

На правах рукописи



Митрофанов Николай Александрович

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ
КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Глазырин Глеб Владимирович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Полищук Владимир Иосифович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»,
Энергетический факультет, декан

Сарры Сергей Владимирович
кандидат технических наук, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Южно-
Российский государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И. Платова»,
кафедра электрические станции и
электроэнергетические системы, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (г.
Томск)

Защита диссертации состоится: «28» декабря 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» ноября 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. тех. наук, доцент



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из самых значимых и сложных объектов в электроэнергетике, которому всегда уделяется пристальное внимание при его защите и диагностике, является синхронный генератор. К релейной защите генератора, ввиду сложности переходных процессов, предъявляются особые требования по надежности и чувствительности.

Основные принципы построения релейной защиты синхронных машин были заложены в работах В.А. Андреева, В.Н. Вавина, А.Ф. Дьякова, А.М. Федосеева, Н.В. Черноброва и ряда других авторов.

Далеко не все отклонения параметров режима от их нормальных значений можно выявить простыми, наглядными алгоритмами и точной измерительной системой защиты. Некоторые параметры можно получить только косвенными методами измерения.

Одним из трудновывявляемых дефектов генераторов является несимметрия фазных обмоток статора, вызванная наличием витковых замыканий в одной из них. Такие неисправности не сопровождаются значительными отклонениями параметров, регистрируемых релейной защитой, от их значений в исправном генераторе (РЗ).

Производством современных устройств релейной защиты синхронных машин занимаются довольно много как отечественных (ООО НПП «Экра», АО «Радиус Автоматика», ООО НТЦ "Механотроника", ООО «Релематика»), так и зарубежных компаний (Siemens, GE, ABB, Alstom, Schneider Electric). В [4-8], а также в руководствах и методических указаниях по расчету уставок защит генераторов, предоставляемых производителями устройств РЗ, изложены рекомендации по правильному выбору типов защит от межвитковых витковых замыканий и расчету их уставок.

Проведенный в работе обзор общепринятых методов и средств защиты генераторов от межвитковых коротких замыканий показывает, что в некоторых случаях существующие защиты неэффективны: при малой доле замкнувшихся витков они не обладают требуемой чувствительностью. Кроме того, многие генераторы не имеют расщепления обмотки статора на параллельные ветви, вследствие чего оказываются лишены специализированной защиты.

В то же время отсутствие возможности выявления межвитковых замыканий в обмотке статора на ранней стадии может привести к тяжелым авариям. Как известно [16-18], в синхронных и асинхронных машинах межвитковые замыкания могут переходить в замыкания на корпус и междуфазные короткие замыкания (КЗ). Первые могут приводить к несчастным

случаям на производстве, вторые – к значительному ущербу от протекания сверхтоков в обмотке статора.

Таким образом актуальность исследования обусловлена:

1. Отсутствием специализированной защиты от межвитковых коротких замыканий в обмотке статора генераторов с нерасщепленной обмоткой;
2. Отсутствием методик ранней диагностики и выявления межвитковых замыканий, обеспечивающих селективное определение данного вида повреждения в обмотке статора;
3. Недостаточной чувствительностью существующих защит генераторов с расщепленной обмоткой статора при малой доле замкнувшихся витков;
4. Возможностью развития аварии и перехода межвитковых коротких замыканий в замыкания на корпус машины и междуфазные короткие замыкания.

Стандартный подход к решению данной проблемы не приносит желаемого результата, и выявление витковых замыканий в обмотке статора синхронного генератора является весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Развитием темы в области защиты обмотки статора генератора от межвитковых замыканий в последние годы занимаются следующие исследователи: Завидей В.И., Барков А.В., Борисов А.А., Брякин И. В., Бочкарев И.В., Келебаев К.К., Богдан А.В., Соболев А.Н., Казаков Ю.Б., Морозов А.Н., Океанский А.П., Шумилов Е.А., Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р, Калугин Ю.А., Одинцов К.Э.

В зарубежной литературе на соответствующую диссертации тему исследования посвящены публикации авторов: Obaid R.R., Habelter T.G., Stack J.R., Silva J.L.H., Cardoso A.J.M., Onel I.Y., Dalci K.B., Senol I.

Целью работы является разработка комбинированной защиты синхронного генератора, позволяющей выявлять межвитковые короткие замыкания в обмотке статора. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Вывод системы дифференциальных уравнений, описывающей переходные процессы в синхронной машине с несимметрией фазных обмоток статора, и составление алгоритма расчета производных для численного решения этой системы.

2. Создание программной реализации математической модели синхронной машины и сравнение результатов моделирования: с результатами, полученными в существующих программных комплексах по расчету переходных процессов в электроэнергетических системах; с осциллограммами и инструментальными замерами на реальной синхронной машине.

3. Анализ переходных процессов в генераторе при межвитковом коротком замыкании в обмотке статора и выявление признаков, позволяющих с высокой точностью и быстродействием определить наличие витковых замыканий в обмотке статора.

4. Разработка алгоритма по выявлению межвитковых коротких замыканий в обмотке статора синхронной машины.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применяются методы математического моделирования переходных процессов, основы системного анализа, теоретических основ электротехники. При построении компьютерных моделей используются численные методы решения систем линейных и дифференциальных уравнений. При выполнении работы также используются программно-вычислительные комплексы расчета переходных процессов MATLAB.

Научная новизна работы:

1. Впервые предложена методика расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов синхронной машины с несимметрией фазных обмоток статора и разработана соответствующая математическая модель.

2. Выполнен анализ переходных процессов при межвитковом коротком замыкании в обмотке статора, проведена оценка чувствительности и селективности существующих методов обнаружения межвитковых коротких замыканий.

3. Определены и проверены новые признаки межвитковых замыканий, позволяющие реализовать чувствительную защиту генераторов с нерасщепленной обмоткой статора от этого вида повреждений.

Практическая значимость работы:

1. Разработана программа для моделирования переходных процессов синхронного генератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором на активно-индуктивную нагрузку, позволяющая учитывать насыщение магнитных систем. Программа позволяет получать расчетные зависимости токов в обмотках и короткозамкнутом контуре от времени при межвитковых замыканиях в различных режимах работы генератора.

2. Предложены признаки для выявления межвитковых коротких замыканий в обмотке статора генератора. На их основе разработан адаптивный алгоритм работы комбинированной защиты генератора, использующий в качестве входной информации параметры режима генератора, измеряемые типовыми устройствами защиты, и позволяющий селективно и с высокой

чувствительностью определять характер и степень повреждения обмотки статора.

