

На правах рукописи



Фролов Михаил Юрьевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ МАШИН В
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Фишов Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Бердин Александр Сергеевич**
Доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Уральский энергетический институт, профессор

Андреев Михаил Владимирович
Кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научно-исследовательская лаборатория «Моделирование электроэнергетических систем», заведующий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Защита состоится: «11» октября 2018 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=16861

Автореферат разослан «__» июль 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Русина А. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В электроэнергетике в подавляющем большинстве случаев в качестве генераторов используются синхронные машины из-за высокого КПД, способности регулировать напряжение и частоту, способности генерировать не только активную, но и реактивную мощность. Синхронные машины также широко используются в качестве двигателей из-за способности сохранять неизменную скорость вращения при изменении нагрузочного момента и регулировать реактивную мощность, что позволяет повысить статическую и динамическую устойчивость. Параметры синхронной машины: сопротивления, постоянные времени и т. д., необходимы для построения цифровых моделей электроэнергетических систем, чтобы производить расчёты нормальных, аварийных и послеаварийных режимов, например, для настройки ряда автоматик и релейных защит. Естественно, чем точнее будут определены параметры оборудования, тем качественней будут расчёты и адекватнее управляющие воздействия, выдаваемые автоматикой. В основном, базы данных с параметрами оборудования для цифровых моделей формируются из паспортных данных, однако это сопряжено с рядом недостатков. Во-первых, реальные параметры могут значительно отличаться от паспортных. В паспорте серийно произведённого оборудования, обычно, указываются не параметры конкретной единицы техники, а усреднённые параметры всей серии. Изменение параметров происходит в результате насыщения магнитопровода, изменений температуры, старения и ремонта оборудования. Во-вторых, базы данных формируются вручную, это занимает большое количество времени, не позволяет своевременно производить корректировки. Не стоит исключать и человеческий фактор – возможны элементарные ошибки. Всё это приводит к тому, что в ряде случаев результаты моделирования не адекватны реальным данным и закономерным последствиям.

Внедрение новых систем измерений и обмена информацией, например, синхронизированных векторных измерений, позволяет создавать системы с автоматической идентификацией параметров оборудования, включённого в электрическую сеть, и формировать базы данных для моделей с необходимой точностью.

Следует также отметить, что в настоящее время в ЭС всё чаще появляются небольшие когенерационные станции (до 25 МВА) с генераторами малой мощности, которые становятся всё более конкурентоспособными из-за уменьшения потерь за счёт близости к потребителю, отсутствия необходимости строительства протяжённых линий электропередач, использованию ко-

тригенерации и легкого доступа к топливу благодаря активной газификации страны. Подобные станции, как правило, работают изолированно от крупных энергосистем, в которых существует централизованное диспетчерское управление, однако, если бы они могли соединяться между собой через распределительные сети низкого напряжения и/или присоединяться к крупным энергосистемам, это бы привело к ряду положительных системных эффектов: выравнивание суточных графиков, повышение надёжности, экономичности и т.д. Распределённая малая генерация может также предоставлять услуги крупным энергосистемам, например, продавать излишки электроэнергии в сеть и получать услуги, например по регулированию частоты. То есть, можно с уверенностью сказать, что появилась потребность в модернизации современного уклада электроэнергетики, при котором будет реализовано органичное и взаимовыгодное совместное существование традиционной крупной и малой распределённой генерации.

Однако, существует ряд технических и экономических ограничений, препятствующих свободному доступу нового генерирующего оборудования в распределительную сеть. Первым делом возникает вопрос о реализации управления распределительными сетями, в которых присутствуют не только пассивные, но и активные элементы. Оперативно-диспетчерское управление подобными сетями представляется невыгодным с технической и экономической точек зрения. Возникает необходимость в создании полностью автоматического (умного) управления подобными сетями, для реализации которого необходимо в темпе процесса получать достоверные данные о параметрах режима в генерирующих и нагрузочных узлах, а также параметров оборудования, включённого в сеть. При реализации концепции умных сетей вопросы идентификации параметров оборудования становятся одними из главных, без решения которых невозможно предоставить свободный доступ в сеть новых элементов. По сути, электрическая сеть должна сама определять тип и параметры оборудования, а также проводить автоматическую настройку соответствующих автоматик, корректировать уставки релейных защит и всё это в онлайн режиме.

Степень разработанности темы.

Задачам идентификации в электроэнергетике посвящены работы следующих авторов: Веников В. А., Горев А. А., Вольдек А. И., Жерве Г. К., Иванов-Смоленский А. В. В последние годы задачам идентификации были посвящены труды следующих авторов: Бердин А. С., Андреев М. А., Коваленко П. Ю., Чершова В. О., Дехтерёв А. И., Тутундаева Д. В., Шиллер М. А. Kyriakides E, Heydt G, Malik O. P., Karrari M. и многие другие.

В литературе описано множество методов определения параметров электрических машин, однако, они либо требуют создания опасных режимов, таких как короткое замыкание, либо лабораторных установок и дорогостоящего оборудования, поэтому существует потребность в разработке способов управления и методов идентификации параметров синхронной машины в эксплуатационных режимах, лишённых указанных недостатков.

Объект исследования – синхронные машины; эксплуатационные режимы синхронных машин, работающих в электрической сети; электрические сети с распределённой малой генерацией.

Предмет исследования – способы управления синхронной машиной и методы параметрической идентификации синхронной машины.

Цель работы – разработка и исследование новых способов управления и методов идентификации параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах для режимной, противоаварийной автоматик и релейной защиты.

Для достижения сформулированной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ возможностей управления режимами энергетических систем для задач идентификации.
2. Анализ существующих методов идентификации параметров синхронных машин.
3. Разработка способов управления и методов параметрической идентификации синхронных машин, применимых в условиях эксплуатации.
4. Проведение исследований разработанных способов управления и методов идентификации на предмет возможности интеграции их в систему управления синхронной машиной.
5. Разработка мер повышения достоверности результатов идентификации и формулирование рекомендаций по использованию методов в эксплуатационных режимах.
6. Интеграция способов управления в систему управления малой генерацией с экспериментальной проверкой на электродинамической модели работоспособности предложенных алгоритмов управления и методов идентификации.

Методы исследования.

