

На правах рукописи

Семенов Василий Владимирович

**АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ
АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2008

Работа выполнена на кафедре электромеханики
ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Султангалеев Рафиль Наилевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Костюкова Татьяна Петровна

кандидат технических наук, доцент
Шуляк Александр Анатольевич

Ведущее предприятие: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Уфимское агрегатное
производственное объединение» г. Уфа

Защита состоится « 26 » сентября 2008 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12, актовый зал 1-го корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета

Автореферат разослан « 22 » августа 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., профессор

Утляков Г.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современной тенденцией развития энергетики является стремление к сбалансированности энергорайонов, повышение надежности электроснабжения потребителей. Важное место в стратегии развития электроэнергетики занимают автономные системы электроснабжения (АСЭ). В последнее время АСЭ получают все более широкое распространение в системе электроснабжения не только специального, но и общего применения. Указанные системы используются почти во всех отраслях народного хозяйства. Их крупнейшими потребителями являются топливо-энергетический, агропромышленный и машиностроительный комплексы страны. Области применения таких генераторов охватывают электроагрегаты (стационарные, судовые, передвижные) и управляемые электромеханические системы (строительно-дорожные, транспортные и самоходные машины, ветроэнергетические установки и малые ГЭС, генераторы, работающие на статические преобразователи частоты и электромашино-разделительные агрегаты), системы бесперебойного питания ответственных потребителей, в том числе современных вычислительных комплексов.

Необходимость АСЭ возникает там, где технически невозможно или экономически невыгодно использовать централизованное электрическое снабжение, например, на движущихся объектах. А это, в первую очередь, труднодоступные объекты, удаленные от крупных электрических систем, и имеющие собственные источники первичной энергии, например, газовые и нефтяные месторождения. АСЭ находят широкое применение в промышленности, строительстве, сельском и коммунальном хозяйствах. Они работают на предприятиях, в аэро-, морских и речных портах, в энергоблоках больниц, в фермерских хозяйствах, в системах аварийного энергоснабжения, на объектах оборонного комплекса – везде, где необходима электроэнергия, а сеть или удалена, или работает с перебоями.

Обеспечение качества электроэнергии для потребителей АСЭ промышленной частоты имеет существенное значение. Получение постоянной частоты при переменной частоте вращения приводного двигателя является одной из важных задач для АСЭ. Существует проблема обеспечения стабильных параметров электрической энергии, получаемой преобразованием механической энергии от ее источника, например от ветродвигателя. Та же проблема возникает и при работе от стабильного источника механической энергии, но при нестабильной электрической нагрузке. Эффективным способом решения этой проблемы является преобразование механической энергии в электрическую асинхронизированными синхронными генераторами (АСГ). В связи с этим, последние годы характеризуются повышенным интересом инженеров и исследователей к асинхронизированным машинам, которые в полной мере могут решить поставленные задачи для АСЭ.

Анализ результатов исследований отечественных и зарубежных ученых показал, что применение АСГ для автономных систем, работающих на различную

нагрузку, изучено недостаточно. Мало исследованы вопросы влияния частоты вращения вала приводного двигателя. Недостаточно исследованы вопросы моделирования и анализа динамических режимов АСГ для различных нагрузок с применением автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

Несмотря на то, что асинхронизированные синхронные генераторы обладают рядом ценных качеств, в настоящее время они наименее изучены. Исследованию теории и практики управления автономными энергетическими комплексами и энергосбережению посвящено достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных специалистов. Однако, на уровне АСЭ эти исследования разрознены и не в полной мере способствуют решению данной проблемы. Поэтому, исследование АСГ для автономных систем, работающих на различную нагрузку, является актуальной задачей.

Основания для выполнения работы. Диссертационная работа выполнена в Уфимском государственном авиационном техническом университете по плану научно-исследовательских работ по теме АП-ЭМ-02-04-ХГ.

Целью выполнения диссертационной работы является создание автономной системы электроснабжения на базе асинхронизированного синхронного генератора, обеспечивающей требуемые показатели качества выходного напряжения при переменной частоте вращения приводного двигателя.

Основные задачи исследования:

1. Создание математической модели асинхронизированного синхронного генератора и расчет его статических характеристик при автономной работе.
2. Исследование переходных процессов АСГ с помощью математического пакета *Matlab*.
3. Разработка системы регулирования тока возбуждения АСГ, обеспечивающей необходимые показатели качества электроэнергии.
4. Создание комплекса программ для исследования автономной системы электроснабжения.
5. Экспериментальное исследование АСГ с использованием пакета *LabView* для проверки адекватности полученных теоретических результатов.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Научные исследования основывались на применении методов теории электромеханического преобразования энергии, общей теории дифференциальных уравнений, методов современной теории автоматического управления, теории нелинейных систем, теории нечеткой логики. При решении задач исследования статических и динамических режимов работы АСЭ, использовался метод компьютерного моделирования на основе математического пакета *MatLab/Simulink*. В ходе экспериментального исследования

использована программная среда *LabView* для решения задачи управления и наблюдения над электромеханическими системами.

На защиту выносятся:

1. Структура автономной системы электроснабжения, включающая регулируемый преобразователь частоты с ШИМ-модуляцией.
2. Методика построения характеристик асинхронизированного синхронного генератора – синхронная машин двойного питания – при автономной работе.
3. Математическая модель для исследования переходных процессов автономной системы электроснабжения на базе универсальной машины переменного тока с помощью математического пакета *MatLab/Simulink*.
4. Система регулирования возбуждения асинхронизированного синхронного генератора на основе нечеткой логики, позволяющая обеспечить требуемые показатели качества электроэнергии.
5. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность математической модели и достоверность полученных теоретических данных.