Достоверность и обоснованность результатов моделирования переходных процессов в синхронном генераторе с учетом несимметрии фазных обмоток статора обеспечивается путем их сравнения с осциллограммами, полученными на физической модели, и расчетными зависимостями, полученными с помощью эталонной модели в программно-вычислительном комплексе MATLAB.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель синхронного генератора в системе фазных координат, позволяющая исследовать работу синхронной машины при несимметричных режимах.

2. Результаты анализа переходных процессов при межвитковом коротком замыкании в обмотке статора, оценки чувствительности и селективности существующих методов обнаружения межвитковых коротких замыканий.

3. Подход к выявлению межвитковых коротких замыканий в обмотке статора и разработанный на его основе адаптивный алгоритм выявления поврежденной фазы обмотки и доли замкнувшихся витков.

4. Принцип построения и алгоритм функционирования комбинированной защиты генератора.

Публикации и апробация результатов работы. Основные научные материалы исследования и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электрических станций Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации» в 2018, 2019 гг. в г. Новосибирске, на международной научно-технической конференции: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности в 2019 г., в г. Чебоксары, на всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства» в 2018 г. в г. Новосибирске, на международной молодежной научной конференции «Нефть и газ» в 2019 г. в г. Москве, на всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика) в 2019 г. в г. Москве.

По материалам диссертационных исследований автором опубликовано 18 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ; одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; один патент РФ на изобретение; 2 статьи в

изданиях, входящих в базу данных РИНЦ; 12 работ, опубликованных в сборниках международных и всероссийских конференций.

Структура и объем научно-квалификационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Основная часть диссертации изложена на 205 страницах машинописного текста. В работе имеется 91 рисунок и 35 таблиц. Список использованных источников содержит 114 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, поставлены цели и задачи, определены методы исследований, указана научная новизна, определены положения, выносимые на защиту, указана ценность работы.

В первой главе рассмотрена общая характеристика релейной защиты синхронных генераторов, виды аварийных и ненормальных режимов работы синхронных машин. Приведена классификация защит синхронных генераторов по схемам подключения к сети и видам повреждений. Выполнен анализ существующих алгоритмов, методов и устройств обнаружения повреждений в обмотках синхронных машин.

Для защиты от витковых замыканий на генераторах большой мощности, имеющих расщеплённую обмотку статора, применяют специальную поперечную дифференциальную защиту. В нормальном режиме и при внешнем коротком замыкании в параллельных ветвях каждой фазы генератора наводятся одинаковые по значению и фазе ЭДС E_I и E_{II} .

В случае межвиткового замыкания в параллельных ветвях одной фазы появляется разность ЭДС $\Delta E = E_I - E_{II}$, под действием которой в контуре поврежденной фазы возникает уравнивающий ток I_y . Появление уравнивающего тока используется в поперечной дифференциальной защите генератора в качестве признака виткового замыкания. В нормальном режиме и при внешнем коротком замыкании геометрическая сумма токов каждой группы параллельных ветвей фаз, соединенных в звезду, равна нулю. При выборе уставки срабатывания защиты её необходимо отстраивать от возникающего в цепи тока небаланса при внешних КЗ. Таким образом, защита имеет «мертвую» зону и при малой доле замкнувшихся витков может обладать недостаточной чувствительностью. Второй недостаток описываемой защиты кроется в принципе её работы, а именно в невозможности её использования на генераторах, обмотка статора которых не расщеплена. В результате этого поперечная дифференциальная защита применяется лишь на синхронных машинах, у которых статорная обмотка расщеплена на параллельные ветви, в то

время как значительное число генераторов, не имеющих расщепления статорной обмотки, остается без специализированной защиты от витковых замыканий.

Известны методы и средства диагностики технического состояния синхронных и асинхронных машин, основанные на измерении величины температуры, вибрации или анализе акустических характеристик. Однако многие из них идентифицируют результат аварии, не позволяя определить, по какой причине возникло повреждение: технологической перегрузки, из-за витковых замыканий или обрыва фаз статора (ротора), износа подшипников, или др.

Также проводились испытания и предложены методы, основанные на измерении фазных токов и их спектрального состава, в результате анализа которого имеется возможность выявить повреждение обмотки статора и диагностировать состояние подшипниковых узлов. Существует метод определения повреждений путем косвенного измерения активных сопротивлений машины в режиме реального времени, используя то, что сопротивление является величиной, пропорциональной падению напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. Однако результаты измерений по этой методике в значительной степени зависят от температуры, что затрудняет распознавание вида неисправности обмотки машины.

В одной из работ описывается подход к обнаружению повреждения в обмотке статора, основанный на измерении вибрации. Но в случае его использования не имеется возможности отличить повреждения обмотки от повреждения в подшипниках.

Осуществляются также попытки диагностирования внутренних повреждений электрических машин на основе анализа проявляющихся внешних признаков. Одним из таких источников информации о состоянии электрооборудования являются их внешние электромагнитные поля (ВЭМП). Но к настоящему времени математические модели ВЭМП при дефектах (электромагнитных несимметриях статора и ротора СГ) не развиты.

На основании рассмотренных данных и уже проведенных исследований можно сделать вывод о том, что ранняя диагностика и выявление витковых замыканий в синхронном генераторе является весьма актуальной задачей, которая требует детальной проработки, новых подходов и совершенствования алгоритмов, чему и посвящается настоящее исследование.

В главе обозначены направления исследования. Определён подход к созданию математической модели синхронной машины. Рассмотрены особенности математической интерпретации реализуемых моделей, а также используемых методов.

Во второй главе представлены особенности расчета переходных процессов в синхронной машине с несимметрией фазных обмоток статора.

Выведена система дифференциальных уравнений равновесия ЭДС и падений напряжения на выводах синхронной машины независимо для каждой фазной обмотки статора, благодаря этому появилась возможность моделирования переходных процессов в системе с возможными несимметричными режимами, вызванными витковым замыканием в одной из фазных обмоток статора.

Система уравнений в матричном виде записывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} L_{a\Sigma} & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} \\ M_{ab} & L_{b\Sigma} & M_{bc} & M_{bf} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{c\Sigma} & M_{cf} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \\ di_f/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\partial\psi_a/\partial\gamma)\omega - R_{a\Sigma}i_a \\ -(\partial\psi_b/\partial\gamma)\omega - R_{b\Sigma}i_b \\ -(\partial\psi_c/\partial\gamma)\omega - R_{c\Sigma}i_c \\ -(\partial\psi_f/\partial\gamma)\omega - R_f i_f + u_f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $L_{\eta\Sigma} = L_\eta + L_{нг,\eta}$, $R_{\eta\Sigma} = R_\eta + R_{нг,\eta}$ ($\eta = a, b, c$).

