

На правах рукописи



Седойкин Дмитрий Николаевич

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ
ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ
КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра Великого».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Юрганов Алексей Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
ректор ФГАОУ ДПО
«Петербургский энергетический
институт повышения квалификации»
Назарычев Александр Николаевич

кандидат технических наук,
начальник центра удаленного
управления и безопасности
АО «Научно-технический центр
федеральной сетевой компании
единой энергетической системы»
Сорокин Дмитрий Владимирович

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет
«МЭИ»

Защита состоится «21» декабря 2018 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» www.spbstu

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов Максим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Одной из основных задач обеспечения надежного функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) является устойчивая работа генерирующих агрегатов. В свою очередь, она в значительной степени определяется системой управления их возбуждением.

На начальных этапах своего развития регулирование возбуждения велось по отклонению статорного напряжения с возможностью релейной форсировки возбуждения, позволяющей увеличить динамическую устойчивость при тяжелых авариях. Однако такое построение структуры регулирования возбуждением не обеспечивало эффективного демпфирования синхронных качаний в ЭЭС. Качественный скачок в развитии систем регулирования возбуждения связан с разработкой автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) сильного действия. Введение стабилизирующих каналов по производным режимных параметров позволило повысить точность регулирования напряжения, обеспечить высокие пределы статической и динамической устойчивости за счет более эффективного демпфирования электромеханических колебаний. Концепция сильного регулирования, разработанная в середине 50-х годов, не потеряла своей актуальности и на сегодняшний день, более того, все современные российские и зарубежные системы автоматического управления возбуждением (САУВ) строятся именно по этим принципам. Переход от аналоговой к цифровой аппаратной базе позволил не только улучшить качество реализации уже разработанных алгоритмов управления, но и открыл возможности для создания и развития новых направлений совершенствования АРВ. Наряду с улучшением качества переходных процессов стоит проблема его сохранения при изменении схемно-режимных условий работы генератора.

Степень разработанности. Существующие САУВ характеризуются жесткой структурой с фиксированными значениями коэффициентов АРВ и не позволяют решить проблему инвариантности системы управления к изменению параметров объекта. Одним из возможных путей решения этой проблемы является применение адаптивных законов регулирования.

Цель и задачи.

Целью диссертационной работы являлась разработка методов проектирования принципиально новых структур САУВ синхронных генераторов (СГ), которые при переходе на цифровые технологии позволят повысить надежность и безопасность энергосистем в нормальных и чрезвычайных ситуациях. Реализация этой цели связана с комплексным решением задач улучшения качества регулирования возбуждения и сохранения его вне зависимости от схемно-режимных условий работы СГ.

Объектом исследования являлся СГ при различных схемно-режимных условиях его работы в энергосистеме.

Предметом исследования являлись методы и алгоритмы управления возбуждением СГ при различных схемно-режимных условиях его работы, обеспечивающие оптимальное регулирование напряжения и интенсивное демпфирование электромеханических колебаний.

В соответствии с целью были поставлены следующие исследовательские задачи:

1. Провести анализ современных САУВ, который предполагает изучение основных принципов их построения и функционирования, с целью выявления достоинств и недостатков.

2. На основе проведенного анализа сформулировать основные причины или выявить основные факторы, оказывающие негативное влияние на качество переходных процессов.

3. Выбрать метод моделирования, тип модели объекта управления, обеспечить адекватность и эффективность модели для реализации поставленной цели.

4. Рассмотреть перспективные направления совершенствования автоматических регуляторов возбуждения и методы их построения.

5. На основе новых перспективных методов разработать новую, более эффективную, или усовершенствовать существующую САУВ, улучшающую качество регулирования возбуждения и сохраняющую его вне зависимости от схемно-режимных условий работы СГ.

6. Провести исследование разработанной САУВ, оценить ее эффективность и соответствие поставленной цели.

Научная новизна.

1. Разработан метод проектирования адаптивных САУВ, которые являются дальнейшим развитием систем управления с параметрической адаптацией на основе табличной модели. Главным недостатком адаптивных систем на основе табличной модели является дискретность в выборе настройки. В таких системах качество переходного процесса будет меняться в зависимости от того, насколько текущий режим близок к табличному. Адаптивные системы, спроектированные на основе предложенного в данной работе метода, лишены этого недостатка. В состав таких систем управления входит нечеткая модель, осуществляющая параметрическую адаптацию автоматического регулятора, который в общем случае может быть, как линейным, так и нелинейным. Экспертная база знаний нечеткой модели представляет собой таблицу оптимальных настроек для определенных, конечных по своему числу, состояний объекта управления. Методы теории нечетких множеств позволяют провести аппроксимацию, результатом которой являются поверхности или пространства вывода, и тем самым перейти от конечного числа настроек к

бесконечному. При этом дискретная таблица настроек трансформируется в непрерывные поверхности или пространства.

2. Предложенный метод позволил спроектировать САУВ, которая не только адаптируется к изменениям схемно-режимных условий, но и решает задачу адаптации АРВ к различным типам генераторов.

3. Введено понятие «идеализированный АРВ». Впервые на основе этой структуры получены монотонные переходные процессы одновременно по двум регулируемым переменным: напряжению статора и скольжению. Показано, что решение проблемы оптимального регулирования возбуждением заключается прежде всего в снижении амплитудно-фазовых искажений сигналов АРВ, обусловленных методами их измерения и обработки.