Научная новизна.

1. Разработана система автоматического регулирования возбуждения асинхронизированного синхронного генератора на основе теории нечетких множеств, позволяющая улучшить динамические характеристики и повысить показатели качества электроэнергии в автономных системах электроснабжения.
2. Создана математическая модель разработанной автономной системы электроснабжения, позволяющая построить статические и динамические характеристики асинхронизированного синхронного генератора.
3. Определены наиболее рациональные режимы работы автономной системы электроснабжения при изменении нагрузки АСГ и частоты вращения приводного двигателя.
4. Разработано программное обеспечение для исследования автономной системы электроснабжения на базе универсальной машины переменного тока с предложенной системой автоматического регулирования.

Практическая ценность диссертационной работы:

1. Создана АСЭ на базе АСГ с показателями качества удовлетворяющими требованиям действующих ГОСТов.
2. Рассчитаны пределы регулирования напряжения возбуждения для универсальной машины при различной частоте вращения приводного двигателя.
3. Предложены программы анализа переходных и установившихся режимов универсальных машин переменного тока с системой возбуждения, регулируемой алгоритмами на основе теории нечетких множеств, для автономных систем

электрообеспечения, защищенные свидетельством об официальной регистрации программ для ЭВМ.

4. Спроектирован и выполнен макетный образец преобразователя частоты с микропроцессорным управлением для системы регулирования тока возбуждения асинхронизированного синхронного генератора.

Внедрение результатов работы. Материалы диссертационной работы используются для проектирования автономных систем электрообеспечения в ООО «Энергоинновация». Результаты работы используются в учебном процессе УГАТУ при подготовке бакалавров, инженеров и магистров специальностей 140601 «Электромеханика» и 140205 «Электроэнергетические системы и сети».

Апробация работы. Основное содержание и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии» 2006 г. (г. Липецк), на Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления и обработки информации» 2003 г. (г. Уфа), научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодежная наука и АПК: проблемы и перспективы» 2005 г. (г. Уфа), научно-техническая конференция «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы» 2005 г. (г. Уфа), научно-техническая конференция «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы» 2006 г. (г. Уфа), научно-техническая конференция «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы» 2007 г. (г. Уфа), Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» 2007 г. (г. Уфа).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, включая 1 статью в издании из перечня, утвержденного ВАК России («Вестник саратовского государственного технического университета»), 11 статей, два программных продукта, зарегистрированных в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 142 наименований и 4-х приложений. Основная часть диссертации изложена на 151 страницах машинописного текста и содержит 68 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость, сформулирована основная цель работы и обоснованы задачи, которые необходимо решить для ее достижения. Определены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе

Рассмотрены перспективы и тенденции как отечественного, так и мирового развития автономных систем электрообеспечения. Проведен анализ требований, предъявляемых к синхронным машинам автономных систем электрообеспечения.

Основными достоинствами асинхронизированного синхронного генератора по отношению к синхронным и асинхронным генераторам является то, что АСГ способны генерировать напряжение постоянной частоты при переменной частоте вращения. Они обладают принципиально большими, чем синхронные генераторы, пределами устойчивости. Асинхронизированные синхронные генераторы способны экономично регулировать реактивную мощность при параллельной работе с сетью, и особенно эффективны там, где по условиям эксплуатации требуется регулирование частоты вращения в сравнительно ограниченных пределах выше и ниже синхронной. Асинхронизированные компенсаторы и двигатели при определенном управлении и наличии соответствующей маховой массы способны не пропускать толчки активной и реактивной мощности нагрузки в питающую сеть, обеспечивать демпфирование колебаний не только напряжения, но и частоты.

Системы возбуждения генераторов автономных энергетических систем характеризуются: полной автономностью – начальное возбуждение обеспечивается исключительно за счет внутренних источников; простотой и эффективностью схемотехнических и конструкторских решений, обеспечивающих высокую надежность и хорошие массогабаритные показатели; техническими характеристиками, удовлетворяющими нормативно-техническим требованиям.

В работе предложено использование нечеткого регулятора в условиях отсутствия четкой математической модели объекта управления, позволяющего построить достаточно простые (с вычислительной точки зрения), быстродействующие алгоритмы управления, которые являются, малочувствительными к действию параметрических возмущений и помех.

Приведена основная математическая модель АСГ.

Математическая модель АСГ может быть представлена в виде обобщенной модели электрической машины с симметричными двухфазными системами обмоток на статоре и роторе, имеющих постоянные параметры.

Система дифференциальных уравнений такой модели при общепринятых допущениях и записи в относительных единицах в системе вращающихся координат, с произвольной частотой ω_k , имеет вид:

$$\begin{aligned}
 -U_d &= i_d r + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_k \psi_q; & \psi_d &= x i_d + x_{af} i_{fd}; \\
 -U_q &= i_q r + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_k \psi_d; & \psi_q &= x i_q + x_{af} i_{fq}; \\
 U_{df} &= i_{df} r_f + \frac{d\psi_{df}}{dt} - (\omega_k - \omega_p) \psi_{qf}; & \psi_{fd} &= x_{af} i_d + x_f i_{fd}; \\
 U_{qf} &= i_{qf} r_f + \frac{d\psi_{qf}}{dt} + (\omega_k - \omega_p) \psi_{df}; & \psi_{fq} &= x_{af} i_q + x_f i_{fq}; \\
 M &= J \frac{d\omega_p}{dt} + x_{af} (i_d i_{fq} - i_q i_{fd}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где U_d, U_q – составляющие напряжения на шинах; U_{fd}, U_{fq} – составляющие напряжения, приложенного к обмотке возбуждения; r, r_f – активное сопротивление статорной цепи и обмотки возбуждения; i_d, i_q, i_{fd}, i_{fq} – проекции токов статорной цепи и обмотки возбуждения; $\psi_d, \psi_q, \psi_{fd}, \psi_{fq}$ – проекции потокосцеплений обмотки статора и возбуждения; x, x_f, x_{af} – полное сопротивление обмоток статора, ротора и сопротивление взаимной индуктивности соответственно; M – вращающий момент приводного двигателя; J – постоянная инерции вращающихся частей генератора; ω_p – частота вращения ротора.