Большая часть индуктивностей, входящих в систему уравнений, являются функциями, которые зависят от угла поворота ротора γ .

Частная производная потокосцепления по углу, входящая в систему, определяется как:

$$\frac{\partial\psi_a}{\partial\gamma} = \frac{dL_a}{d\gamma}i_a + \frac{dM_{ab}}{d\gamma}i_b + \frac{dM_{ac}}{d\gamma}i_c + \frac{dM_{af}}{d\gamma}i_f.$$

Разработан алгоритм расчета переходных процессов в генераторе при численном решении системы дифференциальных уравнений, который позволяет определить значения производных $\frac{di_a}{dt}$, $\frac{di_b}{dt}$, $\frac{di_c}{dt}$, $\frac{di_f}{dt}$, $\frac{d\omega}{dt}$ и $\frac{d\gamma}{dt}$ на каждом шаге интегрирования, зная входные параметры i_a , i_b , i_c , i_f , ω , γ .

Выведена система дифференциальных уравнений при подключении синхронной машины к обмотке повышающего трансформатора, соединенной по схеме «треугольник». Система дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{ab}}{dt} = -L_{n.ab} \frac{di_{ab}}{dt} - \left((R_{g.a} + R_{g.b} + R_{n.ab})i_{ab} - R_{g.a}i_{ca} - R_{g.b}i_{bc} \right); \\ \frac{d\psi_{bc}}{dt} = -L_{n.bc} \frac{di_{bc}}{dt} - \left((R_{g.b} + R_{g.c} + R_{n.bc})i_{bc} - R_{g.b}i_{ab} - R_{g.c}i_{ca} \right); \\ \frac{d\psi_{ca}}{dt} = -L_{n.ca} \frac{di_{ca}}{dt} - \left((R_{g.c} + R_{g.a} + R_{n.ca})i_{ca} - R_{g.c}i_{bc} - R_{g.a}i_{ab} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{n,k}$ – активное сопротивление нагрузки ($k = ab, bc, ca$), $L_{n,k}$ – индуктивность нагрузки.

Представлены выражения, позволяющие описать работу синхронной машины с учетом продольных и поперечных демпферных контуров. Уравнения результирующих потокосцеплений продольной и поперечной демпферных обмоток определяются следующими образом:

$$\begin{cases} \psi_{yd} = i_{ab}(M_{ayd} - M_{byd}) + i_{bc}(M_{byd} - M_{cyd}) + \\ + i_{ca}(M_{cyd} - M_{ayd}) + M_{fyd}i_f + L_{yd}i_{yd}; \\ \psi_{yq} = i_{ab}(M_{ayq} - M_{byq}) + i_{bc}(M_{byq} - M_{cyq}) + \\ + i_{ca}(M_{cyq} - M_{ayq}) + L_{yq}i_{yq}. \end{cases} \quad (3)$$

Также приведены расчетные выражения для описания процесса насыщения магнитной системы генератора. Учет насыщения магнитной системы выполнен через коэффициент насыщения, определяемый по характеристике холостого хода. Такой подход позволяет определить реальные значения индуктивностей на каждом шаге интегрирования и, тем самым, повышает точность расчета переходных процессов в синхронной машине.

Для учета насыщения магнитной системы использованы следующие выражения для собственных и взаимных индуктивностей:

$$\begin{cases} L_{\eta} = k_s L_{\eta.ns}, \quad (\eta = a, b, c); \\ M_k = k_s M_{k.ns}, \quad (k = ab, bc, ca), \end{cases} \quad (4)$$

где $L_{\eta.ns}$ и $M_{k.ns}$ – значения собственных и взаимных индуктивностей без учёта насыщения, которые можно определить по паспортным данным машины.

Произведен вывод дифференциальных уравнений для системы генератор-трансформатор-нагрузка. Схема замещения системы представлена на рисунке 1.

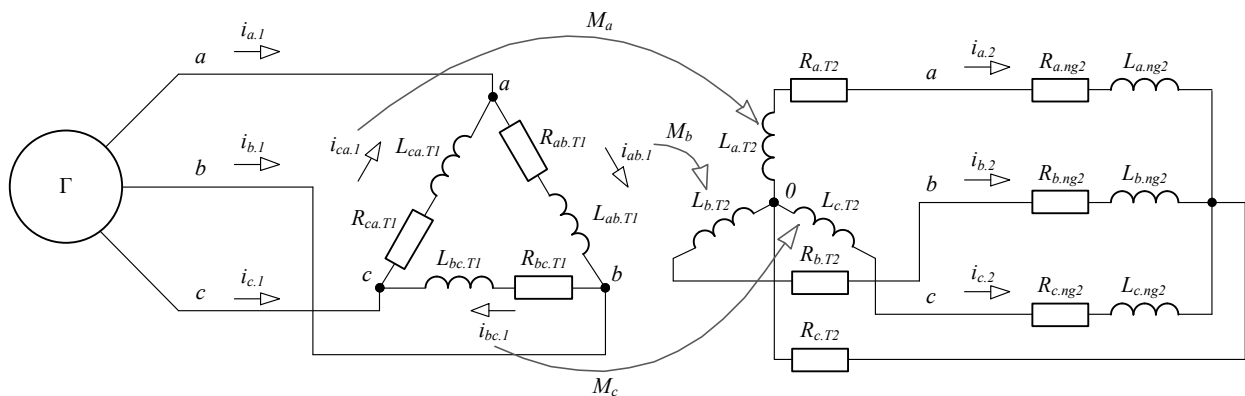


Рисунок 1 - Схема замещения системы генератор-трансформатор-нагрузка

Для расчета системы выведены уравнения равновесия ЭДС и падений напряжений для трансформатора:

$$\begin{cases} u_{abT.1} = (L_{abT.1} + L_{ab\sigma T.1}) \frac{di_{ab.1}}{dt} - M_{bT.1} \frac{di_{b.2}}{dt} + R_{abT.1} i_{ab.1}; \\ u_{bcT.1} = (L_{bcT.1} + L_{bc\sigma T.1}) \frac{di_{bc.1}}{dt} - M_{cT.1} \frac{di_{c.2}}{dt} + R_{bcT.1} i_{bc.1}; \\ u_{caT.1} = (L_{caT.1} + L_{ca\sigma T.1}) \frac{di_{ca.1}}{dt} - M_{aT.1} \frac{di_{a.2}}{dt} + R_{caT.1} i_{ca.1}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{aT.2} = -(L_{aT.2} + L_{a\sigma T.2}) \frac{di_{a.2}}{dt} + M_{aT.1} \frac{di_{ca.1}}{dt} - R_{aT.2} i_{a.2}; \\ u_{bT.2} = -(L_{bT.2} + L_{b\sigma T.2}) \frac{di_{b.2}}{dt} + M_{bT.1} \frac{di_{ab.1}}{dt} - R_{bT.2} i_{b.2}; \\ u_{cT.2} = -(L_{cT.2} + L_{c\sigma T.2}) \frac{di_{c.2}}{dt} + M_{cT.1} \frac{di_{bc.1}}{dt} - R_{cT.2} i_{c.2}, \end{cases} \quad (6)$$