4. Разработанный блок адаптации на основе нечеткого аппроксиматора (НА) позволил выявить закономерности, связывающие коэффициенты АРВ с параметрами эквивалентной расчётной схемы «генератор-линия-шины бесконечной мощности (ШБМ)», при соблюдении которых реализуется оптимальное регулирование, обеспечивающее отсутствие перерегулирования переходного процесса статорного напряжения и единичную степень затухания электромеханических колебаний.

5. Для цифровых САУВ разработан быстродействующий метод расчета частоты напряжения по мгновенным значениям статорного напряжения.

6. Разработаны модели цифровых адаптивных САУВ с возможностью их реализации на практике.

7. Предложен метод, позволяющий оценить эффективность параметрической адаптации. Метод основан на расчете значения функции принадлежности переходного процесса, оцениваемой адаптивной системой, к множеству «эталонный переходный процесс». Для этого вводится такой показатель как «степень адаптивности», который характеризует соответствие обеспечиваемых критериев качества переходных процессов заданным при различных параметрах объекта управления.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость заключается в разработке нового класса адаптивных систем управления, в состав которых входит нечеткая модель, позволяющая осуществлять параметрическую адаптацию на основе информации о состоянии объекта управления. Разработанный метод проектирования позволяет трансформировать дискретную таблицу настроек в непрерывные поверхности или пространства, что ставит под сомнение целесообразность дальнейшего применения адаптивных систем/регуляторов с табличной моделью.

Показано преимущество применения методов теории нечетких множеств при решении задачи поиска оптимальных коэффициентов для заданной структуры регулятора. Это преимущество становится более очевидным при сравнении этих методов с широко распространенным методом D-разбиения в

плоскости двух параметров, который предполагает проведения исследования в строго заданной плоскости. Результатом метода D-разбиения является набор точек среза поверхности. Для получения самой кривой среза их необходимо аппроксимировать. Теория нечетких множеств позволяет с легкостью создавать многомерные пространства и оперировать ими, т.е. позволяет связывать между собой n -ое количество параметров.

В работе поднимается проблема корректного использования методов нечеткого управления. Теория нечетких множеств предлагает бесконечное число вариантов реализации нелинейных ПИД законов регулирования, но не решает проблему выбора оптимального варианта. На примере «идеализированного АРВ» показано, что линейные регуляторы способны обеспечить монотонность переходных процессов при условии отсутствия амплитудно-фазовых искажений сигналов, характеризующих состояние объекта управления. Нечеткие регуляторы не решают проблему минимизации этих искажений, поэтому их применение в системах управления возбуждением нецелесообразно.

Понятие «идеализированный АРВ» косвенным образом затрагивает и проблему эффективности применения тех или иных физических величин в качестве стабилизирующих входных переменных. Речь идет о механической частоте вращения и частоте напряжения. В данной работе показано, что «идеализированный АРВ» с таким стабилизирующими величинами как механическое скольжение и ее производная, способен обеспечить монотонный характер переходных процессов.

Предложенный метод определения частоты напряжения по мгновенным значениям статорного напряжения применен в электроприводах с зависимым инвертором тока, выпускаемых ООО НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары).

Применение НА не ограничивается адаптивными системами, он может применяться отдельно, в качестве средства автоматизированного расчета параметров АРВ для эквивалентной схемы ЭЭС «генератор-линия-ШБМ».

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории автоматического управления, теории нечетких множеств и теории электрических машин. В качестве основного метода исследования использовалось компьютерное моделирование с применением численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод построения адаптивных систем управления на основе НА.
2. Выявленные закономерности, связывающие коэффициенты АРВ с параметрами эквивалентной схемы «генератор-линия-ШБМ», при соблюдении которых обеспечивается оптимальное регулирование, характеризующееся

отсутствием перерегулирования в переходном процессе статорного напряжения и единичной степенью затухания электромеханических колебаний.

3. Метод определения частоты напряжения по мгновенным значениям статорного напряжения.

4. Математические модели цифровых адаптивных САУВ.

5. Метод оценки эффективности адаптивных САУ на основе теории нечетких множеств.

Степень достоверности.

Степень достоверности предложенных методов, научных выводов и рекомендаций, подтверждается корректным использованием математического аппарата современной теории автоматического управления, теории нечетких множеств, методов математического моделирования, а также сходимостью результатов моделирования, полученных на верифицируемой и эталонной моделях.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VII Международном симпозиуме «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (г. Миасс, 2012г.), XI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2016» (г. Иваново, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности» (г. Белгород, 2017 г.), на заседаниях кафедры «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета имени Петра Великого.

Публикации и патенты.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 4 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК. Получен патент на изобретение.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 91 наименование, и приложения. Основная часть работы изложена на 117 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, дана краткая характеристика работы.

В первой главе диссертационной работы дано краткое описание современных САУВ и выполняемых ими функций. Показано, что требования, предъявляемые к САУВ, имеют внутренние противоречия. Изменение тока возбуждения по-разному влияет на напряжение и частоту вращения генератора, а именно эти выходные переменные определяют качество электроэнергии и устойчивость ЭЭС. При увеличении возбуждения напряжение увеличивается за счет увеличения суммарного потока, но вместе с этим происходит увеличение электромагнитного момента, который для первичного двигателя является тормозящим, что приводит к уменьшению скорости вращения генератора. Попытка отдельной оптимизации переходного процесса одной из выходных переменных негативно влияет на переходный процесс другой, что в некоторых случаях приводит к потере устойчивости всей системы. Для решения этих двух системных задач необходимо найти оптимальное соотношение между коэффициентами усиления по каналам напряжения и стабилизации.