В дальнейшем принимаем, что частота ω_k является постоянной и равна базисной частоте $\omega_k = \omega_0 = 1,0$. За базисные величины напряжения и тока принимаются амплитуды соответствующих фазных величин статорной обмотки; за базисное потокосцепление статора принимаем потокосцепление, индуктирующее в обмотке статора базисное напряжение при базисной угловой частоте.

Система уравнений (1) принимается за исходную при проведении дальнейших исследований. Эти уравнения, совместно с уравнениями нагрузки, позволяют решать задачи переходных и стационарных процессов, при различных частотах вращения и различных структурах регулятора. При этом, необходимо отметить следующее: в автономных системах, исследуемых в настоящей работе, наиболее характерными являются переходные процессы при переменной частоте вращения ротора либо при заданном законе изменения частоты вращения ротора.

Стремление повысить надежность электрических сетей и средств управления ими предъявляет более высокие требования к точности моделирования аварийных режимов и вызывает необходимость совершенствования технических средств вычислений.

Современные компьютерные системы позволяют реализовать достаточно совершенные алгоритмы вычислений, а точность моделирования процессов в этих условиях во многом определяется точностью и достоверностью исходных данных, основу которых составляют параметры моделей электрических сетей.

В работе предложено использовать среду *MatLab* с пакетом расширения *Simulink*, как один из самых мощных и эффективных инструментов для создания разнообразных программных комплексов, предназначенных для решения научно-технических задач. Это позволило выполнить схмотехническое моделирование электротехнического объекта, сократив при этом время моделирования.

Рассмотрен общий принцип управления АСГ. АСГ имеет на роторе систему обмоток (две и более) с несовпадающими осями, что дает возможность регулирования пространственной составляющей МДС возбуждения. Таким образом, в АСГ появляется дополнительная степень свободы управления, что используется для раздельного управления электромагнитным моментом и реактивной мощностью.

В установившемся режиме токи ротора пропорциональны напряжению возбуждения только при синхронной частоте вращения ротора (при $s = 0$). При $s \neq 0$ появляются перекрестные связи, выражающиеся в том, что управление одной проекцией тока ротора оказывает влияние на другую.

При работе АРВ формируются два сигнала постоянного тока, соответствующие синхронным проекциям $\bar{U}_f$. Управление АСГ реализуется введением переменного напряжения возбуждения в фазы обмоток возбуждения, расположенные на роторе, вращающиеся с частотой ω_r и занимающие в текущий момент времени данное угловое положение.

В заключении формулируются задачи, которые ставятся и решаются в диссертационной работе.

Во второй главе

Рассматриваются особенности построения компьютерной модели АСЭ на базе АСГ, которая создана по модульному принципу из основных элементов автономной системы (АСГ, системы возбуждения и АРВ, дизельного двигателя, нагрузки), построенной в пакете *MatLab*.

Для адекватного моделирования АСЭ необходимо наличие моделей всех элементов и компонентов АСЭ с установленными между ними связями, и задание необходимых технических параметров исследуемой системы.

На рис. 1 представлена функциональная блок-схема АСГ, реализованная по уравнениям Парка – Горева. Схема состоит из блоков: преобразования трехфазной системы координат в двухфазную и обратно; модели АСГ, выполненной на основании уравнений Парка – Горева; модели относительного движения ротора генератора.

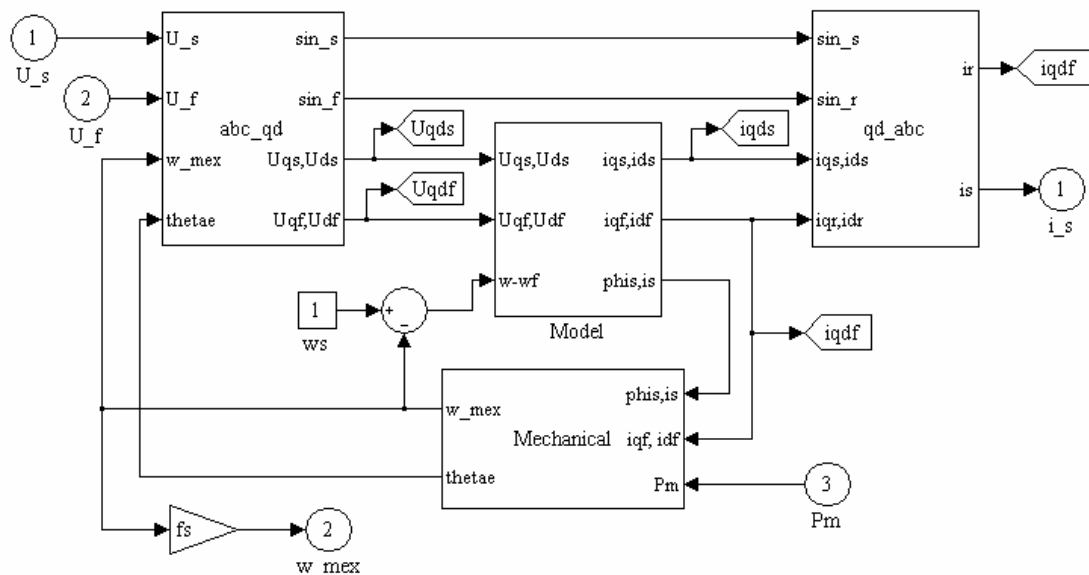


Рисунок 1. Функциональная блок-схема уравнений Парка – Горева

Рассмотрена процедура формализации работы системы управления с применением теории нечетких множеств, а также приведено описание разработанного метода синтеза нечеткого управления в системе АРВ генератора.