где $L_{kT.1}, L_{k\sigma T.1}$ ($k = ab, bc, ca$) – собственное значение индуктивности первичной обмотки трансформатора, обусловленное основным магнитным потоком и потоком рассеяния соответственно, $M_{\eta T}$ ($\eta = a, b, c$) – взаимная индуктивность обмоток трансформатора, $R_{kT.1}, R_{\eta T.2}$ – активное сопротивление первичной и вторичной обмотки трансформатора, $u_{kT.1}$ – мгновенные значения линейных напряжений на первичной обмотке трансформатора, $\psi_{ij} = \psi_i - \psi_j$.

В третьей главе для реализации предложенной математической модели и алгоритма расчета переходных процессов в синхронном генераторе разработана программа в среде MATLAB.

Для её верификации разработана эталонная модель на базе встроенной библиотеки элементов электроэнергетической системы SimPowerSystems (MATLAB Simulink). Эталонная модель использует традиционный метод расчета переходных процессов синхронной машины, основанный на уравнениях Парка–Горева и непригодный для расчета процессов в машине с несимметрией фазных обмоток статора. Поэтому сравнивались результаты расчета процессов только для симметричных генераторов.

При решении системы дифференциальных уравнений в предложенной программе используется одношаговый явный метод Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка, реализуемый встроенной функцией ode45. Он обладает высокой точностью и является одним из наиболее распространенных численных методов. В программе можно выделить несколько основных фрагментов, краткое описание которых приведено в следующих разделах:

- ввод исходных данных;
- расчет параметров синхронной машины;

- построение характеристики холостого хода;
- определение начальных условий работы;
- описание системы дифференциальных уравнений;
- расчет переходных процессов в генераторе;
- построение зависимостей индуктивностей синхронной машины от угла поворота ротора;
- вывод результатов расчета в графических окнах программы, командную строку и запись в файл.

Сравнение эталонной и предложенной моделей произведено для следующих систем:

- генератор, работающий на автономную активно-индуктивную нагрузку, подключенную по схеме «звезда» с нулевым проводом, не имеющим сопротивления;
- генератор, работающий на автономную нагрузку, подключенную по схеме «треугольник»;
- генератор, подключенный к обмотке повышающего трансформатора, соединенной в «треугольник».

Проверка разработанной модели синхронной машины выполнена в типовых нормальных и аварийных режимах работы:

- нормальный установившийся режим;
- режим холостого хода генератора;
- режим короткого замыкания, которому предшествует режим холостого хода;
- режим короткого замыкания, которому предшествует нормальный установившийся нагрузочный режим.

Также выполнен анализ влияния насыщения магнитных систем синхронной машины и повышающего трансформатора. Рассмотрены примеры моделирования как явнополюсных, так и неявнополюсных синхронных машин.

Структурная схема эталонной модели генератора, подключенного к обмотке повышающего трансформатора, представлена на рисунке 2.

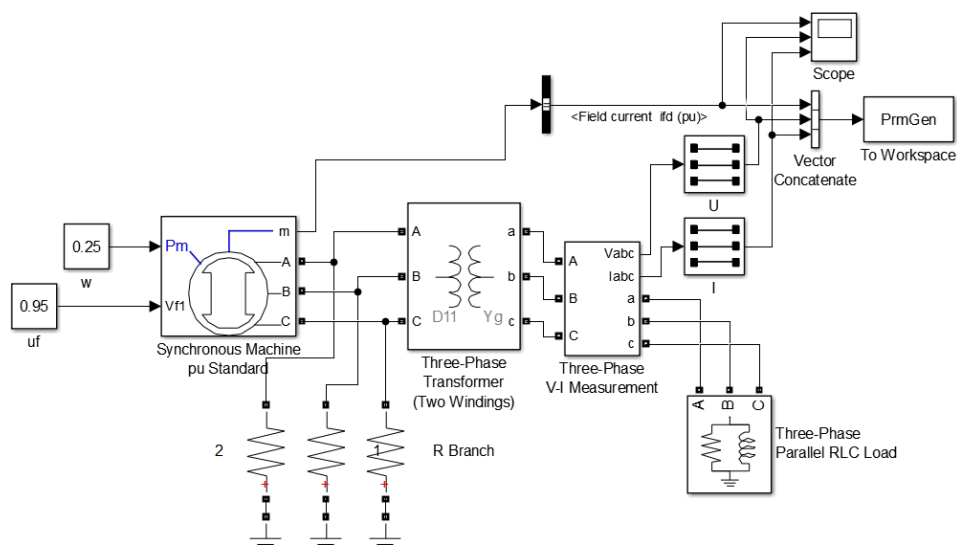


Рисунок 2 - Структурная схема эталонной системы в пакете MATLAB Simulink

Погрешность вычислений при сравнении с эталонной моделью, построенной в среде программного пакета MATLAB Simulink, при схеме подключения нагрузки «звезда» с нулевым проводом составила $\Delta\delta_{u,\max} = 1.7 \div 4\%$ по напряжению, $\Delta\delta_{i,\max} = 1.5 \div 4.6\%$ по току. При схеме подключения нагрузки «треугольник» составила $\Delta\delta_{u,\max} = 0.7 \div 4.3\%$ и $\Delta\delta_{i,\max} = 2.4 \div 4.5\%$ соответственно. Для системы генератор-трансформатор-нагрузка $\Delta\delta_{u,\max} = 1.2 \div 2.0\%$ и $\Delta\delta_{i,\max} = 3.7\%$.

Отклонения в расчетах переходных процессов с учетом насыщения магнитной системы генератора при 3-х фазном КЗ, которому предшествовал нормальный установившийся нагрузочный режим, составили $\Delta\delta_{i,y} = 18.5\%$, $\Delta\delta_{i,f,\max} = 15.8\%$. При расчетах нормального установившегося режима с учетом насыщения магнитной системы генератора отклонения составили: $\Delta\delta_{u,\max} = 10.9\%$, $\Delta\delta_{i,\max} = 7.3\%$, $\Delta\delta_{i,f,\max} = 10\%$.