Рассмотрена основная концепция структурного построения САУВ. Особое внимание уделено системному стабилизатору, а именно каналу стабилизации по отклонению частоты напряжения. Сформулирована проблема, возникающая при формировании стабилизирующего сигнала по отклонению частоты: определить точное значение отклонения частоты напряжения не представляется возможным, поскольку неизвестно, как в результате переходного процесса изменится установившееся значение синхронной скорости. Показаны недостатки применяемого метода формирования стабилизирующего сигнала по отклонению частоты и выявлены причины, оказывающие негативное влияние на качество переходных процессов, которые заключаются в следующем: в реальных САУВ, сигнал отклонения частоты заменяется ее производной, сдвинутой на четверть периода в сторону запаздывания. Это и является основной причиной возникновения амплитудно-фазовых искажений стабилизирующих сигналов. В свою очередь для обеспечения оптимального регулирования необходимо демпфировать электромеханические колебания на начальном этапе их развития, а данный метод не позволяет осуществить это из-за переходного процесса в самом канале стабилизации.

Вторая глава посвящена вопросам комплексного математического моделирования СГ в составе ЭЭС. Рассмотрены основные подходы к построению моделей СГ в составе ЭЭС, их преимущества и недостатки. Приведено математическое описание основных компонентов модели, в частности, первичного двигателя, самого СГ и внешней электрической сети.

Для проведения исследований, связанных с разработкой САУВ, СГ должен быть представлен моделью, которая наиболее полно отражает реальные

процессы. Линеаризованные модели имеют ограничения, связанные с невозможностью их применения при больших возмущающих воздействиях. Исходя из этого, СГ представлен нелинейной dq -моделью, основанной на полной системе уравнений Парка-Горева. Насыщение магнитной системы СГ учитывается с помощью коэффициента K_{sat} , который представляет собой производную от нормальной характеристики холостого хода.

В третьей главе рассматриваются основные понятия теории нечетких множеств. Дается описание структуры нечеткой модели, её основных элементов и операций. Рассматриваются основные этапы синтеза нечетких систем управления и дается классификация нечетких моделей, их краткая характеристика и особенности.

На примере синтеза нечеткого двухвходового регулятора показан традиционный подход к разработке структур управления на основе нечеткой логики. Проведена оценка полученной структуры, выявлены ее основные недостатки и показана нецелесообразность реализации классических структур регуляторов в нечетком виде для управления возбуждением генераторов. Сформулированы основные противоречия, которые могут возникнуть при использовании нейронечетких методов построения систем управления возбуждением. Особое внимание уделено тому, что нечеткий регулятор, спроектированный на основе правил экспертной базы знаний классической теории автоматического управления, не способен сохранить заданное качество регулирования при изменении параметров объекта управления, поскольку имеет жесткую структуру и строго определенный алгоритм управления.

В четвертой главе представлен новый метод построения адаптивных систем на основе НА. В общем виде сформулирована основная задача адаптивного управления возбуждением, которая сводится к следующему: как должны изменяться коэффициенты каналов стабилизации при изменении параметров ЭЭС и коэффициента усиления регулятора напряжения, чтобы переходные процессы по управляющему и возмущающему воздействиям имели бы аperiodический или монотонный характер. Ввиду нелинейности объекта управления, в состав которого входит СГ и внешняя электрическая сеть, решение данной задачи аналитическими методами затруднено. Выявить закономерности, связывающие оптимальные коэффициенты АРВ с параметрами объекта управления, возможно на основе методов теории нечеткой логики. Согласно теореме FAT (Fuzzy Approximation Theorem) любая математическая система, в том числе и нелинейная, может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике. Для решения задачи параметрической адаптации предлагается ввести в состав САУВ СГ НА, который должен решать следующее подзадачи:

1. Определять оптимальную настройку АРВ для всех схемно-режимных условий работы генератора.
2. Адаптировать САУВ для различных типов СГ.

Вторая подзадача является не менее важной. Если НА будет разрабатываться под конкретный тип генератора, то процедура настройки такой системы при переходе на другой генератор будет сопоставима с разработкой новой системой управления.

Реализовывать всю адаптивную систему управления в нечетком виде нецелесообразно. АРВ должен быть вынесен за пределы нечеткой части и реализован линейно. Это позволит существенно сократить количество правил экспертной базы знаний за счет сокращения входных переменных нечеткой модели. В результате такого построения САУВ разделяется условно на две части: АРВ и НА (рисунок 1).

Предложен общий алгоритм синтеза основополагающего элемента адаптивной САУВ СГ – НА.

Этап 1. Задать требуемое качество переходных процессов, т.е. определить предельные минимально или максимально допустимые значения показателей качества переходных процессов: максимальное перерегулирование, минимальный коэффициент демпфирования, максимальное время переходного процесса и т. д.