Реализация системы автоматического регулирования возбуждения АСГ на базе нечеткого регулятора выполнена в пакете Fuzzy Logic Toolbox, входящем в состав системы *Matlab*. Пакет содержит набор GUI (Graphic User Interface) модулей, который обеспечивает проведение этапа структурной идентификации в диалоговом режиме.

Общая схема обработки нечеткой информации (нечеткий регулятор) в системе управления организована следующим образом. Точные исходные данные с датчиков, контролирующих управляющий процесс, переводятся в значения лингвистических переменных в блоке «*фаззификатор*». Далее реализуются процедуры нечеткого вывода на множестве продукционных правил, составляющих базу знаний системы управления, в результате чего формируются выходные лингвистические значения, которые переводятся в точные значения результатов вычислений в блоке, «*дефаззификатор*». На выходе последнего формируются управляющие воздействия на исполнительные механизмы. Эта концептуальная схема лежит в основе так называемого нечеткого контроллера, используемого в интеллектуальных системах обработки неопределенной информации, в частности, в системах интеллектуального управления на базе микроконтроллера.

Рассмотрен алгоритм автоматизации этапа параметрической идентификации, выполненный в пакете Fuzzy Logic Toolbox. Настройка нечеткой модели типа Сугено (Sugeno) проводилась как в командном режиме с помощью функции *anfis*, так и в диалоговом режиме с использованием GUI модуля *anfisedit*. Настройка выполнена с использованием технологии ANFIS (*Adaptive Network based Fuzzy Inference System*).

Для процесса настройки нечеткого регулятора создана база данных (в виде числовых значений) внешних регулировочных характеристик АСГ для различных видов нагрузки при статических и динамических режимах работы автономной системы электроснабжения. В процессе настройки нечеткого регулятора (НР) использовались данные, полученные как в ходе моделирования, так и в результате экспериментов.

Формализация термов реализована с помощью симметричной гауссовской функцией принадлежности (*gaussmf*):

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-h)^2}{2c^2}}, \quad (2)$$

где x – элемент универсального множества; h – параметр функции принадлежности (координата максимума); c – параметр функции принадлежности (коэффициент концентрации).

Выбор такого типа функции принадлежности обусловлен ее достаточной гибкостью и простотой – она задается лишь двумя параметрами. Это позволяет сократить размерность задачи оптимизации, возникающей на этапе параметрической идентификации.

На рис. 2, 3 представлены оптимальные функции принадлежности нечеткого регулятора напряжения и система нечетких правил, сгенерированные в результате обучения.

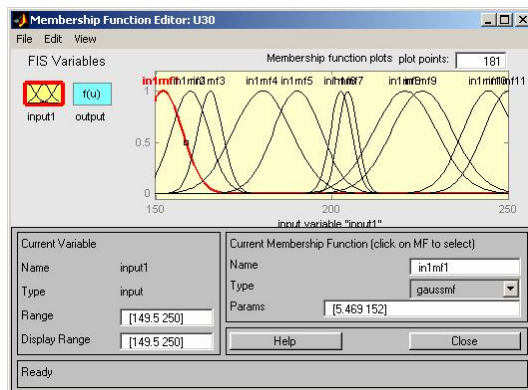


Рисунок 2. Оптимальные функции принадлежности нечеткого регулятора

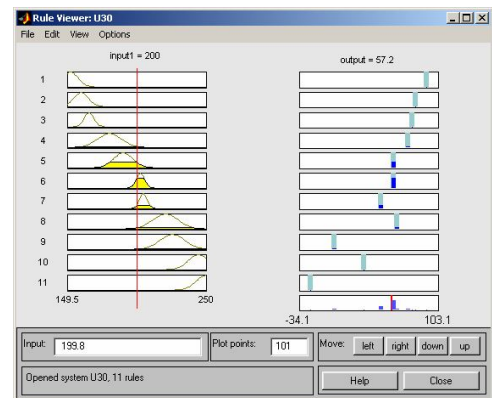


Рисунок 3. Система нечетких правил

В ходе настройки применен метод обратного распространения ошибки. Рассматриваемые выборки переходных процессов имели размер не менее 10000 точек. Нечеткая модель оптимизирована по обучающей выборке из 10000 пар «вход - выход». Средняя квадратичная ошибка идентификации модели на контрольной выборке из 1000 точек составила 0,47 для абсолютного значения входных переменных.