- Методы имитационного моделирования на цифровых и физических моделях.
- Методы верификации моделей.
- Методы идентификации параметров модели.
- Эксперименты на цифровой и физической моделях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Развитие технологий SMART GRID применительно к электрическим сетям с распределенной малой синхронной генерацией невозможно без разработки и реализации в системах управления режимами такими объектами средств и способов параметрической идентификации синхронных генераторов, работающих в режиме реального времени.

2. Модификация технологических операций с изменением режима работы АРВ при включении синхронных машин в электрическую сеть позволяет создавать благоприятные условия для идентификации их параметров по осциллограммам переходного процесса.

3. Достаточным набором регистрируемых параметров для параметрической идентификации синхронных машин при их включении в электрическую сеть являются токи, напряжения статора и ротора, угол ротора.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена методика определения сверхпереходных, переходных, постоянных составляющих токов и напряжений статора в продольной и поперечной осях в темпе процесса при резком изменении режимных параметров.

2. Разработаны новые способы управления включением синхронных машин в электрическую сеть и методы их параметрической идентификации по осциллограммам процессов.

3. Осуществлена интеграция разработанных способов и методов в систему управления режимами малой генерации, включённой в электрическую сеть энергосистемы.

Практическая значимость результатов работы

Разработанные способы управления и методы идентификации параметров синхронных машин способствуют реализации системы со свободным доступом малой генерации в электрическую сеть и создают возможности для организации энергетической системы с автоматической настройкой режимной, противоаварийной автоматик и релейной защиты.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Полученные соискателем основные научные результаты соответствуют пункту 2 «Разработка методов анализа режимных параметров основного оборудования электростанций», пункту 7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

Достоверность результатов и выводов подтверждена корректным теоретическим обоснованием, сравнением результатов применения

разработанных методов параметрической идентификации синхронных машин с результатами применения традиционных методов определения параметров, полученными при исследовании на цифровых и физических моделях электроэнергетической системы.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ, I международной научной конференции молодых учёных «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (Новосибирск 2014), всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2014), XXI международном форуме «2016 11th International Forum on Strategic Technology» (Новосибирск 2016), всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2016), международной научно-технической веб-конференции "Энергетика: состояние, проблемы, перспективы" (Бишкек, Новосибирск 2017)

Публикации

По результатам исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 научных статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 10 публикаций в международных и российских изданиях, материалах международных и всероссийских конференций, 1 патент на изобретение РФ.

Личный вклад соискателя

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка и исследование способов управления включением синхронной машиной в электрическую сеть и методов её параметрической идентификации на цифровой и физической моделях энергосистем, анализ и обобщение результатов.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, списка терминов, библиографического списка литературы, включающего в себя 91 наименований, и 2 приложений. Общий объём работы составляет 124 страницы, включая 10 таблиц и 18 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В главе 1 рассмотрены основные тренды развития электроэнергетики. Особое внимание уделено электрическим сетям с распределённой малой генерацией и их управлению. Рассмотрено развитие задач управления режимами электроэнергетических систем. Параметрическая идентификация элементов сети рассмотрена как основа управления режимами электрических сетей.

Одним из основных трендов электроэнергетики является развитие малой генерации в распределительных электрических сетях, которая имеет ряд преимуществ перед традиционным централизованным электроснабжением, главными из которых являются близость к потребителю и короткие сроки окупаемости. С появлением генерации в распределительной сети появляется ряд негативных эффектов, связанных с устойчивостью, увеличением токов короткого замыкания, усложнением релейной защиты. Кроме того, к подобным сетям предъявляются современные требования по реализации открытой сетевой архитектуры, которая подразумевает свободный доступ оборудования в сеть. Из-за возможного «хаотичного» подключения и огромного количества элементов сети централизованное диспетчерское управление в данном случае технически и экономически не выгодно, поэтому необходимо создать автоматическое децентрализованное управления подобными системами. Так как отдельные субъекты сети преследуют свои собственные цели целесообразным видится организация мультиагентного управления режимом электрической сети с распределённой генерацией. Под мультиагентным регулированием понимается вся совокупность мер, принимаемых каждым из субъектов, участвующим в регулировании режима (сетевой компанией, потребителем электроэнергии, генерацией), для достижения собственных целей в рамках единых принципов и правил, обеспечивающих компромиссный режим ЭС.

Для подобного управления режимами и организации доступа в сеть задачи идентификации становятся одними из главных, без решения которых осуществление подобных систем весьма сомнительно. Возникает потребность в разработке plug & play технологий, позволяющих идентифицировать вид и параметры оборудования, включаемого в сеть, и на основании этих параметров производить автоматическую настройку релейной защиты и режимной автоматики, тем самым повышая адекватность управляющих воздействий. Реализации подобного подхода способствует внедрение систем синхронизированных векторных измерений, как неотъемлемой составляющей, концепции Smart Grid.

Глава 2 посвящена задаче идентификации параметров математических моделей, методам идентификации и моделям синхронных машин. Проанализированы существующие подходы и методы идентификации параметров

синхронных машин, области их применения, на основе чего сделаны выводы о необходимости создания новых способов управления и методов идентификации для решения современных задач управления.

Анализ существующих способов и методов идентификации параметров синхронных машин показал, что они обладают одним или несколькими из следующих недостатков:

- создание опасных для машины режимов;
- наличие дополнительного дорогостоящего оборудования или лабораторных установок;
- вмешательство в нормальный процесс эксплуатации машины;
- применение неоправданно сложного математического аппарата;
- невозможность проведения идентификации в режиме реального времени.

Для интеграции в систему управления малой генерации необходимо иметь методы параметрической идентификации, лишённые перечисленных недостатков, поэтому возникла необходимость в создании новых методов идентификации.

Идентификация объектов, в общем случае, состоит в определении их структуры (структурная идентификация) и параметров (параметрическая идентификация) по наблюдаемым данным – входному воздействию и выходным величинам. Так как синхронная машина хорошо изучена и имеется достаточное количество математических моделей, описывающих процессы в ней с той или иной точностью, то задача сводится к выбору наиболее подходящей модели и параметрической идентификации.

