно:

- векторы \dot{U}_{3N} и \dot{U}_{3B} находятся в противофазе;
- отношение значений U_{3N}/U_{3B} постоянно.

Тем не менее распределение напряжения третьей гармоники вдоль обмотки статора является нелинейным, векторы третьей гармоники катушек описывают полуокружности, так же как показано в исследованиях [3]. Постоянство отношения U_{3N}/U_{3B} при нулевом угле между ними в режиме без ОЗЗ обеспечивается симметрией обмотки относительно средних точек фаз.

Для проверки модели также была протестирована обмотка статора с фазной зоной 120 градусов и полным шагом, для которой, в соответствии с [6], третья гармоника в результирующем напряжении будет отсутствовать. Полученные для данной обмотки векторные диаграммы показаны на рис. 10. Их анализ показывает, что векторы третьей гармоники катушек статора описывают полные окружности, а результирующее напряжение третьей гармони-

ки между нулевыми и линейными выводами равно нулю.

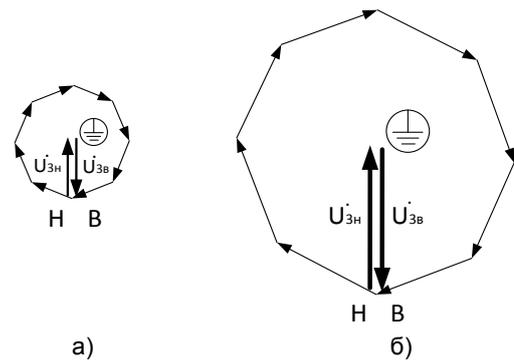


Рис. 10. Векторные диаграммы напряжения третьей гармоники статора, полученные на модели для однослойной обмотки с полным шагом для холостого хода (а) и при $P = 0$, $Q = 0,5$ (б): \dot{U}_{3B} – напряжение третьей гармоники на линейных выводах В; \dot{U}_{3N} – напряжение третьей гармоники на нейтрали Н

Результаты. Сформулированные требования к имитационной модели синхронного генератора предназначены для анализа реального распределения напряжения третьей гармоники вдоль обмотки статора в нагрузочных режимах и при замыканиях на землю.

Разработана универсальная модель, обеспечивающая возможность расчетов напряжений третьей гармоники генератора с учетом основных особенностей конструкции синхронной машины, параметров нагрузочных режимов и положения места замыкания на землю в обмотке статора.

Результаты верификации модели показали, что она позволяет с приемлемой точностью отобразить сложный и нелинейный характер поведения третьей гармоники как в различных нагрузочных режимах, так и при замыканиях на землю в обмотке статора.

Показано, что традиционные представления о линейном распределении напряжения третьей гармоники вдоль обмотки статора синхронных генераторов не учитывают основные конструктивные особенности турбо- и гидрогенераторов, а именно:

- отношение обмотанной и полной поверхностей ротора (для турбогенераторов);
- форму полюсных наконечников (для гидрогенераторов);
- укорочение шага и схему соединения обмотки статора;
- кривую насыщения магнитной цепи и др., что в некоторых случаях является причиной недостаточной селективности и чувствительности применяемых в настоящее время защит от замыканий на землю, основанных на контроле ЭДС третьей гармоники генератора.

Выводы. Разработанная имитационная модель синхронного генератора может быть использована для решения задач, связанных с со-

вершенствованием принципов выполнения защит от замыканий на землю статора, основанных на контроле напряжений третьей гармоники на выводах обмотки статора, а также для оценки эффективности функционирования существующих защит для различных типов генераторов.