На основании полученных данных подтверждена необходимость учета демпферных контуров СМ по продольной и поперечной оси, а также насыщения магнитных систем генератора и трансформатора при расчете электромагнитных переходных процессов.

В четвертой главе выполнена достоверизация разработанной модели генератора по результатам осциллографирования токов и напряжений генератора типа МСА-72/4А. Сравнение выполнено при: нормальном установившемся режиме под нагрузкой; в режиме холостого хода генератора; при 3-х фазном коротком замыкании. Результаты достоверизации определения параметров режима генератора в нормальном установившемся режиме под нагрузкой и в режиме холостого хода отображены в таблице 1.

Таблица 1 - Достоверизация разработанной модели генератора

Под нагрузкой ($P_{\text{нагр}} = 1.5 \text{ кВт}$)							Холостой ход			
i_f	$I_{\phi.A}$	$I_{\phi.B}$	$I_{\phi.C}$	$U_{\phi.A}$	$U_{\phi.B}$	$U_{\phi.C}$	i_f	$U_{\phi.A}$	$U_{\phi.B}$	$U_{\phi.C}$
А				В			А	В		
Результаты измерений										
2.92	2.24	2.32	2.3	67.4	67.15	66.75	1.7	38.2	37.9	37.7
3.36	2.5	2.66	2.53	67.85	67.43	66.9	2.75	60	59.7	59.5
7.75	4.375	4.37	4.32	128.8	127.7	128.1	9.8	128.8	127.7	128.7
9.53	4.86	4.82	4.72	139.8	139.6	139	15	144	142	143
Результаты расчетов										
2.9	2.3	2.29	2.3	68.8	68.9	69	1.7	41.3	41.2	41.2
3.3	2.4	2.41	2.41	66.1	66	66.2	2.75	60.8	60.3	60.4
7.7	4.37	4.37	4.32	125.5	125.6	125.6	9.8	128.1	128.2	128.2
9.5	4.77	4.75	4.76	141.8	141.8	141.9	15	144.7	144.4	144.5

Для анализа переходных процессов при витковых замыканиях в обмотке статора генератора, использованного для натуральных испытаний, к проводникам обмотки в лобовых частях были подключены ответвления и проведены испытания с замыканием накоротко выведенной части обмотки при различных режимах работы генератора.

Схема выполнения цепей измерения токов и напряжений для опыта с замыканием контура «1а-2а» фазы «А» генератора представлена на рисунке 3.

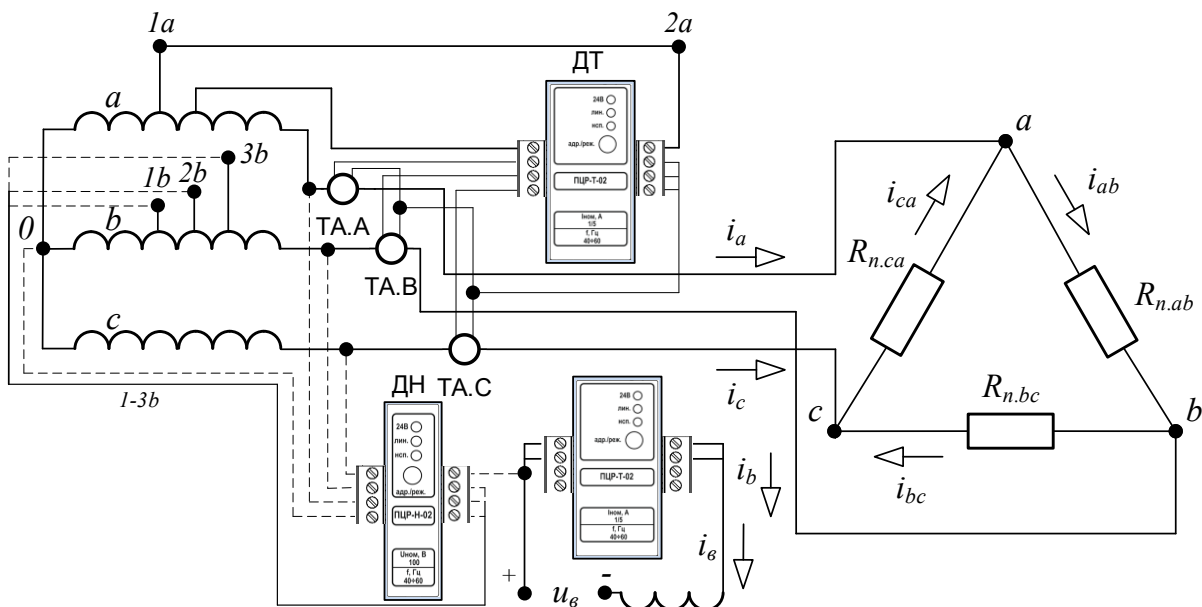


Рисунок 3 - Схема выполнения цепей измерения токов и напряжений для опыта с замыканием контура «1а-2а» фазы «А» генератора

Таблица 2 - Опыт по измерению напряжений на выведенных витках обмотки статора генератора МСА-72/4А

$U_{\phi.A}, \text{В}$	$U_{\phi.B}, \text{В}$	$U_{\phi.C}, \text{В}$	$U_{v.1a}, \text{В}$	$U_{v.2a}, \text{В}$	$U_{v.1b}, \text{В}$	$U_{v.2b}, \text{В}$	$U_{v.3b}, \text{В}$
128.8	128.7	128.5	40.56	56.7	80.1	67.5	64.5

Датчик тока (ДТ) представляет собой измерительный преобразователь ПЦР-Т-02, осуществляющий измерения мгновенных значений токов по четырем каналам. Датчик напряжения (ДН) представляет собой измерительный преобразователь ПЦР-Н-02, осуществляющий измерения мгновенных значений напряжений по четырем каналам. Датчик для измерения токов в обмотке статора подключен ко вторичным обмоткам трансформаторов тока. Для измерения тока возбуждения использован датчик постоянного тока ПЦР-ТП1.

В таблицах 3 и 4 представлены результаты опыта с замыканием накоротко выведенной части обмотки статора при работе генератора под нагрузкой и в режиме холостого хода. Символом «-» в таблице обозначены ответвления, которые замкнуты накоротко. Действующее значение тока в короткозамкнутом витке – I_v .