Математическую модель синхронной машины с обмоткой возбуждения и двумя эквивалентными демпферными контурами по продольной и поперечной осям, изображённой на рисунке 1, можно представить полными уравнениями Парка-Горева (1) в относительных номинальных единицах.

$$\begin{aligned}
 u_d &= -\frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q - i_d r \\
 u_q &= -\frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d - i_q r \\
 u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + i_f r_f \\
 0 &= \frac{d\Psi_D}{dt} + i_D r_D \\
 0 &= \frac{d\Psi_Q}{dt} + i_Q r_Q
 \end{aligned} \tag{1}$$

где потокосцепления обмоток можно найти из сумм потоков:

$$\begin{aligned}
\Psi_d &= -L_d i_d + L_{ad} i_f + L_{ad} i_D \\
\Psi_q &= -L_q i_q + L_{aq} i_Q \\
\Psi_f &= -\frac{3}{2} L_{ad} i_d + L_F i_f + L_{ad} i_D \\
\Psi_D &= -\frac{3}{2} L_{ad} i_d + L_{ad} i_f + L_D i_D \\
\Psi_Q &= -\frac{3}{2} L_{aq} i_q + L_Q i_Q
\end{aligned} \tag{2}$$

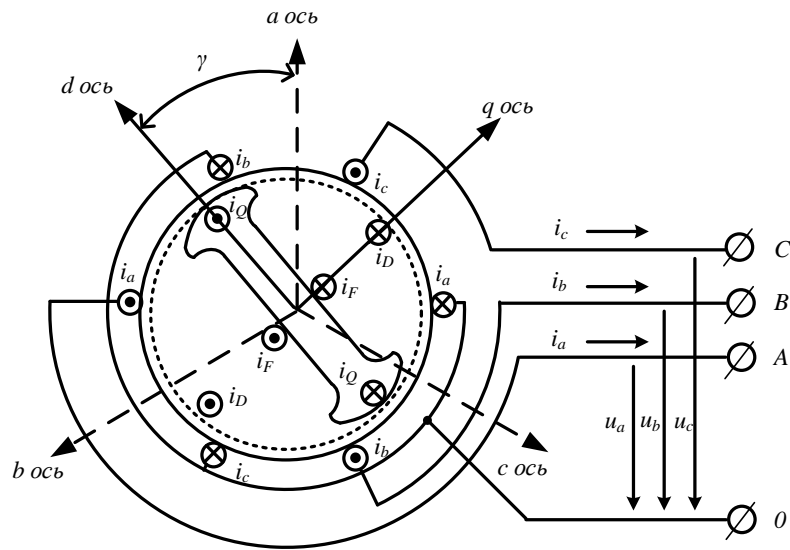


Рисунок 1 - Синхронная машина с взаимным расположением осей abc и qd

В системах (1), (2) буквами Ψ , i , u , L , r , обозначаются потокосцепления, токи, напряжения, индуктивности и активные сопротивления соответственно, индексы при которых обозначают: d , D - параметры и переменные контуров по продольной оси; q , Q - по поперечной; f - ротора; s - статора; ad , aq - взаимные индуктивности. Индексы строчными буквами отражают принадлежность к цепям статора и/или возбуждения, заглавными буквами к цепям демпферных контуров. Подставив выражения для потокосцеплений в уравнения Парка – Горева получим:

$$\begin{aligned}
u_d &= -i'_d L_d - i'_f L_{ad} - i'_D L_{ad} - \omega i_q L_q - \omega i_Q L_{aq} - i_d r \\
u_q &= -i'_q L_q - i'_Q L_{aq} + \omega i_d L_d + \omega i_f L_{ad} + \omega i_D L_{ad} - i_q r \\
u_f &= i'_d L_{ad} + i'_f L_F + i'_D L_{ad} + i_f r_f \\
0 &= i'_d L_{ad} + i'_f L_{ad} + i'_D L_D + i_D r_D \\
0 &= i'_q L_{aq} + i'_Q L_Q + i_Q r_Q
\end{aligned} \tag{3}$$

Система (3) связывает токи и напряжения статора и ротора (i_f , u_f , i_d , i_q , u_d , u_q , i_D , i_Q) и их производные (обозначены штрихами) с параметрами синхронной

машины ($r, r_f, r_D, r_Q, L_d, L_q, L_F, L_D, L_Q, L_{ad}, L_{aq}$). Для решения практических задач чаще используются упрощённые уравнения. В качестве упрощения принимают угловую скорость ротора неизменной ($\omega = \text{const}$), тогда первые два уравнения системы (1) примут вид:

$$\begin{aligned} U_d &= -\omega\Psi_q - i_d r \\ U_q &= \omega\Psi_d - i_q r \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив в выражения (4) первые два уравнения из (2) после некоторых преобразований и ввода обозначений можно получить:

$$\begin{aligned} E_q'' &= x_d'' I_d + r I_q + U_q \\ E_q' &= x_d' I_d + r I_q + U_q \\ E_q &= x_d I_d + r I_q + U_q \\ x_q'' I_q &= r I_d + U_d + E_d'' \\ x_q I_q &= r I_d + U_d + E_d \end{aligned} \quad (5)$$

Приняты следующие обозначения: E_q'', E_q', E_q , - сверхпереходная, переходная и установившаяся ЭСД по поперечной оси; E_d'', E_d , - сверхпереходная и установившаяся ЭСД по продольной оси; x_d'', x_d', x_d - сверхпереходное, переходное и установившееся синхронные индуктивные сопротивления по продольной оси; x_q'', x_q - сверхпереходное и установившееся синхронные индуктивные сопротивления по поперечной оси.

На основании системы (5) можно построить векторную диаграмму машины, из которой для неявнополюсной машины можно получить выражение:

$$E_q = \sqrt{\left(U + \frac{Qx_d}{U}\right)^2 + \left(\frac{Px_d}{U}\right)^2}, \quad (6)$$

где U – напряжение на шинах генератора, P - активная мощность, выдаваемая в электрическую сеть, Q - реактивная мощность в электрическую сеть.

Выражения (3), (5), (6) были выбраны в качестве математических моделей для разработки методов идентификации параметров синхронных машин.

В третьей главе 3 разработаны способы управления включением синхронной машины в электрическую сеть и методы идентификации параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах. Разработана методика обработки осциллограмм переходного процесса для задачи идентификации.

На кафедре АЭЭС НГТУ разрабатывается автоматическая система управления, позволяющая осуществлять управление режимом электрической распределительной сети с объектами малой синхронной генерации. В эту систему входит автоматика контроля запасов статической устойчивости параллельной работы электростанции и внешней электрической сети, для работы которой

необходимо иметь данные о режиме, которые могут быть получены из синхронизированных векторных измерений, и определить синхронное индуктивное сопротивление x_d .