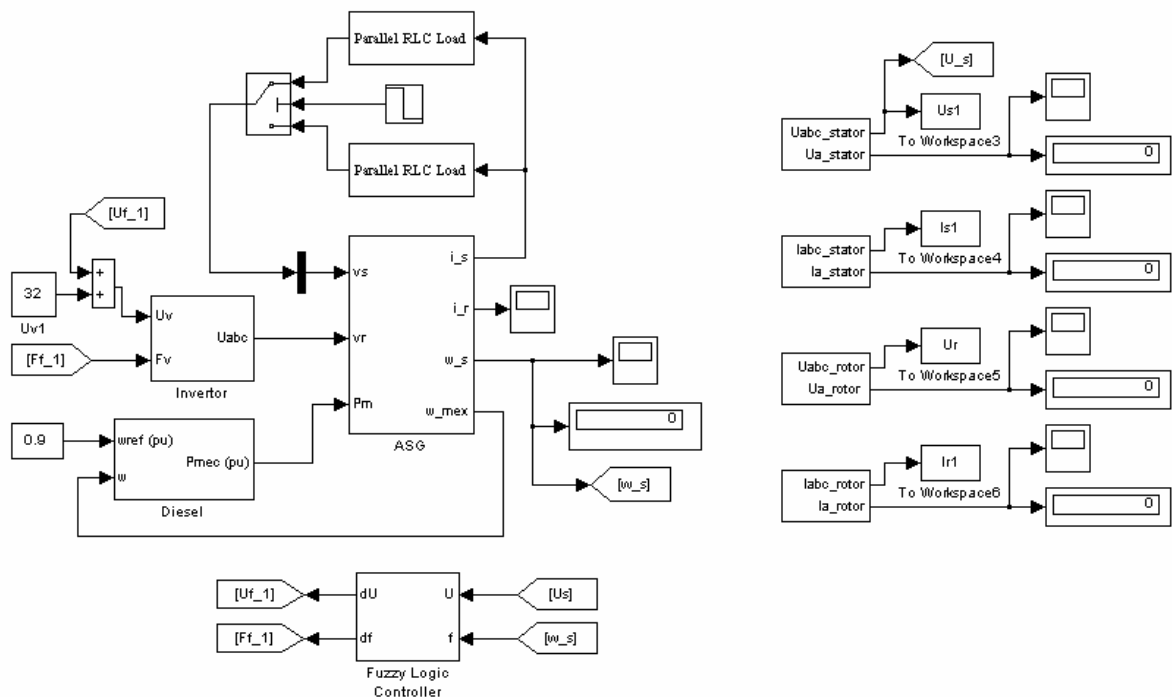


Рисунок 4. Компьютерная модель автономной системы электроснабжения на базе АСГ с системой регулирования на базе нечеткой логики

На рис. 4 представлена структурная схема АСЭ, состоящая из следующих моделей: асинхронизированного синхронного генератора (ASG), как основного источника электрической энергии; системы регулирования и управления возбуждением АСГ при работе АСЭ, созданного на базе нечеткого регулятора; дизельного двигателя (Diesel), как элемента приводного двигателя для генератора; инвертора (Invertor) на базе IGBT-транзисторов с ПБМ; нагрузки, как основного потребителя электрической энергии (Parallel RLC Load), выполненного в виде параллельной RLC нагрузки.

Важным условием правильного моделирования и, соответственно, успешного математического анализа, является предварительная подготовка данных, которая включает различные преобразования исходных, «сырых» экспериментальных значений.

Исходные данные почти всегда содержат погрешности, как случайные, так и систематические. Их можно объяснить как сбоем устройств измерения, так и различного рода помехами. Для обработки данных использован метод сглаживания Савицкого – Голея.

Предложенная компьютерная модель позволяет получить как статические, так и динамические характеристики АСГ, а также реализовать АРВ на базе нечеткой логики. Разработанные модели зарегистрированы в РосАПО.

В третьей главе

Проведено математическое моделирование автономной системы электроснабжения, исследованы статические и динамические процессы в АСГ, рассмотрены особенности системы стабилизации выходных электрических параметров, а также рассчитаны характеристики АСГ при различном характере нагрузки и частоте вращения приводного двигателя.

Для построения статических характеристик принята обобщенная математическая модель АСГ согласно (1).

В векторной форме система уравнений (1) в установившемся режиме может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} -\bar{u} &= r\bar{i} + \left(\frac{d}{dt} + j\omega_k \right) (L\bar{i} + L_{af}\bar{i}_f); \\ \bar{u}_f &= r_f\bar{i}_f + \left[\frac{d}{dt} + j(\omega_k - \omega_p) \right] (L_f\bar{i}_f + L_{af}\bar{i}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{u}, \bar{u}_f, \bar{i}, \bar{i}_f$ - результирующий вектор напряжения, тока статора и ротора r, r_f - активное сопротивление обмотки статора и ротора; L, L_f, L_{af} - полные индуктивности обмоток статора, ротора и взаимная индуктивность соответственно.

Из уравнения (3) после соответствующих преобразований для установившегося режима имеем:

$$\bar{I} = \frac{-jx_{12}\bar{U}_f}{(R + \bar{z}_h + jx)(R_f + jx_f s) + x_{af}^2 s}, \quad (4)$$

$$\bar{I}_f = \frac{\bar{U}_f}{R_f + jx_f s + x_{af}^2 s / (R + \bar{z}_h + jx)}, \quad (5)$$

где $s = \frac{\omega - \omega_p}{\omega}$ - скольжение.

Регулировочные характеристики для универсальной машины переменного тока имеют вид:

$$\begin{aligned} -\bar{U} &= \bar{I}(R + jx) + j\bar{I}_f x_{af}, \\ \bar{U}_f &= j\bar{I} x_{af} s + \bar{I}_f (R_f + jx_f s). \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 6 представлены внешние и регулировочные характеристики АСГ мощностью 200 Вт, при различном характере нагрузки.