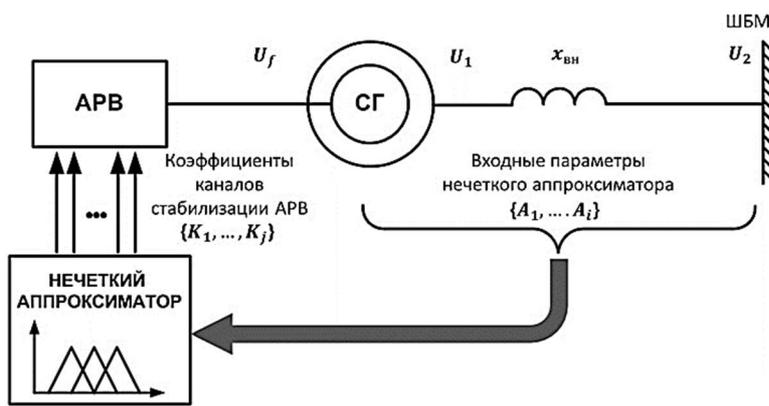


Рисунок 1 – Функциональная схема адаптивной САУВ на основе НА.

Этап 2. Определить параметры эквивалентной схемы ЭЭС «генератор-линия-ШБМ», на основе которой будет проводиться синтез НА. В дальнейшем эта эквивалентная схема будет называться «базовой».

Этап 3. Определить параметры, которые будут использоваться в качестве входных переменных НА: $\mathbf{A} = \{A_1 \dots A_i\}$.

Этап 4. Определить выходные параметры НА. Выбор будет определяться структурой АРВ для которой производится синтез НА.

Этап 5. На компьютерной модели «базовой» ЭЭС «генератор-линия-ШБМ» методом подбора коэффициентов каналов стабилизации $K_1 \dots K_j$ для каждого набора входных переменных необходимо получить требуемое качество переходных процессов (j – количество каналов стабилизации, K_j – коэффициент усиления j -ого канала стабилизации). Конечным итогом подбора коэффициентов является массив или набор опорных точек поверхности или пространства отображения (вывода) НА:

$$(a_{11}, \dots, a_{i1}, k_{11}, \dots, k_{j1}), (a_{12}, \dots, a_{i2}, k_{12}, \dots, k_{j2}) \dots (a_{1n}, \dots, a_{in}, k_{1n}, \dots, k_{jn})$$

где i -количество входных переменных; n -количество опорных точек;

a_{in} – n -ое значение i -ой входной переменной; $k_{11} \dots k_{jn}$ – значения коэффициентов усиления каналов стабилизации.

Опорные точки, полученные в результате моделирования и оценки качества переходных процессов, являются правилами, определяющими экспертную базу знаний НА.

Экспертная база формируется на основе выражения:

Правило n : ЕСЛИ ($A_1 = a_{1n}$) И ($A_2 = a_{2n}$) И...И ($A_i = a_{in}$), ТО ($K_1 = k_{1n}$; $K_2 = k_{2n} \dots K_j = k_{jn}$)

Этап 6. Здесь необходимо задать тип функций принадлежности входных переменных. Поскольку НА строится на основе модели Сугено 0-ого порядка, то определять тип функций принадлежности выходных переменных не требуется. Расчет коэффициентов осуществляется согласно следующему выражению:

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ji} \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$$

K_j – коэффициент j -ого канала стабилизации; k_{ji} – заключение i -ого правила (координата опорной точки); μ_i – степень выполнения i -ого правила.

Введено понятие «идеализированный АРВ», структура которого представлена на рисунке 2. Идеализированный АРВ имеет канал регулирования напряжения с коэффициентом усиления k_{u0} и два канала стабилизации: канал стабилизации по отклонению скорости с коэффициентом $k_{\Delta\omega}$ и канал стабилизации по избыточной мощности с коэффициентом $k_{\Delta P}$. Идеализация

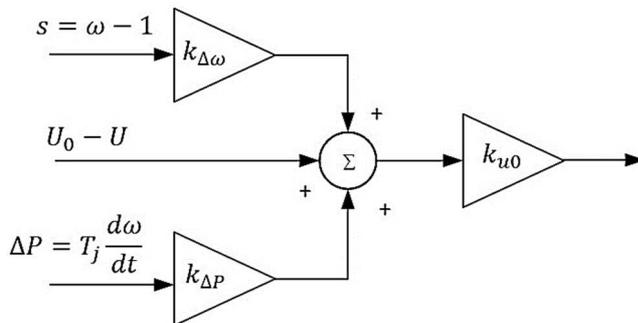


Рисунок 2 – Структурная схема «идеализированного» АРВ.

данной структуры заключается в том, что методы измерения и обработки входных сигналов не вносят амплитудно-фазовых искажений в выходной сигнал АРВ, т.е. каналы обратных связей являются пропорциональными с коэффициентами равными 1. На основе идеализированного АРВ впервые показана теоретическая возможность реализации переходных процессов, которые характеризуются нулевым

перерегулированием $\sigma=0$ и коэффициентом демпфирования электромеханических колебаний $\zeta \rightarrow \infty$. Это подтверждает правильность выводов о несовершенстве применяемого в настоящее время метода формирования стабилизирующего сигнала отклонения частоты напряжения. Кроме того, идеализация структуры АРВ также показывает необоснованность применения нечетких ПИД регуляторов в САУВ СГ, поскольку оптимальное регулирование возбуждения можно обеспечить на основе линейных систем.