Рассмотрим выражение (6). Режимные параметры (P , Q , U) будем считать известными, так как их можно получить при непосредственном измерении на шинах генератора. ЭДС E_q находится за падением напряжения на сопротивлении x_d , напрямую его измерить невозможно, поэтому будем считать ЭДС неизвестной. Задача состоит в определении сопротивления x_d .

Метод идентификации синхронного индуктивного сопротивления x_d , который состоит в следующем. Для того чтобы определить неизвестные необходимо, чтобы количество неизвестных было не меньше числа линейно независимых уравнений. Для этого составим систему из двух уравнений, но с разными коэффициентами, за счёт использования различных режимов машины. Параметры с индексом 1 соответствуют первому режиму, с индексом 2 второму режиму.

$$\begin{cases} E_q = \sqrt{\left(U_1 + \frac{Q_1 x_d}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{P_1 x_d}{U_1}\right)^2} \\ E_q = \sqrt{\left(U_2 + \frac{Q_2 x_d}{U_2}\right)^2 + \left(\frac{P_2 x_d}{U_2}\right)^2} \end{cases} \quad (7)$$

Чтобы количество неизвестных в системе (7) совпадало с количеством уравнений, необходимо, чтобы ЭДС в первом и во втором режиме были равны. Такое возможно только в том случае, если в обоих установившихся режимах у синхронной машины будет одинаковый ток возбуждения, поэтому при переходе от одного режима к другому необходимо отключить автоматическое регулирование возбуждения и изменять режим только за счёт изменения механического момента на валу ротора машины. Для синхронного генератора это изменение происходит за счёт приводного механизма, а для синхронного двигателя за счёт изменения нагрузки. При выполнении вышеописанных условий система (7) имеет решение. Приравняв правые части и выразив x_d , получим:

$$x_{d1,2} = \frac{-(Q_1 - Q_2) \pm \sqrt{(Q_1 - Q_2)^2 - \left(\frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} - \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}\right)(U_1^2 - U_2^2)}}{\left(\frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} - \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}\right)} \quad (8)$$

Уравнение (8) имеет два корня, отрицательный не имеет физического смысла, положительный корень будет являться синхронным индуктивным сопротивлением x_d .

Для создания необходимых режимов и условий для идентификации x_d , предлагаемым методом, разработан **способ управления включением синхронной машины электрическую сеть**, который состоит из следующей последовательности действий:

- запускают первичный двигатель и подают напряжение на обмотку возбуждения;
- выполняют условия точной синхронизации с электрической сетью на генераторном выключателе;
- выводят из работы автоматический регулятор возбуждения (АРВ) синхронного генератора;
- включают генераторный выключатель с синхронизацией и производят измерение напряжения в получившемся установившемся режиме;
- загружают генератор по активной мощности, увеличивая мощность турбины на 5-10 % от номинала, и производят измерение напряжения, активной и реактивной мощностей в получившемся установившемся режиме;
- вводят автоматический регулятор возбуждения в работу и эксплуатируют машину в необходимом режиме.

Для решения всего комплекса задач релейной защиты и автоматики, как правило, не достаточно знать только величину x_d машины, поэтому разработан метод, позволяющий при включении синхронной машины в электрическую сеть идентифицировать все необходимые параметры синхронного генератора.

Идея разработанного **метода параметрической идентификации синхронной машины при включении в сеть** состоит в том, что генератор включается в сеть с нарушением условий точной синхронизации, при этом возникает переходной процесс достаточный для параметрической идентификации. Во время данного переходного процесса осциллографируются токи и напряжения на выводах генератора всех трёх фаз и угол ротора генератора γ (угол между осью a и d). По полученным осциллограммам и используя выражения (5) определяются параметры машины.

Чтобы переходной процесс имел, в основном, электромагнитный, а не электромеханический характер, нарушение условий синхронизации необходимо выполнять за счёт создания разности в амплитудах напряжения по концам генераторного выключателя при сохранении строгости выполнения остальных условий. Рассмотрим режимы, возникающие при подобном включении, на векторных диаграммах, которые устанавливают связь между режимными параметрами и электромагнитными параметрами генератора.

Исходный режим – холостой ход. Его векторная диаграмма изображена на рисунке 2 а). Так как в этом режиме обмотка статора разомкнута и ток в ней не протекает, следовательно, падение напряжения на сопротивлении машины отсутствует, поэтому, измерив напряжение на выводах генератора, можно определить ЭДС E_q, E'_q, E''_q .

Режим, возникающий после коммутации, можно разделить на три составляющие: сверхпереходный, характеризующийся сверхпереходной ЭДС E''_q и сверхпереходным индуктивным сопротивлением x''_d ; переходный, характеризующийся переходной ЭДС E'_q и переходным индуктивным сопротивлением x'_d ; и вынужденный, идентичный установившемуся режиму, характеризующийся ЭДС E_q и индуктивным сопротивлением x_d ; На рисунке 2 б) представлена векторная диаграмма машины на момент коммутации, учитывающая сверхпереходный процесс, обусловленный демпферной обмоткой, на рисунке в) изображена векторная диаграмма на момент коммутации без учёта влияния демпферной обмотки, и на рисунке 2 г) изображена векторная диаграмма синхронной машины в установившемся режиме.