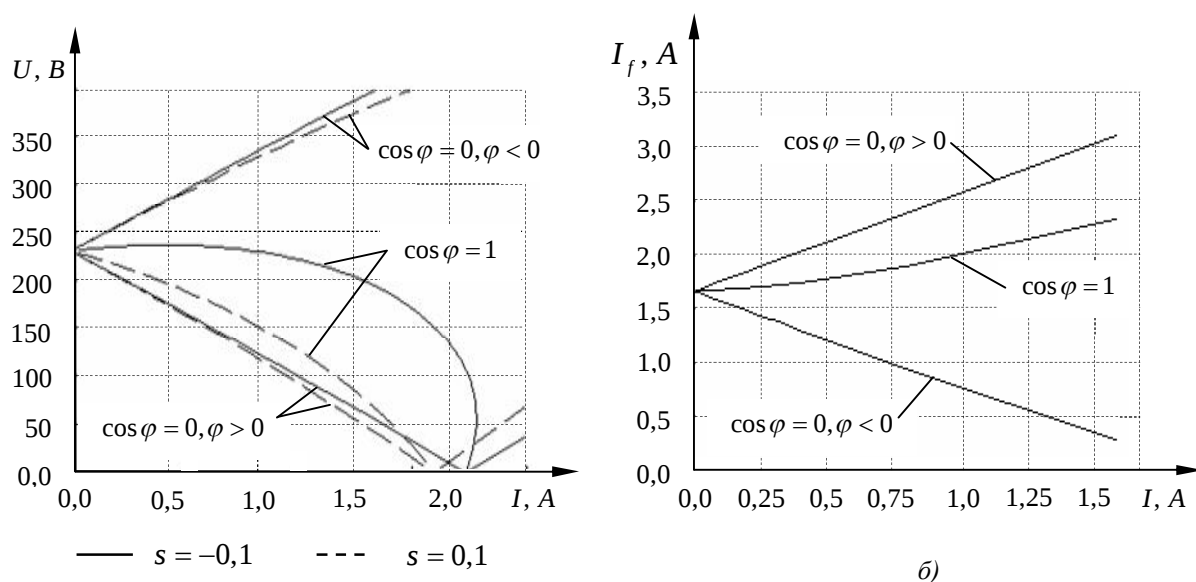


Рисунок 6. Характеристики АСГ а) внешняя, б) регулировочная

Как видим (рис. 6а), внешние характеристики для АСГ при различном скольжении отличаются, что вызвано взаимным влиянием токов статора и возбуждения.

Регулировочные характеристики (рис. 6б) АСГ по сравнению с СГ жестче, что объясняется наличием электромагнитной мощности возбуждения при переменном токе.

С помощью разработанной математической модели проведено исследование статических и динамических процессов, которые происходят в АСЭ с различными системами автоматического регулирования тока возбуждения АСГ. Моделирование

выполнено для различных режимов работы и при различном характере нагрузке. В результате моделирования получены зависимости для основных величин АСЭ.

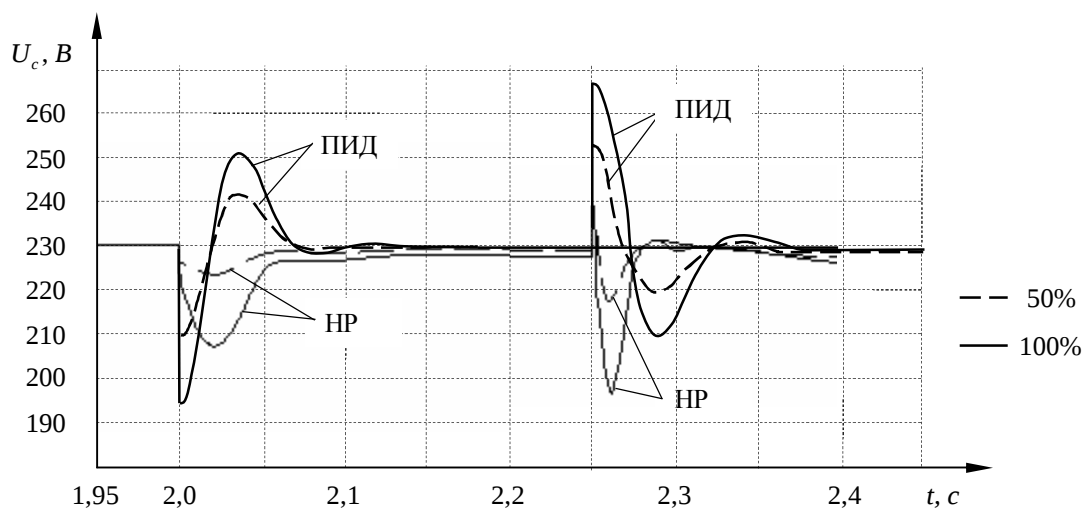


Рисунок 7. Напряжение статора при включении на активную нагрузку

Анализ зависимостей напряжения $U(t)$ (рис. 7) и частоты напряжения $f(t)$ в автономном режиме работы АСГ показал, что использование нечеткого регулятора обеспечивает требуемые показатели качества стабилизации параметров генерируемой электроэнергии. Время переходного процесса при включении и отключении 100 % нагрузки соответственно равно $t_{\text{вкл.НР}} = 0,051 \text{ с}$, $t_{\text{вкл.ПИД}} = 0,11 \text{ с}$, $t_{\text{откл.НР}} = 0,072 \text{ с}$, $t_{\text{откл.ПИД}} = 0,131 \text{ с}$.

Проведен анализ основных показателей качества электроэнергии при автономной работе АСГ на различную нагрузку. Установившееся отклонение напряжения при включении номинальной нагрузки с $\cos \varphi = 0,8$ $\delta U_y = 0,174\%$, а установившееся отклонение частоты равно $\delta f_y = 0,125\%$. Коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения статора соответствует требованиям действующего стандарта и не превышает $K_U = 5\%$ для всего диапазона изменения нагрузки.

Применение теории нечетких множеств в системе автоматического регулирования повышает качественные показатели переходного процесса в среднем в 1,4 раза, по сравнению с классическим регулятором системы возбуждения генератора.