Таблица 3 - Результаты измерений в установившемся режиме работы машины под нагрузкой при витковом замыкании

i_f	$I_{\phi.A}$	$I_{\phi.B}$	$I_{\phi.C}$	i_v	$U_{\phi.A}$	$U_{\phi.B}$	$U_{\phi.C}$	$U_{v.1a}$	$U_{v.2a}$	$U_{v.1b}$	$U_{v.2b}$	$U_{v.3b}$
	А				В							
0.85	0.625	0.665	0.658	21.9	17.07	16.82	17.42	-	-	10.5	9.1	8.8
2.92	2.23	2.29	2.24	15.4	66.75	66.9	65.7	19.38	27	38.24	-	-
3.31	2.26	2.36	2.42	73.4	61.87	60.82	62.4	-	-	38	33.3	32
7.71	4.3	4.33	4.19	75.1	126.3	127	124.7	36.6	51.1	71.9	-	-
9.5	4.85	4.8	4.73	32.4	139.7	139.3	139.4	40.2	56.5	78.5	-	-

Таблица 4 - Результаты измерений при витковом замыкании в режиме холостого хода генератора

$i_f, \text{А}$	$U_{\phi.A}, \text{В}$	$U_{\phi.B}, \text{В}$	$U_{\phi.C}, \text{В}$	$U_{v.1a}, \text{В}$	$U_{v.2a}, \text{В}$	$U_{v.1b}, \text{В}$	$i_{v.2b-3b}, \text{А}$
0.7	14.9	14.85	14.84	4.8	6.6	9.3	5.8
1.7	38.2	37.9	37.8	12	16.8	23.3	14.1
2.75	60	59.1	59.5	19.2	26.8	37.8	21.2
9.8	128.8	127.7	128.7	40.6	56.7	79.2	-
15	144	142	143.5	-	-	-	-

Составлена система дифференциальных уравнений и разработана модель синхронной машины, в которых учтены появление дополнительного короткозамкнутого контура в поврежденной обмотке статора.

Система уравнений в матричном виде, в которой учтены все контуры синхронной машины с поврежденной обмоткой фазы «А», имеет вид:

$$\begin{bmatrix} L_{a\Sigma} & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{ayd} & M_{ayq} & M_{ak} \\ M_{ab} & L_{b\Sigma} & M_{bc} & M_{bf} & M_{byd} & M_{byq} & M_{bk} \\ M_{ab} & M_{bc} & L_{c\Sigma} & M_{cf} & M_{cyd} & M_{cyq} & M_{ck} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f & M_{fyd} & 0 & M_{fk} \\ M_{ayd} & M_{byd} & M_{cyd} & M_{fyd} & L_{yd} & 0 & M_{ydk} \\ M_{ayq} & M_{byq} & M_{cyq} & 0 & 0 & L_{yq} & M_{yqk} \\ M_{ak} & M_{bk} & M_{ck} & M_{fk} & M_{ydk} & M_{yqk} & L_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \\ di_f/dt \\ di_{yd}/dt \\ di_{yq}/dt \\ di_k/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\partial\psi_a/\partial\gamma)\omega - R_{a\Sigma}i_a \\ -(\partial\psi_b/\partial\gamma)\omega - R_{b\Sigma}i_b \\ -(\partial\psi_c/\partial\gamma)\omega - R_{c\Sigma}i_c \\ -(\partial\psi_f/\partial\gamma)\omega - R_f i_f + u_f \\ -(\partial\psi_{yd}/\partial\gamma)\omega - R_{yd}i_{yd} \\ -(\partial\psi_{yq}/\partial\gamma)\omega - R_{yq}i_{yq} \\ -(\partial\psi_k/\partial\gamma)\omega - R_k i_k \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где индекс «к» при коэффициентах собственной и взаимной индуктивности определяет принадлежность к короткозамкнутому контуру, i_k – мгновенное значение тока в короткозамкнутом контуре, ψ_k – результирующие потокосцепление короткозамкнутого контура, R_k – активное сопротивление контура.

Корректность полученных данных работы генератора в реализуемой программной модели подтверждена сопоставлением результатов расчета с измерениями в реальной синхронной машине. Погрешность вычислений в предложенной модели при сравнении с экспериментальными данными составила: в нормальном установившемся режиме под нагрузкой $\Delta\delta_{u,\max} = 4\%$, $\Delta\delta_{i,\max} = 9\%$; в режиме холостого хода $\Delta\delta_{u,\max} = 8\%$.

Произведена оценка влияния учета дополнительного уравнения для короткозамкнутого контура при решении системы дифференциальных уравнений на моделирование переходных процессов в генераторе. Выявлено, что при доле замкнувшихся витков менее 15%, погрешность составляет не более 7-8%.

Экспериментально подтверждено, что при малой доле замкнувшихся витков одной фазы статора генератора, повреждение меньше 12-15%, величина несимметрии фазных токов и напряжений на выводах генератора недостаточна

для срабатывания существующих защит, реагирующих только на соответствующие токи и напряжения.

Пятая глава посвящена разработке алгоритма по выявлению витковых замыканий в обмотке статора синхронной машины.

В ходе исследования реализована модель генератора с межвитковым коротким замыканием одной из фаз обмотки статора. На основе разработанной модели выполнен анализ переходных процессов при межвитковых замыканиях на примере генератора ТВВ-200-2АУЗ.

Показано, что при малой доле замкнувшихся витков, менее 10%, определить повреждение в обмотке статора по результатам измерения токов, напряжений, расчету потокосцепления обмотки возбуждения или производной тока по времени не представляется возможным.

Известно, что межвитковые КЗ фазной обмотки статора сопровождаются уменьшением сопротивления в поврежденной фазе.

Выражения для определения собственных индуктивностей генератора:

$$\begin{cases} L_a = k_{wa}^2 \{l_0 + l_2 \cos 2\gamma\}; \\ L_b = k_{wb}^2 \{l_0 + l_2 \cos[2(\gamma - 120^\circ)]\}; \\ L_c = k_{wc}^2 \{l_0 + l_2 \cos[2(\gamma + 120^\circ)]\}, \end{cases} \quad (8)$$

где l_0, l_2 – постоянные, которые могут быть определены из паспортных данных синхронной машины.

В уравнения введена переменная $k_{w\eta}$ ($\eta = a, b, c$), отражающая отношение числа фактических витков в обмотке к числу витков в исправном состоянии. Обозначим эту величину коэффициентом межвиткового замыкания. Очевидно, что при исправной обмотке статора её значение равно 1, и индуктивности генератора определяются паспортными значениями. Интерес представляет аварийный режим работы синхронной машины, когда $k_{w\eta} = \text{var}$, то есть заведомо неизвестно, в какой фазе обмотки статора произошло повреждение и неизвестна доля замкнувшихся витков.