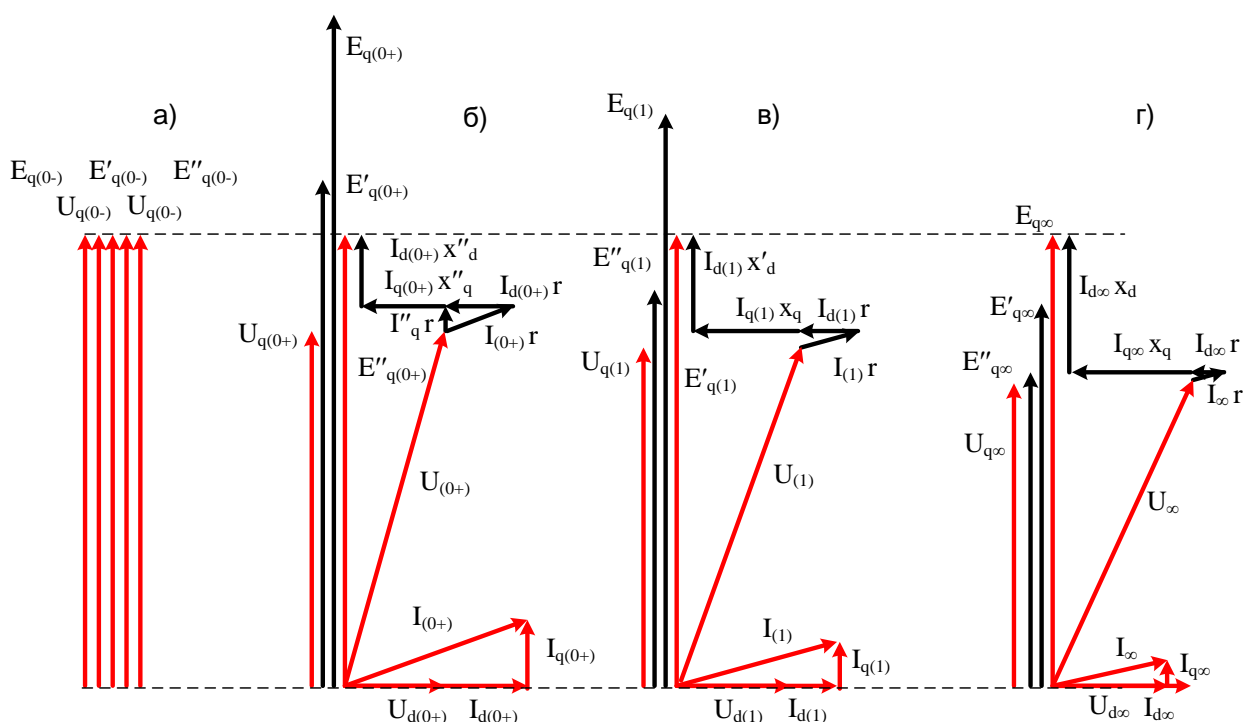


Рисунок 2 - Векторные диаграммы синхронной машины: а) режим холостого хода, б) в первый момент коммутации, в) после затухания токов в демпферной обмотке (без учёта затухания токов в обмотке возбуждения) г) установившийся режим.

Исходя из первого закона коммутации при коммутации цепи с индуктивностями (обмотке возбуждения, демпферными обмотками) суммарное потокосцепление, а, следовательно, и ЭДС E''_q скачком измениться не могут,

поэтому E''_q на диаграмме б) известна и равна напряжению на выводах генератора в режиме холостого хода. Если рассуждать аналогично, то можно утверждать, что E'_q на диаграмме в) тоже равна напряжению холостого хода. После затухания переходного режима E_q станет равной напряжению холостого хода благодаря исключению влияния регулятора возбуждения. Исходя из того, что начальный режим - холостой ход, а потокосцепление демпферной обмотки скачком измениться не может, то $E''_d=0$. В итоге задача заключается в определении векторов падений напряжений на сопротивлениях машины.

Если вычесть из переходного процесса сверхпереходную составляющую, то E_d будет равняться нулю. Тогда уравнение из (5) для падения напряжения на сопротивлении x_q в функции от времени будет иметь вид:

$$x_q i_q(t) = r i_d(t) + u_d(t). \quad (9)$$

В данном уравнении две неизвестные x_q и r , однако, если на основании (9) записать два уравнения для разных моментов времени, то данная система будет иметь решение. Взяв большее количество точек получим переопределённую систему уравнений, найдя коэффициенты которой методом наименьших квадратов, можно уменьшить погрешность идентификации. После чего из системы (5) можно выразить и рассчитать остальные сопротивления. Индексы и штрихи в (10) соответствуют обозначениям, принятым на рисунке 2.

$$\begin{aligned} x_d'' &= \frac{E''_{q(0+)} - r I''_{q(0+)} - U''_{q(0+)}}{I''_{d(0+)}} \\ x_d' &= \frac{E'_{q(1)} - r I'_{q(1)} - U'_{q(1)}}{I'_{d(1)}} \\ x_d &= \frac{E_{q\infty} - r I_{q\infty} - U_{q\infty}}{I_{d\infty}} \\ x_q'' &= \frac{r I''_{d(0+)} + U''_{d(0+)}}{I''_{q(0+)}} \end{aligned} \quad (10)$$

Точность идентифицируемых параметров можно повысить, накапливая ретроспективные данные при каждом включении в сеть и находя усреднённые параметры численным методом (например, методом наименьших квадратов).

Для использования разработанного метода в качестве исходных данных необходимо иметь сверхпереходные, переходные и установившиеся значения токов и напряжений по продольной и поперечной осям, поэтому была разработана методика декомпозиция тока и напряжения при скачкообразном изменении режима преимуществом которой является возможность её использования в режиме реального времени.

Для создания необходимого переходного процесса, используемого в методе, разработана **модификация способа управления включением генератора в сеть**. Способ реализуется следующим образом:

- запускают первичный двигатель и подают напряжение на обмотку возбуждения;
- выполняют условия точной синхронизации с электрической сетью на генераторном выключателе;
- запускают осциллографирование токов и напряжений статора трёх фаз, тока и напряжения обмотки ротора и угла ротора генератора;
- устанавливают уставку АРВ генератора, отличающуюся от напряжения на генераторном выключателе со стороны сети на 1-2 %;
- выводят из работы АРВ синхронного генератора с сохранением значения тока возбуждения, частоты вращения ротора и угла включения;
- включают генераторный выключатель;
- вводят автоматический регулятор возбуждения в работу и эксплуатируют машину в необходимом режиме.

При таком включении машины в сеть в обмотке возбуждения и демпферной обмотке возникают свободные токи, магнитные потоки которых в свою очередь вытесняют поток реакции статора из ротора при этом в статоре появляются все составляющие электромагнитного переходного процесса, необходимые для идентификации.

Для того чтобы не быть привязанным только к включению синхронной машины в сеть необходимо иметь более гибкий метод идентификации, позволяющий определять параметры при широком диапазоне возмущающих воздействий, характерных для эксплуатации машины.