Разработанный алгоритм и программы расчета позволяют провести функциональный и параметрический анализ универсальной машины переменного тока и системы возбуждения, оценить эффективность нечеткого регулирования по отношению к классическому ПИД регулятору как при постоянной, так и переменной частоте вращения.

Четвертая глава

Посвящена экспериментальным исследованиям, проведенным для проверки теоретических положений и оценки адекватности компьютерных моделей, приведенных в данной работе. Результаты экспериментов представлены в сравнении с результатами исследования на имитационной модели. Экспериментальное исследование выполнено на базе учебного стенда «Модель электрической системы».

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 9.

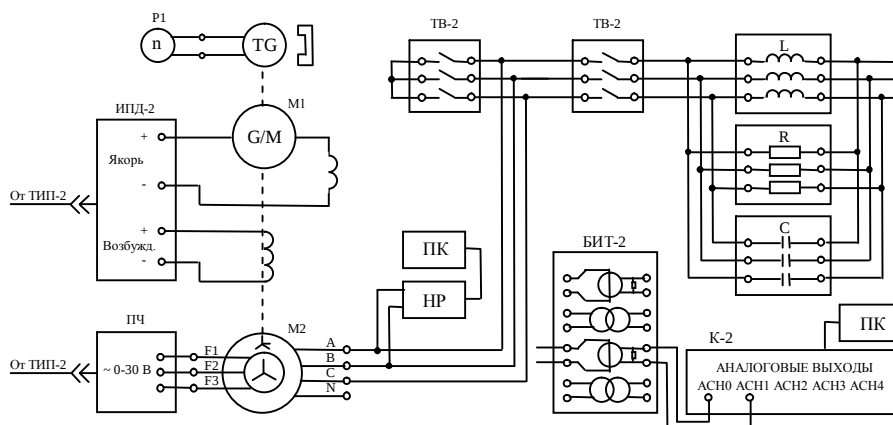


Рисунок 9. Принципиальная схема экспериментальной установки

В качестве преобразователя частоты в цепи системы возбуждения АСГ использован преобразователь со звеном постоянного тока, с силовой частью на базе IGBT-транзисторов.

В ходе экспериментальных исследований получены значения параметров исследуемого генератора при автономной работе для создания компьютерной модели АСГ. Определены синхронное индуктивное сопротивление, индуктивные сопротивления обмотки статора и ротора, постоянная обмотки возбуждения и сопротивления обмоток универсальной машины переменного тока. Исследованы режимы: холостого хода, короткого замыкания, симметричной активной, активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузки, наброс и сброс номинальной нагрузки.

Для проверки адекватности созданной модели АСЭ, проведена серия экспериментов, в ходе которых построены и проанализированы внешние (статические), динамические характеристики, которые отличаются от расчетных не более 8 % для статического и не более 10 % для динамического режима работы.

В ходе экспериментов проведено исследование гармонического состава выходного напряжения, так как для АСЭ одним из важнейших параметров является гармонический состав выходного напряжения, поскольку возбуждение выполняется переменным током от преобразователя частоты. При исследовании установившихся режимов оценивался спектральный состав напряжения на выводах АСГ при автономной работе с 50 % и 100 % загрузки генератора на активно-индуктивную нагрузку.

На рис. 10, представлены осциллограммы амплитуд гармонических составляющих напряжения в установившемся режиме при номинальной нагрузке.

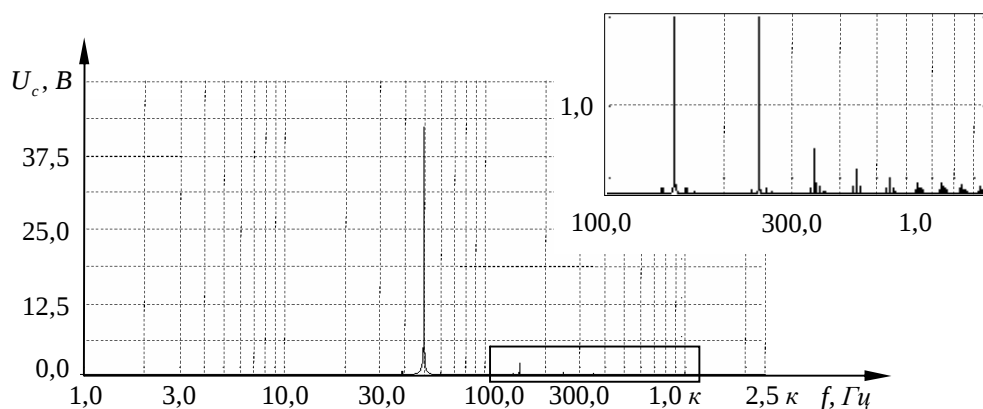


Рисунок 10. Амплитуды высших гармоник в напряжение статора АСГ в установившемся режиме

Коэффициенты высших гармоник напряжения со стороны статора генератора существенно меньше нормально допустимых значений по стандарту на качество электроэнергии ГОСТ 13109-97 и стандартом IEC 61000-4-30. Исходя из этого, при использовании ПЧ с системой ПВМ в цепи возбуждения АСГ не требуется дополнительных мер по улучшению качества выходного напряжения генератора

Адекватность теоретических и расчетных данных проверялась на основании сравнительного анализа характеристик, полученных при проведении экспериментов и компьютерного моделирования статических и динамических характеристик. Результаты экспериментальных исследований подтвердили корректность основных теоретических положений, выявленных в результате проведенных исследований и пригодность созданной компьютерной модели для исследования статических и динамических режимов АСЭ на базе АСГ.

В приложении приводятся: методика расчета АСГ; технические характеристики экспериментальной установки; технические данные системы ввода аналоговых данных; расчет погрешности измерения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. При создании автономных источников напряжения стабильной частоты для АСЭ при переменной частоте вращения приводного двигателя целесообразно применять АСГ, который обеспечивает высокое качество выходного напряжения при изменении частоты вращения приводного вала.