Для идеализированного АРВ с учетом поставленных задач произведен синтез НА, который состоял из двух этапов:

1. Синтез нечеткого ядра или нечеткой модели аппроксиматора.

2. Разработка алгоритмов коррекции входных и выходных параметров НА, позволяющих учесть электромагнитные свойства, режим работы СГ и параметры внешней сети.

Посредством нечеткого двухвходового ядра аппроксиматора реализуются оптимальные соотношения между коэффициентами системного стабилизатора, электромеханической постоянной времени СГ и коэффициентом усиления регулятора напряжения. Данные закономерности демонстрируются поверхностями вывода, представленными на рисунке 3.

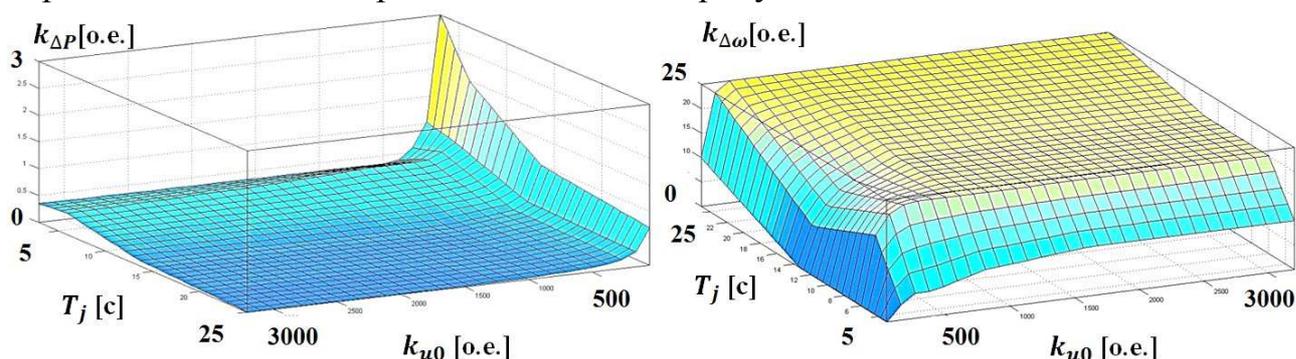


Рисунок 3 – Поверхности вывода для коэффициентов $k_{\Delta P}$ и $k_{\Delta \omega}$.

Учет влияния внешней электрической сети и параметров, характеризующих скорость протекания электромагнитных процессов в генераторе, выполнен путем коррекции входных и выходных переменных НА. Входная коррекция коэффициента k_{u0} позволяет учесть электромагнитные свойства генератора:

$$k'_{u0} = k_{u0} \frac{r_f \cdot x_{ad \delta}}{x_{ad} \cdot r_{f \delta}}$$

где x_{ad} и r_f – параметры генератора, входящего в состав ЭЭС, для которой производится расчет параметров АРВ; $x_{ad \delta}$ и $r_{f \delta}$ – параметры базового генератора, на основе которого произведен расчет опорных точек.

Адаптация системы управления к изменениям внешнего индуктивного сопротивления сети выполняется на основе выходной коррекции коэффициента $k_{\Delta \omega}$:

$$k_{\Delta \omega} = k'_{\Delta \omega} \frac{\max(x_{вн}, 0,2)}{x_{вн \delta}}$$

где $k'_{\Delta \omega}$ – коэффициент, рассчитанный НА; $x_{вн}$ – индуктивное сопротивление линии ЭЭС, для которой определяются коэффициенты АРВ; $x_{вн \delta}$ – индуктивное сопротивление линии базовой ЭЭС, на основе которой произведен расчет опорных точек.

Для обеспечения заданного качества переходных процессов при генерации активной мощности в диапазоне $0 \leq P < 0.3$ для некоторых типов генераторов необходима дополнительная коррекция. Коэффициенты,

рассчитанные НА, необходимо умножить на величину, определяемую следующим выражением:

$$k_p = 10e^{-10P} + 1;$$

k_p – коэффициент коррекции по мощности; P – величина активной мощности в о.е.

Результатом введения рассмотренных выше корректирующих воздействий является блок адаптации на основе НА, структурная схема которого представлена на рисунке 4.