Метод параметрической идентификации синхронной машины в возмущённых режимах состоит в следующем. Рассмотрим систему уравнений (3). Имеем одиннадцать параметров, которые необходимо определить ($r, r_f, r_D, r_Q, L_d, L_q, L_F, L_D, L_Q, L_{ad}, L_{aq}$). Токи и напряжения ротора (i_f, u_f) можно записать. Токи и напряжения статора по продольным и поперечным осям q и d (i_d, i_q, u_d, u_q) можно получить из записанных осциллограмм токов и напряжений статора всех трёх фаз ($i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, u_c$) и угла γ . Однако токи в эквивалентных демпферных обмотках (i_D, i_Q) измерить невозможно, но можно их исключить, выражая демпферные токи и их производные из одних уравнений системы и подставляя в другие получим:

$$\begin{aligned}
u_q = & a_1 i'_q + a_2 \frac{i'_d}{\omega} + a_3 \frac{i'_f}{\omega} - a_4 i_q + a_5 \omega i_f + a_6 \omega i'_d + \\
& + a_7 \omega i'_f + a_8 \left(\frac{u_d - u_f}{\omega} \right) + a_9 \frac{i_f}{\omega} + a_{10} i_d - a_{11} \omega i_d - a_{12} \omega u_f
\end{aligned} \tag{11}$$

где коэффициенты a_i

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{L_{aq}^2}{L_Q} - L_q & a_7 &= \frac{1}{r_D} (L_D L_F - L_{ad}^2) \\
a_2 &= \frac{r_Q}{L_Q} (L_D - L_{ad}) & a_8 &= \frac{r_Q}{L_Q} \\
a_3 &= \frac{r_Q}{L_Q} (L_F - L_{ad}) & a_9 &= \frac{r_F r_Q}{L_Q} \\
a_4 &= \frac{L_q r_Q}{L_Q} + r & a_{10} &= \frac{r r_Q}{L_Q} \\
a_5 &= L_{ad} + \frac{L_D r_f}{r_D} & a_{11} &= L_d \\
a_6 &= \frac{L_{ad}}{r_D} (L_{ad} - L_D) & a_{12} &= \frac{L_D}{r_D}
\end{aligned} \tag{12}$$

В уравнении (11) двенадцать неизвестных коэффициентов a_i . Чтобы их определить, нужно составить определенную или переопределённую систему уравнений с использованием комплектных измерений токов, напряжений и угла γ для разных моментов времени переходного процесса. После определения коэффициентов a_i индуктивности и активные сопротивления найдём из (13).

$$\begin{aligned}
L_D &= \frac{a_{12} \left(a_5 - \frac{a_{12} a_9}{a_8} \right)^2}{a_{12} \left(\frac{a_3 - a_{12} a_9}{a_8} - a_5 \right) - a_7} & r_Q &= \frac{a_8 \left(a_4 - \frac{a_{10}}{a_8} - a_2 \right)^2}{a_1 a_8^2 + a_4 a_8 - a_{10}} & L_q &= \frac{\left(a_4 - \frac{a_{10}}{a_8} \right)}{a_8} \\
L_Q &= \frac{\left(a_4 - \frac{a_{10}}{a_8} - a_2 \right)^2}{a_1 a_8^2 + a_4 a_8 - a_{10}} & r_f &= \frac{a_9}{a_8} & L_{ad} &= a_5 - \frac{a_{12} a_9}{a_8} \\
r_D &= \frac{\left(a_5 - \frac{a_{12} a_9}{a_8} \right)^2}{a_{12} \left(\frac{a_3 - a_{12} a_9}{a_8} + a_5 \right) - a_7} & r &= \frac{a_{10}}{a_8} & L_{aq} &= \frac{a_4 - \frac{a_{10}}{a_8} - a_2}{a_8} \\
L_d &= a_{11} & L_F &= \frac{a_3 - a_{12} a_9}{a_8} + a_5
\end{aligned} \tag{13}$$

Таким образом, имея осциллограммы переходного процесса можно определить все активные сопротивления и индуктивности синхронной машины, зная которые можно без проблем вычислить индуктивные сопротивления и постоянные времени.

В главе 4 проведено исследование предложенных способов управления включением в сеть и методов параметрической идентификации синхронных машин на в Matlab Simulink цифровой модели и электродинамической модели кафедры АЭС НГТУ. Доказана их работоспособность, осуществлена их интеграция в разрабатываемый комплекс режимно-противоаварийной автоматики управления режимом параллельной работы малой генерации с электрической сетью, определены «окна» идентификации.

Первой серией экспериментов на физической модели предусматривалось включение модельного синхронного генератора МК-3 на параллельную работу с шинами бесконечной мощности, в ходе которого производилась идентификация синхронного индуктивного сопротивления генератора. Схема экспериментальной физической установки представлена на рисунке 3 и состоит из генератора (Г), выключателя (В), трансформатора (Т), нагрузки (Н), линии (Л), системы (С).

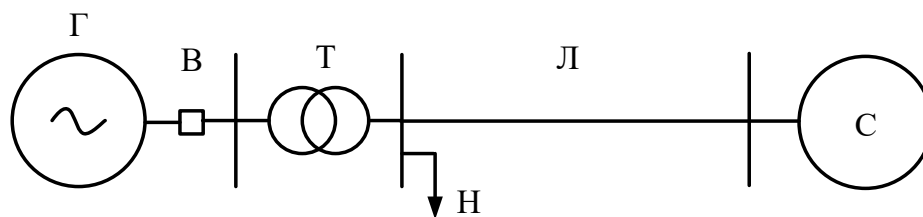


Рисунок 3 - Принципиальная схема физической и цифровой модели ЭС

Для решения задачи идентификации производилось управление машины способом управления включением синхронной машины в электрическую сеть. Пример регистрограммы представлен на рисунке 4, где имеются следующие интервалы: пуск первичного двигателя синхронной машины (I), подача напряжения на обмотку возбуждения и выход на холостой ход (II), включение генератора на параллельную работу (III), два нагрузочных режима (IV-V), включение АРВ и выход на нормальный режим работы (VI).