2. Разработана математическая модель АСГ, позволяющая исследовать установившиеся и переходные процессы АСЭ как её отдельных элементов, так и в целом, совместно с различной системой управления. Модель имеет открытую архитектуру, построенную по блочному принципу с возможностью оперативного изменения в зависимости от конкретно решаемой задачи.

3. Предложена система АРВ при переменных значениях частоты вращения ротора АСГ на базе теории нечетких множеств. Для рассматриваемой модели синтезирована система стабилизации амплитуды и частоты генерируемого напряжения с применением нечеткой логики.

4. Доказано, что использование нечеткого регулятора в системе АРВ генератора позволяет обеспечить требуемые показатели качества выходного напряжения в широком диапазоне изменения нагрузки. Сравнительный анализ динамических режимов автономного АСГ с нечеткими алгоритмами управления и классическими регуляторами, полученный при компьютерном моделировании показал, что использование нечеткой логики обеспечивает требуемую стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии и уменьшает время переходного процесса. Время регулирования и значение отклонения напряжения во всем диапазоне изменения нагрузки в среднем в 1,4 раза меньше по сравнению с использованием классического регулятора возбуждения генератора.

5. Проведено сравнение основных показателей качества электрической энергии в различных режимах работы АСЭ на базе АСГ. Установившееся отклонение напряжения при включении номинальной нагрузки с $\cos \varphi = 0,8$ $\delta U_y = 1,47\%$, а установившееся отклонение частоты равно $\delta f_y = 0,125\%$, коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения не превышает $K_U = 5\%$.

6. Проверена адекватность математической модели и достоверность теоретических и расчетных данных на основании сравнения практических результатов, полученных на базе учебного стенда «Модель электрической системы», с результатами расчетов, выполненных посредством компьютерного моделирования. Установлено, что зависимости, полученные при моделировании, достоверны и практически отличаются не более чем на 10 % от результатов математического моделирования, т.е. находятся в пределах допустимой точности инженерных расчетов. Экспериментальные результаты, полученные на основе результатов математического моделирования, свидетельствуют об адекватности разработанных математической и компьютерной моделей АСЭ реальным процессам.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемом журнале из списка ВАК

1. Семенов В.В., Рогинская Л.Э., Султангалеев Р.Н. Имитационная модель асинхронизированного синхронного генератора при автономной работе // Вестник саратовского государственного технического университета №1(23) выпуск 3, 2007. – С. 110 – 116.

В других изданиях

2. Семенов В.В. Анализ режимов работы энергетических систем в пакете MATLAB // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Материалы всероссийской молодежной научно-технической конференции. – Уфа, 2003. – С. 215.

3. Семенов В.В. Математическое моделирование переходных процессов синхронного генератора // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. – Уфа, 2003. – С. 147 – 150.

4. Семенов В.В., Семенов В.В. Модель синхронного генератора с симметричными магнитными параметрами в пакете Matlab // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова «Юбилейный 15 – й том посвященный столетию со дня рождения А.М. Бамдаса и Ю.Л. Мукосеева» / Под. ред. Ю.В. Гуляева. – Москва – Н.Новгород.: НГТУ, 2005. Т. 15. – С. 184 – 187.

5. Программа расчета переходных процессов в синхронном генераторе / Семенов В.В., Рогинская Л.Э., Султангалеев Р.Н. / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006613589. – М.: РосАПО, 2006.

6. Семенов В.В., Султангалеев Р.Н. Автономные системы электроснабжения с асинхронизированными синхронными машинами // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. – Уфа, 2006. – С. 220 – 224.

7. Семенов В.В. Асинхронизированные генераторы автономных электрических систем // Анализ, синтез и управление в сложных системах: Сборник научных трудов. – Саратов, 2006. – С. 24 – 27.

8. Семенов В.В. Виртуальная модель асинхронизированного синхронного генератора автономных систем // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сборник докладов международной научно-технической конференции, часть 2, Липецк, 2006. – С. 14 – 17.

9. Программа расчета динамических режимов работы асинхронизированного синхронного генератора с системой стабилизации параметров на базе нечеткой логики / Семенов В.В., Рогинская Л.Э., Султангалеев Р.Н. / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007613666. – М.: РосАПО, 2007.

10. Семенов В.В., Султангалеев Р.Н. Нечеткое управление асинхронизированным синхронным генератором при автономной работе // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. – Уфа, 2007. – С. 103 – 106.

11. Семенов В.В. Динамические режимы асинхронизированного синхронного генератора в дизель-электрических агрегатах // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сборник докладов II ежегодной международной научно-технической конференции, Липецк, 2007. – С. 55 – 60.

12. Семенов В.В. Оптимизация переходных процессов асинхронизированного синхронного генератора при автономной работе // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. Том 2. – Уфа, 2007. – С. 38.

13. Семенов В.В., Костенко А.И. Асинхронно вентильный каскад на базе универсальной машины переменного тока // Энергетика: экология, надежность, безопасность: X Всероссийский студенческий научно-технический семинар. – Томск, 2008. – С. 70 – 74.

14. Семенов В.В. Цифровая система управления током возбуждения асинхронизированного синхронного генератора // Электронные устройства и системы: Межвузовский научный сборник. – Уфа, 2008. – С. 106 – 110.

Семенов Василий Владимирович

**АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ
АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.08.2008 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,0
Усл. кр. – отт. 1,0 Уч. – изд. л. 0,9
Тираж 100 экз. Заказ № 296. Бесплатно.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа – центр, ул. К. Маркса, 12