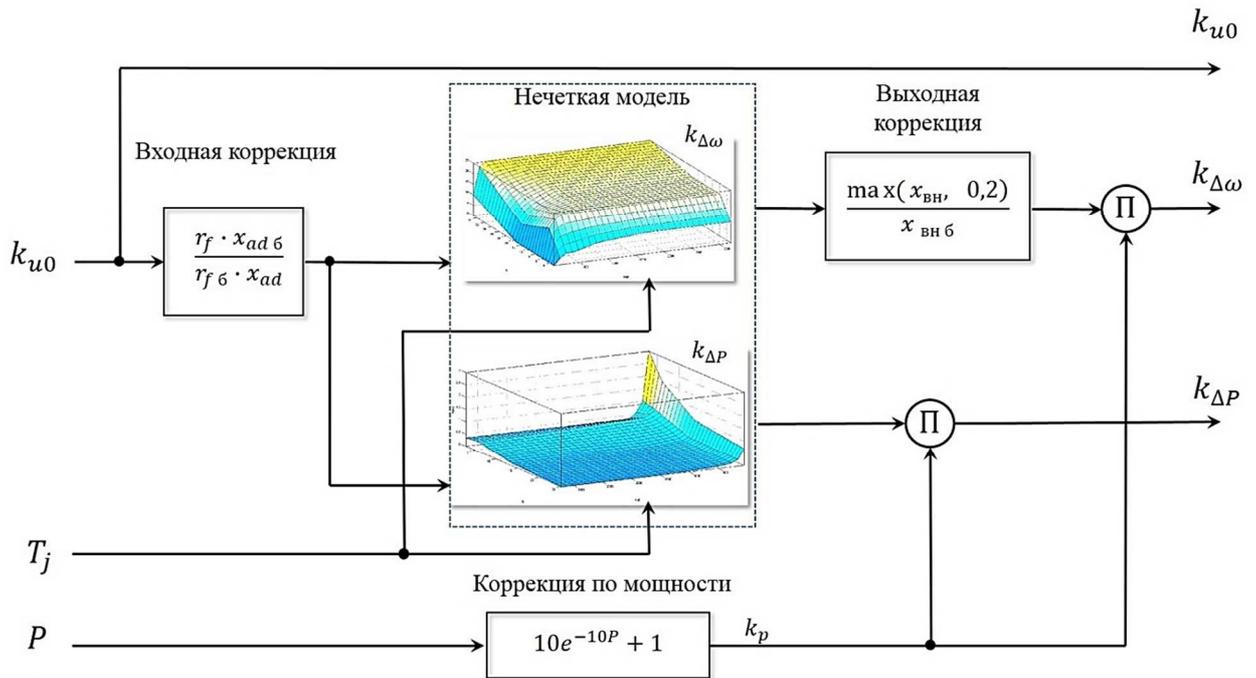


Рисунок 4 – Структурная схема блока адаптации на основе НА.

Разработанный блок адаптации позволил выявить закономерности, связывающие коэффициенты АРВ с параметрами эквивалентной схемы «генератор-линия-ШБМ», отражающей основное движение исследуемого генератора в ЭЭС, при соблюдении которых обеспечивается оптимальное управление, характеризуемое отсутствием перерегулирования переходного процесса статорного напряжения и единичной степенью затухания электромеханических колебаний (рисунок 5).

Верификация и исследование переходных процессов при больших возмущающих воздействиях выполнены на математических моделях, применяемых ЗАО НПП «Русэлпром–Электромаш» при разработке реальных САУВ. Результаты моделирования, полученные на эталонной и верифицируемой моделях, показали, что максимальная относительная погрешность рассогласования/расхождения не превышает 10%. Это свидетельствует о высокой степени достоверности результатов проведенного исследования.

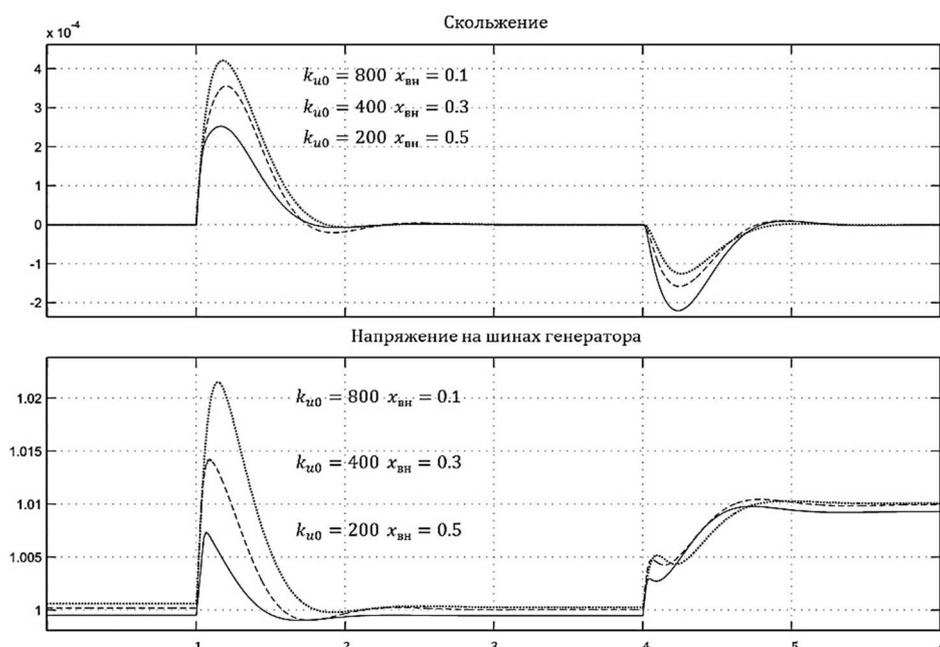


Рисунок 5 – Переходные процессы по возмущающему ($\Delta P = 0.05$) и управляющему ($\Delta U_0 = 0.01$) воздействиям для различных ЭЭС с гидрогенератором СВФ 1680/185-64.

В пятой главе исследуются модели цифровых адаптивных САУВ, наиболее точно имитирующие реальные. Для цифровых САУВ разработан метод, позволяющий на каждой выборке определять частоту и амплитудное значение напряжения на шинах генератора. Согласно данному методу трехфазную машину замещают двухфазной, т.е. осуществляется переход от осей abc к осям $\alpha\beta$:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= U_m \cos \gamma \\ u_\beta &= U_m \sin \gamma \end{aligned} \quad U_m = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$$

γ - угол между преобразующим вектором \vec{U}_m и осью α .