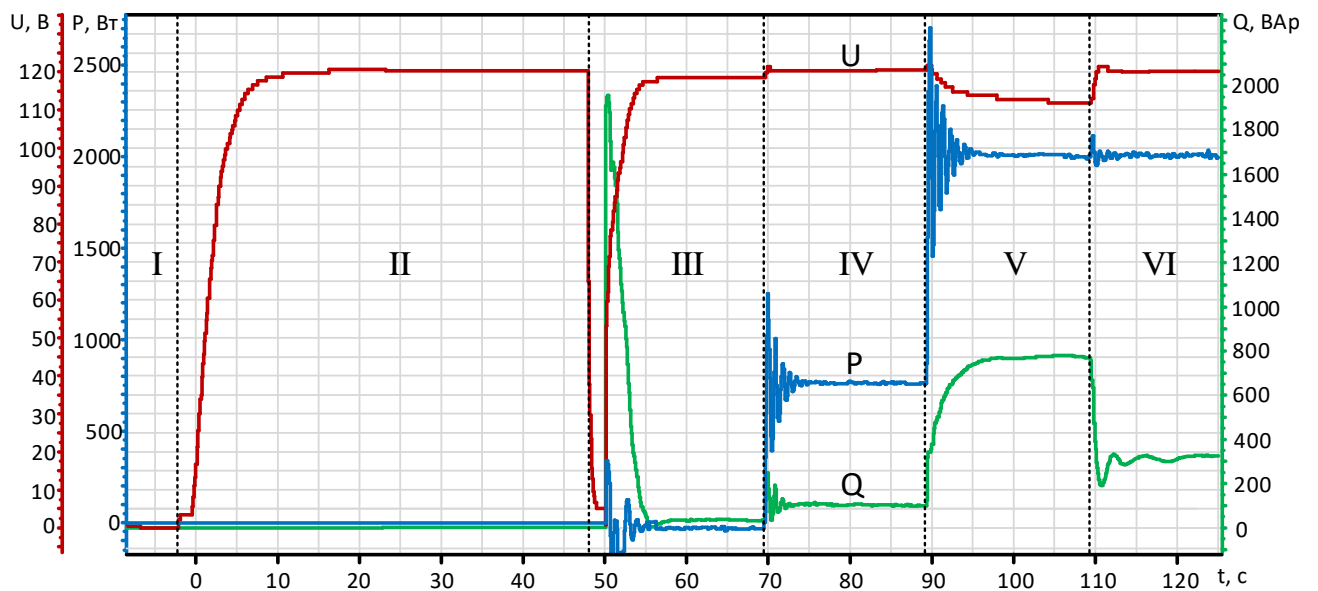


Рисунок 4 - Осциллограммы режимных параметров: U , P , Q на шинах генератора

Используя параметры установившихся режимов и подставляя в выражение (8) определяются значения синхронного индуктивного сопротивления. Каждая из комбинаций использованных параметров даёт значения сопротивлений с определённой погрешностью. Повышение достоверности идентифицируемых сопротивлений возможно путём использования избыточных измерений, создавая больше двух режимов перед вводом в работу АРВ (внутри «окна» идентификации) и/или используя ретроспективные данные. Избыточность данных необходимо создать переопределённую систему уравнений и найти усреднённое значение сопротивления. В таблице 1 приведены сопротивления в именованных единицах, полученные из различных комбинаций четырёх режимов, и усреднённые значения, полученные методом наименьших квадратов.

Таблица 1 - Результаты идентификации x_d

Эксперимент	Режимы						Среднее
	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4	
1	24,1	19,8	19,3	18,1	19	19,2	19,9
2	18,9	19,8	19,3	20,2	19,9	19,2	19,9
3	22,3	22,6	19,2	23,9	20,8	18,1	20,4

Вторая программа экспериментов на физической модели выполнялась для исследования способа управления и метода параметрической идентификации синхронной машины по осциллограммам переходного процесса при включении в

сеть. Проводилась серия включений генератора в сеть с осциллографированием следующих параметров: фазные токи и напряжения всех трёх фаз на выводах генератора и угол ротора генератора. Синхронизация и включение в сеть проводились вручную при данном эксперименте, что обеспечивало вариативность ошибок в условиях синхронизации.

Паспортные данные, а также результаты параметрической идентификации в относительных номинальных единицах представлены в таблице 2. Максимальная ширина окна идентификации ограничивается длительностью установления квазиустановившегося режима, а минимальная ограничена методикой определения составляющих тока и напряжения.

Таблица 2 - Результаты идентификации параметров

Параметр	Паспортные данные	1 Опыт	2 Опыт	3 Опыт	4 Опыт	5 Опыт	Среднее
x_d	1,242	1,238	1,241	1,278	1,19	1,211	1,232
x'_d	0,171	0,164	0,177	0,196	0,157	0,17	0,172
x''_d	0,069	0,072	0,071	0,061	0,066	0,08	0,07
x_q	0,662	0,74	0,771	0,54	0,661	0,56	0,654
x''_q	0,077	0,057	0,064	0,066	0,086	0,072	0,069
r	0,05	0,061	0,051	0,045	0,049	0,058	0,053

Третья серия экспериментов выполнялась на цифровой модели в Matlab Simulink для исследования метода параметрической идентификации синхронной машины в возмущённых режимах. Принципиальная схема электрической сети в данной серии экспериментов изображена на рисунке 3. За основу также был взят модельный генератор МК-3 с явнополюсным ротором и двумя парами полюсов, приведённый к номинальным параметрам 13,8 кВ, 20 МВА (масштаб по мощности $6,67 \cdot 10^3$, масштаб по напряжению 60), $r - 0,05$, $r_f - 5,79 \cdot 10^{-4}$, $r_D - 1,17 \cdot 10^{-2}$, $r_Q - 1,97 \cdot 10^{-2}$, $L_d - 0,835$, $L_q - 0,449$, $L_F - 0,927$, $L_D - 0,995$, $L_Q - 0,811$, $L_{ad} - 0,813$, $L_{aq} - 0,427$ (сопротивления и индуктивности даны в относительных номинальных единицах).

Целями третьей программы экспериментов были подтверждение работоспособности метода, исследование влияния временного окна идентификации на точность, в том числе определение его минимальной величины для успешной идентификации.

При исследовании использовались три возмущающих воздействия: включение генератора в сеть методом точной синхронизации с ошибкой синхронизации по модулю напряжений в три процента между напряжениями по

концам выключателя, удалённое трёхфазное короткое замыкание на шинах высокого напряжения трансформатора и отключение части нагрузки (5 % от номинальной мощности генератора). Частота дискретизации составляла 10 000 точек в секунду (двести точек за период промышленной частоты).

В таблице 3 приведены относительные погрешности параметров машины по сравнению с исходными значениями при различной длительности записи осциллограмм для идентификации. Анализируя данные таблицы, можно сделать следующие выводы:

- погрешность идентификации и требуемая длительность регистрации зависят от вида и величины возмущения – лучшие результаты достигнуты при коротком замыкании благодаря тому, что это возмущение было самым значительным;
- чем меньше окно идентификации – тем выше погрешность;
- наибольшей погрешностью идентификации обладают параметры r_f , r_D , r_Q , L_d , L_F , L_D , L_Q , L_{aq} , так как они зависят от коэффициентов a_2 , a_3 , a_9 , которые, в свою очередь, при решении переопределённой системы тоже получаются с наибольшей погрешностью, потому что имеют самый меньший порядок ($10^{-5} \dots 10^{-6}$), по сравнению с остальными коэффициентами на много порядков выше ($10^2 \dots 10^3$).