Список литературы

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.
2. Safari-Shad N., Franklin R. Adaptive 100 % Stator Ground Fault Protection Based on Third-Harmonic Differential Voltage Scheme // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – Vol. 31. – Issue 4.
3. Fulczyk M., Mydlkowski R. Influence of Generator Load Conditions on 3rd-harmonic Voltages in Generator Stator Winding // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 2005. – Vol. 20, No. 1.
4. Кискачи В.М. Использование гармоник э.д.с. генераторов энергоблоков при выполнении защиты от замыканий на землю // Электричество, 1974. – № 2. – С. 24–29.
5. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций / А.А. Атюшин, А.Е. Гомберг, В.П. Караваев и др.; под ред. Э.С. Мусяляна. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 384 с.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
7. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высш. шк.; Изд. центр «Академия», 2001. – 463 с.
8. Турбогенераторы / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная и др. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
9. Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Высш. шк., 2001. – 389 с.
10. Глебов И.А., Карпов Г.В., Харламова Е.Ф. Исследование электромагнитных полей в гидрогенераторах. – СПб.: Наука, 2005. – 341 с.
11. Абрамов А.И., Извеков В.И., Серехин Н.А. Проектирование турбогенераторов. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
12. Вавин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор–трансформатор. – М.: Энергоиздат, 1982. – 256 с.
13. Verification of a Synchronous Machine Model for Stator Ground Fault Simulation Through Measurements in a Large Generator / A. Bermejo, C.A. Platero, F. Blazquez. et al. – Spain, 2015.
14. Гидрогенераторы / И.А. Глебов, В.В. Домбровский, А.А. Дикштау и др. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 368 с.
15. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
16. Improved Generator Ground Fault Schemes / Report of Working Group J12 of the Rotating Machinery Protection Subcommittee // IEEE PAS Power System Relaying and Control Committee. – USA, 2020.
17. Khaled Ali Mohammed Ali Al Jaafari. Electromagnetic Analysis of Stator Ground Faults in Synchronous Generators: thesis ... Doctor of Philosophy. – Texas A&M University, 2016.
18. Hartmann W. Advanced Generator Ground Fault Protections in Pulp and Paper Mill Applications // Beckwith Electric Company. – Florida, USA, 2016.

References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976. 560 p.

2. Safari-Shad, N., Franklin, R. Adaptive 100 % Stator Ground Fault Protection Based on Third-Harmonic Differential Voltage Scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 31, issue 4.
3. Fulczyk, M., Mydlkowski, R. Influence of Generator Load Conditions on 3rd-harmonic Voltages in Generator Stator Winding. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2005, vol. 20, no. 1.
4. Kiskachi, V.M. Ispol'zovanie garmonik e.d.s. generatorov energoblokov pri vypolnenii zashchity ot zamykaniy na zemlyu [The use of harmonics of EMF generators of power units when performing earth fault protection]. *Elektrichestvo*, 1974, no. 2, pp. 24–29.
5. Atyushin, A.A., Gomberg, A.E., Karavaev, V.P., Klochkov, A.A., Kolesnikov, L.F., Mirumyan, M.M. *Spravochnik po naladke vtorichnykh tsepey elektrostantsiy i podstantsiy* [Handbook on setting up secondary circuits of power plants and substations]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 384 p.
6. Vol'dek, A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Leningrad: Energiya, 1974. 840 p.
7. Katsman, M.M. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola; Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2001. 463 p.
8. Titov, V.V., Hutoreckiy, G.M., Zagorodnaya, G.A., Vartan'yan, G.P., Zaslavskiy, D.I., Smotrov, I.A. *Turbo-generatory* [Turbine-driven generators]. Leningrad: Energiya, 1967. 895 p.
9. Abramov, A.I., Ivanov-Smolenskiy, A.V. *Proektirovanie gidrogeneratorov i sinkhronnykh kompensatorov* [Design of hydrogenerators and synchronous compensators]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 389 p.
10. Glebov, I.A., Karpov, G.V., Kharlamova, E.F. *Issledovanie elektromagnitnykh poley v gidrogeneratorakh* [Investigation of electromagnetic fields in hydrogenerators]. Saint-Petersburg: Nauka, 2005. 341 p.
11. Abramov, A.I., Izvekov, V.I., Serekhin, N.A. *Proektirovanie turbogeneratorov* [Design of Turbine-driven generators]. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 335 p.
12. Vavin, V.N. *Releynaya zashchita blokov turbogenerator–transformator* [Relay protection of turbine-driven generator – transformer units]. Moscow: Energoizdat, 1982. 256 p.
13. Bermejo, A., Platero, C.A., Blazquez, F., Blanquez, F., Rebollo, E. Verification of a Synchronous Machine Model for Stator Ground Fault Simulation Through Measurements in a Large Generator. Spain, 2015.
14. Glebov, I.A., Dombrovskiy, V.V., Dikshtau, A.A., Paper, A.S., Pinskiy, G.B., Shkol'nik, E.V. *Gidrogenatoriy* [Hydrogenerators]. Leningrad: Energoizdat, 1982. 368 p.
15. Shneerson, E.M. *Tsifrovaya releynaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 549 p.
16. Improved Generator Ground Fault Schemes / Report of Working Group J12 of the Rotating Machinery Protection Subcommittee. IEEE PAS Power System Relaying and Control Committee. USA, 2020.
17. Khaled Ali Mohammed Ali Al Jaafari. Electromagnetic Analysis of Stator Ground Faults in Synchronous Generators: thesis ... Doctor of Philosophy. Texas A&M University, 2016.
18. Hartmann, W. Advanced Generator Ground Fault Protections in Pulp and Paper Mill Applications. Beckwith Electric Company. Florida, USA, 2016.