Основной задачей является определение коэффициента межвитковых замыканий $k_{w\eta}$ в процессе работы синхронной машины по известным входным параметрам режима: фазные напряжения и токи в обмотках статора; ток и напряжение возбуждения обмотки ротора генератора; угол поворота ротора. Расчет коэффициента межвитковых замыканий на каждом шаге дискретизации позволит найти поврежденную фазу в обмотке статора и построить фактические зависимости индуктивностей от угла поворота генератора. Входные параметры режима в процессе работы реальной синхронной машины можно получить,

например, с помощью измерительных органов релейной защиты генератора, а, используя построенные модели работы генератора, найти расчетные значения $k_{w\eta}$.

В работе сформулированы методы определения коэффициента межвитковых замыканий $k_{w\eta}$ в режиме холостого хода и в нормальном установившемся режиме под нагрузкой. В режиме холостого хода необходимо решить следующую систему уравнений, полученную путем подстановки начальных условий режима в систему (1):

$$\begin{cases} \frac{d\psi_a}{dt} = k_{wa} M_d i_r' \cos \gamma - \omega k_{wa} M_d i_r' \cos(\gamma - \pi/2); \\ \frac{d\psi_b}{dt} = k_{wb} M_d i_r' \cos(\gamma - \rho) - \omega k_{wb} M_d i_r' \cos(\gamma - \pi/2 - \rho); \\ \frac{d\psi_c}{dt} = k_{wc} M_d i_r' \cos(\gamma + \rho) - \omega k_{wc} M_d i_r' \cos(\gamma - \pi/2 + \rho), \end{cases} \quad (9)$$

где $\rho = 2\pi/3$, $i_r' = di_r/dt$ i_r - мгновенное значение тока в обмотке возбуждения генератора.

Если записать уравнение равновесия ЭДС и падения напряжения для одного из контуров обмотки статора генератора, выделяя из выражений для индуктивностей соответствующие коэффициенты межвитковых замыканий, то применительно к фазе А генератора получим следующее равенство:

$$\begin{cases} \left(k_{wa}^2 \frac{dL_a}{d\gamma} i_a + k_{wa} k_{wb} \frac{dM_{ab}}{d\gamma} i_b + k_{wa} k_{wc} \frac{dM_{ac}}{d\gamma} i_c + k_{wa} \frac{dM_{af}}{d\gamma} i_f + \right. \\ \left. + k_{wa} \frac{dM_{ayd}}{d\gamma} i_{yd} + k_{wa} \frac{dM_{ayq}}{d\gamma} i_{yq} \right) \omega + k_{wa}^2 L_a \frac{di_a}{dt} + L_{\text{нр.а}} \frac{di_a}{dt} + \\ + k_{wa} k_{wb} M_{ab} \frac{di_b}{dt} + k_{wa} k_{wc} M_{ac} \frac{di_c}{dt} + k_{wa} M_{af} \frac{di_f}{dt} + \\ \left. k_{wa} M_{ayd} \frac{di_{yd}}{dt} + k_{wa} M_{ayq} \frac{di_{yq}}{dt} + R_{a\Sigma} i_a = 0. \right. \end{cases} \quad (10)$$

При таком виде в уравнении все индуктивности заведомо известны и равны номинальным паспортным значениям. После измерения режимных параметров, которые входят в уравнение (10), неизвестными остаются только коэффициенты $k_{w\eta}$ ($\eta = a, b, c$).

Таким образом, определение коэффициента межвиткового замыкания заключается в решении уравнения равновесия ЭДС и падения напряжения на каждом шаге интегрирования относительно неизвестной переменной k_{wa} .

Для получения достоверных результатов при расчете переходных процессов синхронной машины с витковым замыканием в обмотке статора необходим учет дополнительного короткозамкнутого контура в поврежденной фазе. В результате в системе уравнений появляется дифференциальное уравнение для короткозамкнутого контура.

В ходе исследования разработан адаптивный алгоритм, который способен автоматически определить наличие повреждения в обмотке статора и выполнить необходимые расчеты аварийного режима работы генератора по известным входным параметрам режима, в результате этого выявить поврежденную фазу и определить коэффициент межвитковых замыканий.

Проверка разработанного алгоритма комбинированной защиты генератора выполнена путём анализа записанных осциллограмм аварийного режима, вызванного межвитковым замыканием синхронного генератора типа МСА-72/4А.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получена система дифференциальных уравнений равновесия ЭДС и падений напряжения на выводах синхронной машины в фазных координатах, благодаря чему появилась возможность моделирования переходных процессов в системе с несимметричными режимами, вызванными витковыми замыканиями в фазных обмотках статора. Приведены расчетные выражения для описания насыщения магнитной системы генератора. Выведена система дифференциальных уравнений синхронной машины, подключенной к обмотке повышающего трансформатора, соединенной по схеме «треугольник».

2. Разработан алгоритм расчета переходных процессов в генераторе при численном решении системы дифференциальных уравнений, который позволяет определить значения производных $\frac{di_a}{dt}$, $\frac{di_b}{dt}$, $\frac{di_c}{dt}$, $\frac{di_f}{dt}$, $\frac{d\omega}{dt}$ и $\frac{d\gamma}{dt}$ на каждом шаге интегрирования, по входным параметрам i_a , i_b , i_c , i_f , ω , γ .

3. Для расчетов переходных процессов в синхронном генераторе разработана программа в среде MATLAB, позволяющая учитывать несимметрию фаз обмоток статора в нормальных и аварийных режимах работы. В программе предусмотрена возможность подключения СМ к нагрузке со схемой соединения: «звезда» с нулевым проводом, «треугольник». Также реализована модель системы, состоящей из: синхронной машины, повышающего трансформатора, автономной активно-индуктивной нагрузки. Достоверность расчетного метода, реализованного в модели генератора, подтверждена

посредством её сравнения с моделью, построенной на основе программного пакета MATLAB Simulink.

4. Проведена валидация предложенной модели синхронной машины и подтверждена на практике правильность математического аппарата, а также разработанного алгоритма, основанного на численном решении системы дифференциальных уравнений.

5. Выполнено исследование переходных процессов при витковых замыканиях в различных режимах работы синхронной машины. Экспериментально подтверждено, что при малой доле замкнувшихся витков одной фазы статора, величина несимметрии фазных токов и напряжений на выводах генератора недостаточна для срабатывания существующих защит, реагирующих только на соответствующие токи и напряжения.