Таблица 3 - Погрешности определяемых параметров в зависимости от ширины окна (%)

Параметр	Включение в сеть			Отключение нагрузки			Короткое замыкание		
	0,05 с	0,1 с	3 с	0,05 с	0,1 с	3 с	0,05 с	0,1 с	3 с
r	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-7}
r_f	0,84	10^{-5}	10^{-5}	0,89	10^{-5}	10^{-5}	0,12	10^{-5}	10^{-5}
r_D	4,6	10^{-7}	10^{-7}	2,5	10^{-7}	10^{-7}	1,2	0,01	10^{-7}
r_Q	6,3	10^{-6}	10^{-6}	6,59	10^{-6}	10^{-6}	0,21	10^{-3}	10^{-6}
L_d	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7}
L_q	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-7}
L_F	1,73	10^{-6}	10^{-6}	2,91	10^{-6}	10^{-6}	0,58	10^{-6}	10^{-6}
L_D	13,6	10^{-3}	10^{-3}	17,8	10^{-3}	10^{-3}	2,24	0,06	10^{-3}
L_Q	0,71	10^{-6}	10^{-6}	0,55	10^{-6}	10^{-6}	0,26	10^{-6}	10^{-6}
L_{ad}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-3}	10^{-7}	10^{-7}
L_{aq}	1,35	10^{-7}	10^{-7}	1,09	10^{-7}	10^{-7}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-7}

Основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана методика определения составляющих переходного процесса из осциллограмм при скачкообразном изменении режимных параметров.
2. Разработаны способы управления включением синхронной машины в электрическую сеть и методы параметрической идентификации синхронных машин для нормальных эксплуатационных условий.
3. Проведены исследования разработанных способов управления включением синхронной машины в электрическую сеть и методов параметрической идентификации.
4. Разработаны рекомендации по повышению достоверности параметрической идентификации синхронной машины.
5. Произведена интеграция разработанных способов управления включением синхронной машины в электрическую сеть в систему управления режимом параллельной работы малой генерации с сетью.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных в ВАК РФ:

1. Фролов, М. Ю. Идентификация электрических параметров синхронных машин в возмущённых режимах / М. Ю. Фролов, А. Г. Фишов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. - 2017. – № 2 (77). – С. 54-63.
2. Фролов, М. Ю. Идентификация электрических параметров синхронного генератора при включении в распределительную сеть в онлайн-режиме [Электронный ресурс] / М. Ю. Фролов, А. Г. Фишов // Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн. - 2017. – № 10. – С. 38-46. - Режим доступа: <http://energo-press.info/журнал-новое-в-российской-электроэне/нрэ-2017/>. - Загл. с экрана.

Патент на изобретение Российской Федерации:

3. Патент 2572108 Российская Федерация, МПК H02P 9/10, H02P 9/14. Способ управления режимом синхронной машины, включённой в электрическую сеть / Фишов А. Г., Фролов М. Ю.; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». - № 2014123932/07; заявл.10.06.2014; опубл. 27.12.2015, Бюл. №36. – 6 с.

Работы, опубликованные в международных и российских изданиях, сборниках научных трудов конференций:

4. Sizova D. A. Digital models of the electric power systems: development and verification / D. A. Sizova, M. Y. Frolov / *Aspire to science: материалы гор. науч.-практ. конф. школьников, студентов, магистрантов и аспирантов,*

Новосибирск, 12 апр. 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 185-187. ISBN 978-5-7782-3238-9.

5. Frolov M. Y. Electric parameters identification of synchronous generator connecting to the distribution grid / M. Y. Frolov, A. G. Fishov // 12 International forum on strategic technology (IFOST 2017): proc., Korea, Ulsan, 31 May – 2 June 2017. – Ulsan, 2017. - Vol.1. - P. 261-264. - ISBN 978-1-5090-5703-0.

6. Фролов М. Ю. Идентификация электрических параметров синхронного генератора при включении в распределительную сеть = Identification of Synchronous Generator Electric Parameters Connected to the Distribution Grid / М. Ю. Фролов, А. Г. Фишов // Проблемы региональной энергетики = Problems of regional energy. - 2017. - № 1 (33). - С. 32 -39.

7. Сизова Д. А. Разработка и верификация цифровых моделей электроэнергетических систем = Development and verification of digital models of electric power systems / Д. А. Сизова, М. Ю. Фролов // Автоматика и программная инженерия = Automatics & Software Enginery. - 2017.- № 2 (20). - С. 54-60.

8. Дулов И. В. Система измерения режимных параметров в генераторных и нагрузочных узлах / И. В. Дулов, М. Ю. Фролов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 4. – С. 25-28. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3422-2.

9. Сизова, Д. А. Разработка и верификация цифровых моделей электроэнергетических систем / Д. А. Сизова, М. Ю. Фролов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 73-75. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3082-8.

10. Frolov M. Y. Electric parameters identification of synchronous generator connecting to the grid / M. Y. Frolov, A. G. Fishov // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016): proc., Russia, Novosibirsk, 1 June – 3 June 2016. - Vol.2. - P. 243-246. - ISBN 978-1-5090-0855-1/16.

11. Мышлянников, Д. А. Идентификация узловых параметров для задач управления режимами электрической сети / Д. А. Мышлянников, А. Г. Фишов, М. Ю. Фролов // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. 5 междунар. науч.-техн. конф., Сочи, 1–5 июня 2015 г. - Сочи, 2015.

12. Фролов, М. Ю. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах/ М. Ю. Фролов; науч. рук. А. Г. Фишов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 11 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2014 г. –

Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 5. – С. 103-107. – 85 экз. - ISBN 978-5-7782-2555-8.

13. Фролов, М. Ю. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах / М. Ю. Фролов, А. Г. Фишов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение.: сб. науч. тр.: в 3 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 113-116. - 70 экз. - ISBN 978-5-7782-2545-9.

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 № 987. Подписано в печать 02.07.2018 г.