Далее необходимо произвести нормирование с целью снижения погрешности вычисления частоты, связанной с изменением амплитуды напряжения, и продифференцировать нормированные проекции:

$$\begin{aligned} \dot{u}_\alpha &= \frac{u_\alpha}{U_m} = \cos \gamma & \frac{d\dot{u}_\alpha}{dt} &= -\frac{d\gamma}{dt} \sin \gamma \\ \dot{u}_\beta &= \frac{u_\beta}{U_m} = \sin \gamma & \frac{d\dot{u}_\beta}{dt} &= \frac{d\gamma}{dt} \cos \gamma \end{aligned}$$

Тогда частота сетевого напряжения в о.е. будет определяться выражением:

$$f_U = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{\sqrt{\left(\frac{d\dot{u}_\alpha}{dt} \sin \gamma\right)^2 + \left(\frac{d\dot{u}_\beta}{dt} \cos \gamma\right)^2}}{100\pi}$$

Основной целью этого исследования являлась оценка эффективности применения разработанного НА в САУВ, в которых в качестве

стабилизирующих входных переменных используются отклонение частоты напряжения и ее производная. Исследование построено на анализе моделей двух цифровых адаптивных САУВ.

В первом варианте адаптивная система управления выполнена на основе статического регулятора напряжения. Стабилизирующий сигнал по отклонению частоты формируется классическим способом с применением дифференцирующего звена с большой постоянной времени. Важно еще раз отметить, что большая постоянная времени необходима не только для фильтрации высокочастотных составляющих, обусловленных методами измерения и операцией дифференцирования, а, в первую очередь, для обеспечения фазового сдвига с целью получения синфазности выходного сигнала канала стабилизации с реальным отклонением частоты напряжения. Структура АРВ является неизменной за исключением значений коэффициентов усиления $k_{\Delta\omega}$ и $k_{\Delta P}$, расчет которых, как и в случае с «идеальным» регулятором, осуществляется НА на основе параметров схемы «генератор-линия-ШБМ» и коэффициента усиления k_{u0} .

Во втором варианте, наоборот, преднамеренно предполагается стабильность синхронной частоты в ЭЭС. Отклонение частоты определяется как обычная разность: $\Delta f_U = f_U - 1$ [о. е.]. При этом ошибка в регулировании напряжения устраняется за счет применения астатического регулятора напряжения, который выполнен пропорционально-интегральным. Такая реализация АРВ предполагает минимизацию амплитудно-фазовых искажений стабилизирующего сигнала по отклонению частоты

Показано, что снижение качества переходных процессов цифровых адаптивных САУВ по сравнению с идеализированной структурой обусловлено заменой входных переменных системного стабилизатора, а именно механической частоты вращения на частоту напряжения, а также, применительно к структуре со статическим регулятором напряжения, амплитудно-фазовыми искажениями стабилизирующего сигнала по отклонению частоты.

Предложен метод оценки эффективности параметрической адаптации систем управления с применением теории нечетких множеств. Для этого предлагается ввести такой показатель как «степень адаптивности», который характеризует соответствие обеспечиваемых критериев качества переходных процессов заданным при различных параметрах объекта управления. Количественная оценка степени адаптивности САУВ к изменению параметров объекта управления проведена на основе функций принадлежности полученных переходных процессов к множеству «монотонный переходный процесс». В классической интерпретации монотонными переходными процессами называют такие процессы, когда производная регулируемой величины на протяжении всего переходного процесса не изменяет свой знак. В данном случае множество «монотонные переходные процессы» характеризовалось нулевым перерегулированием и степенью затухания электромеханических колебаний

равной 1. Тогда функции принадлежности переходного процесса к множеству «монотонные» могут определяться согласно одному из следующих выражений:

$$\mu_{mono} = \min(1 - \sigma; 1 - 1/\xi) \text{ или } \mu_{mono} = (1 - \sigma) \cdot (1 - 1/\xi);$$

σ – перерегулирование в о.е., $\sigma \in [0,1]$; ξ – коэффициент демпфирования, $\xi \in [1, \infty]$; выражение $1 - 1/\xi$ определяет степень затухания колебаний.

Проведена оценка эффективности адаптивных САУВ на основе анализа показателей качества переходных процессов по управляющему воздействию. Согласно предложенному методу определены средние значения степени адаптивности $\mu_{ср}$ при изменении коэффициента усиления регулятора напряжения k_{u0} и внешнего индуктивного сопротивления $x_{вн}$, а затем рассчитаны суммарные коэффициенты μ_{Σ} , характеризующие в целом каждую из систем.

Результаты анализа эффективности адаптивных САУВ показали, что адаптивная САУВ с астатическим регулятором напряжения более эффективна и превосходит САУВ со статическим регулятором на $\Delta\mu_{\Sigma}=0.12$.

Рассмотрена основная проблема практической реализации адаптивных САУВ и предложен возможный вариант ее решения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Рассмотрены структуры современных российских цифровых АРВ. Показаны их основные недостатки. Сформулированы и обоснованы основные причины, которые препятствуют получению оптимальных переходных процессов даже в тех условиях, когда параметры внешней по отношению к генератору сети остаются неизменными.