6. Составлена система дифференциальных уравнений и модель поврежденной синхронной машины, учитывающая появление дополнительного короткозамкнутого контура в поврежденной обмотке статора. Произведена оценка влияния короткозамкнутого контура на результаты моделирования переходных процессов в генераторе.

7. Сформулированы новые критерии определения межвитковых коротких замыканий в обмотке статора синхронной машины. На их основе разработан адаптивный алгоритм выявления поврежденной фазы обмотки и расчета доли замкнувшихся витков. Алгоритм является основой способа комбинированной защиты генератора от витковых замыканий в обмотке статора.

8. Составлена функциональная схема устройства комбинированной защиты генератора и блок-схема формирования управляющего воздействия на отключение выключателя и останов генератора. Подтверждено, что разработанный принцип комбинированной защиты отстроен от внешних несимметричных режимов.

9. Выполнена проверка разработанного алгоритма комбинированной защиты с использованием в качестве входных данных, формируемых в соответствии с осциллограммами аварийного режима работы генератора с витковым замыканием в обмотке статора. Используемые при формировании входных сигналов осциллограммы записаны в различных режимах работы генератора, поврежденной фазе и степени повреждения обмотки. По опытным данным выполнена оценка погрешности расчета коэффициента витковых замыканий через сравнение с эталонным значением, которое получено в результате эксперимента.

10. Проведена проверка срабатывания реагирующего органа комбинированной защиты в ходе обработки записанных осциллограмм

аварийного режима, вызванного межвитковым замыканием, через алгоритм в виде фрагмента кода программы в среде MATLAB.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов (из перечня ВАК):

1. Митрофанов Н. А. Разработка модели синхронного генератора для анализа витковых замыканий в обмотке статора / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // Электроэнергия: передача и распределение, ISSN 2218 3116. – 2018. – № 6(51). – С. 94–99.

2. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных контуров статора, работающего на нагрузку со схемой соединения «треугольник» / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // Новое в российской электроэнергетике, ISSN 2312-055X. – 2018. – № 11. – С. 70–80.

3. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных обмоток статора и насыщением магнитной системы / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // Вестник Иркутского государственного технического университета, ISSN 1814-3520. – 2018. – № 11. – С. 97–111.

4. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов в системе генератора-трансформатор-нагрузка с несимметрией фазных контуров статора / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // Промышленная Энергетика, – 2019. – № 1. – С. 17–24.

Научные публикации в других изданиях:

5. Mitrofanov N. A. Simulation of transient with Asymmetry of stator phase circuits / Alferov I. V., Glazyrin G. V., Mitrofanov N. A. // International theoretical and practical conference on alternative and smart energy TPCASE 2018. – 2018. December 6-8. –p. 205–212.

6. Митрофанов Н. А. Разработка математической модели синхронной машины для определения витковых замыканий в обмотке статора/ Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2019. – №2. – С. 48–56.

7. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных контуров статора, работающего на нагрузку со схемой соединения «треугольник» / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2019. – №4. – С. 37–46.

8. Митрофанов Н. А. Моделирование работы синхронного генератора с несимметрией фазных обмоток статора и насыщением магнитопровода / Митрофанов Н. А. // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 14-я Международная

конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. Т.2: материалы конференции. –Тула: Изд-во ТулГУ, – 2018. – С. 205–213.

9. Митрофанов Н. А. Моделирование работы синхронной машины с несимметрией фазных обмоток статора и насыщением магнитной системы / Митрофанов Н. А. // Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук: сборник научных статей по итогам работы пятого международного круглого стола. – Казань: ООО «Конверт», – 2018. – С. 15–21. ISBN 978-5-6041678-4-7.

10. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных контуров статора / Алферов И. В., Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // Международная научно-практическая конференция: «Альтернативная и интеллектуальная энергетика». – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», – 2018. – С. 113, 114.

11. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных контуров статора / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // XII Всероссийская научная конференция молодых ученых: «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, – 2018. – С. 148–152.

12. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных контуров статора / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А. // II Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, – 2018. – С. 395–400.

13. Митрофанов Н. А. Моделирование работы генератора с несимметрией фазных обмоток статора и насыщением магнитопровода / Митрофанов Н. А. // Международная научно-практическая конференция: Электроэнергетика: проблемы и перспективы развития энергетики региона, – Душанбе: ТТУ, –2018. – С. 328–333.

14. Митрофанов Н. А. Разработка модели синхронного генератора для анализа витковых замыканий в обмотке статора / Митрофанов Н. А. // 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ». –Москва: РГУ Нефти и газа им. И. М. Губкина, –2019. – С. 460–461.

15. Митрофанов Н. А. Разработка модели синхронного генератора для анализа витковых замыканий в обмотке статора / Митрофанов Н. А. // III Арктическая совместная конференция ООО «Газпром добыча Уренгой» и ООО «Газпром добыча Ямбург». –Новый-Уренгой: ООО «Газпром добыча Ямбург», – 2019. – С. 136–137.

16. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов в автономной энергосистеме с несимметрией фазных обмоток статора генератора / Митрофанов Н. А. // III Всероссийская научная конференция молодых ученых: «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, – 2019. – С. 147–150.

17. Митрофанов Н. А. Разработка защиты от витковых замыканий в обмотке статора генератора / Митрофанов Н. А. // VIII Молодежная международная научно-практическая конференция: «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность». – Москва: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», – 2019. – С. 67.

18. Митрофанов Н. А. Моделирование переходных процессов в автономной энергосистеме с несимметрией фазных обмоток статора генератора / Митрофанов Н. А. // III Международная научно-техническая конференция: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. – Чебоксары: ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», – 2019. – С. 305–310.

Патент на изобретение:

1. Пат. Российская Федерация № 2749914, МПК Н 02 К 11/10, Н 02 Н 7/08. Способ комбинированной защиты машин переменного тока от витковых замыканий в обмотке статора / Глазырин Г. В., Митрофанов Н. А.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет. - № 2020125255/07; заявл. 30.07.2020; опубл. 21.06.2021, Бюл. № 18. – 2 с.

Свидетельство на программу для ЭВМ:

1. Моделирование переходных процессов в синхронном генераторе с несимметрией фазных обмоток статора: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616493 Российская Федерация / Митрофанов Н. А., Глазырин Г. В. 2020614739 заявл. 26.05.2020; опубл. 18.06.2020, Бюл. № 6. – 1 с.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 X 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 391. Подписано в печать 22.10.2021 г.