2. Показана необоснованность применения термина «адаптивные» к нечетким и нейронечетким САУВ, построенных на основе ПИД закона регулирования, в которых в качестве входных сигналов используются регулируемые и стабилизируемые переменные. В случае нейронечетких систем термин «адаптация» характеризует метод автоматизированной настройки модели. Результатом гибридного обучения является жесткая, неизменяемая в процессе работы, нечеткая структура, обеспечивающая оптимальное управление только для режима, характеризуемого обучающей выборкой.

3. На основе теории нечетких множеств разработан метод построения адаптивных САУВ, структура которых условно делится на две части: АРВ и НА, который осуществляет параметрическую адаптацию АРВ к изменению состояния объекта управления «генератор-линия-ШБМ».

4. Введено понятие «идеализированного АРВ» и для этой структуры показана теоретическая возможность одновременного получения монотонных переходных процессов по скольжению и напряжению статора. В соответствии с разработанным методом построения адаптивных САУВ, для идеализированного АРВ проведен синтез НА, который определяет

оптимальную настройку АРВ для всех схемно-режимных условий работы генератора и адаптирует САУВ для работы с различными типами СГ.

5. В результате исследования полученной адаптивной САУВ выявлено, как должны изменяться коэффициенты каналов стабилизации АРВ от коэффициента усиления регулятора напряжения k_{u0} , а также от параметров схемы «генератор-линия-ШБМ», для обеспечения оптимального регулирования, которое характеризуется отсутствием перерегулирования в переходном процессе статорного напряжения и степенью затухания электромеханических колебаний равной 1.

6. На математических моделях ЗАО НПП «Русэлпром-Электромаш» проведены верификация адаптивной САУВ и ее сравнение с регулятором «АРВ-РЭМ700».

7. Для цифровых САУВ разработан быстродействующий высокоточный метод, позволяющий на каждой выборке определять частоту и амплитудное значение напряжения на шинах генератора.

8. Проведено исследование совместной работы НА с цифровыми моделями, наиболее точно имитирующими реальные АРВ. Основной целью этого исследования являлась оценка эффективности применения НА в адаптивных САУВ, у которых в качестве стабилизирующих входных переменных используются отклонение частоты напряжения и ее производная. В ходе исследования были разработаны модели цифровых адаптивных САУВ со статическим и астатическим регуляторами напряжения, предложен метод оценки их эффективности. Результаты исследования показали:

- возможность практической реализации параметрической адаптации систем управления на основе НА;

- наиболее эффективной структурой является адаптивная САУВ с астатическим регулятором напряжения;

- снижение качества переходных процессов цифровых адаптивных САУВ по сравнению с идеализированной структурой обусловлено заменой входных переменных системного стабилизатора, а также амплитудно-фазовыми искажениями стабилизирующего сигнала по отклонению частоты.

9. Предложен метод, позволяющий оценить эффективность адаптивных систем управления. Метод основан на расчете значения функции принадлежности переходного процесса, оцениваемой адаптивной системы, к множеству «эталонный переходный процесс». Было предложено ввести такой показатель как «степень адаптивности», который характеризует соответствие обеспечиваемых критериев качества переходных процессов заданным при различных параметрах объекта управления.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ:

1. Седойкин Д. Н. Новая структура канала стабилизации режима синхронного генератора и общие принципы его настройки на основе нечеткого аппроксиматора / Д. Н. Седойкин, А. А. Юрганов // Известия НТЦ Единой энергетической системы.–2016.– № 1 (74).– С. 67–74.

2. Седойкин Д.Н. Способ расчета частоты по мгновенным значениям напряжений в трехфазных сетях / Д. Н. Седойкин, А. А. Юрганов // Известия НТЦ Единой энергетической системы.– 2017.–№ 2 (77).– С. 74–77.

3. Седойкин Д.Н. Эффективность адаптивного АРВ на основе нечеткого аппроксиматора при работе синхронного генератора в сложной энергосистеме / Д. Н. Седойкин, А. А. Юрганов // Релейная защита и автоматизация.–2018.–№ 2 (Июнь).– С. 32–37.

4. Седойкин Д.Н. Адаптивный автоматический регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора в режиме недо возбуждения синхронной машины / Д. Н. Седойкин, А. А. Юрганов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. –2018– № 29 (Том 24).– С. 22–29.

Публикации в других изданиях:

5. Седойкин Д.Н. Анализ САУ возбуждением синхронного двигателя с независимыми контурами регулирования напряжения и угла φ // Материалы VII Международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». Том 1.– М.: РАН, 2012 – С.220-228.

6. Седойкин Д.Н. Общие принципы построения адаптивных систем автоматического управления возбуждением синхронного генератора на основе нечеткого аппроксиматора // Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2016». Т. 3.– Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – С. 6-7.

7. Седойкин Д.Н. Адаптивный регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности» 31 августа 2017 г. Часть I.– Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АНПИ), 2017. – С. 117-121.

Объекты интеллектуальной собственности:

8. Способ построения адаптивной системы автоматического управления возбуждением: пат. 2629378 Рос. Федерация: МПК H02P 9/14, G05B 13/02, G06G 7/26, H02P 9/00 / Д.Н. Седойкин; заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». –№ 2016114111; заявл. 12.04.2016; опубл. 29.08.2017, Бюл. №25.– 12 с.