

На правах рукописи

КАРИМОВ Вагиз Ильгизович

**КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ
С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНЫХ
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа - 2012

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гизатуллин Фарит Абдулганеевич,
доктор технических наук, профессор
Утляков Геннадий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Воронин Сергей Григорьевич
заведующий кафедрой электромеханики
и электромеханических систем
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет»
(национальный исследовательский
университет)
доктор технических наук, профессор
Аипов Рустам Сагитович
заведующий кафедрой электрических
машин и электрооборудования
ФГБОУ ВПО «Башкирский
государственный аграрный
университет»

Ведущее предприятие: ОАО «Уфимское агрегатное
производственное объединение»

Защита состоится «26» декабря 2012г. в 9⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном
авиационном техническом университете по адресу: 450000, г. Уфа,
ул. К.Маркса, 12.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке УГАТУ.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета доктор технических наук, доцент

А.В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время практически все бортовое оборудование летательных аппаратов (ЛА) в той или иной степени является потребителем электроэнергии, при этом с развитием авиационно-космической техники повышается количество систем оборудования, потребляющих только электрическую энергию. В связи с этим постоянно повышаются требования к надежности электроснабжения ЛА электроэнергией постоянного и переменного тока высокого качества.

К системам регулирования частоты авиационных генераторов, используемых в качестве первичных источников питания и в составе электромашинных преобразователей, предъявляются высокие требования к устойчивости и качеству процессов регулирования. Широкое распространение получили регуляторы частоты, в которых в качестве измерительных и усилительно-исполнительных органов используются соответственно частотно-зависимые устройства и магнитные или полупроводниковые усилители. Однако такие регуляторы имеют недостатки, среди которых большая масса и габаритные размеры, сложная технология сборки, трудность миниатюризации, большая потребляемая мощность. Кроме того, для таких регуляторов характерны сложность настройки резонансных контуров и наличие инерционных элементов, затягивающих время переходных процессов.

Дальнейшее развитие систем регулирования частоты связано с использованием цифровых способов управления, реализуемых с помощью микроЭВМ и микропроцессоров, применением систем регулирования с элементами искусственного интеллекта.

Известны работы зарубежных и отечественных авторов, таких как М.А. Приходько, Ю.Н. Булатов, С.И. Родзин, Н. Karimi-Davijani, A. Dadone, S. Arnalte и др., посвященные развитию теории и разработке систем регулирования параметров электрических машин с элементами искусственного интеллекта. Преимуществами таких систем является возможность управления процессами, являющимися слишком сложными для анализа с помощью общепринятых количественных методов, способность обучаться на основе соотношений «вход - выход», т.е. возможность обеспечить более простые решения для сложных задач управления. Использование систем регулирования на основе нечеткой логики и нейронной сети позволяет улучшить динамику процессов регулирования частоты, уменьшить время переходных процессов, уменьшить провалы и выбросы частоты при внезапном подключении нагрузки.

Более широкое применение систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактных синхронных генераторов (БСГ) с элементами искусственного интеллекта ограничено отсутствием математических моделей для анализа процессов регулирования частоты в статических и динамических режимах работы, а также отсутствием экспериментальных исследований систем

регулирования частоты выходного напряжения БСГ с элементами искусственного интеллекта.

Для разработки указанных систем регулирования необходимы методы оптимизации характеристик регулятора частоты, позволяющие найти значения параметров систем регулирования частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети, при которых обеспечиваются наилучшие показатели качества процессов регулирования частоты.

Поэтому разработка математических моделей и анализ систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с элементами искусственного интеллекта, обеспечивающих повышение качества электрической энергии, и разработка новых технических решений по созданию систем регулирования частоты с элементами искусственного интеллекта является актуальной научной задачей.

Цель работы – разработка и исследование систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактных синхронных генераторов, обеспечивающих повышение качества электрической энергии.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие **основные задачи**:

1. Определение путей построения систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактных синхронных генераторов с элементами искусственного интеллекта.

2. Разработка компьютерных имитационных моделей комбинированных систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактного синхронного генератора с вращающимся выпрямителем и магнитоэлектрического генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя, с использованием нечеткой логики и нейронных сетей.

3. Исследование процессов регулирования частоты выходного напряжения бесконтактных синхронных генераторов с использованием нечеткой логики и нейронных сетей в статических и динамических режимах работы.

4. Разработка экспериментальных образцов комбинированных систем регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя, с использованием нечеткой логики и нейронных сетей. Проведение экспериментальных исследований магнитоэлектрического генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя, с комбинированными системами регулирования напряжения с использованием нечеткой логики и нейронных сетей.

5. Разработка новых технических решений систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактных синхронных генераторов с использованием нечеткой логики и нейронных сетей.

Методы исследований. Теоретические исследования проведены методами математического моделирования электромагнитных процессов с использо-

ванием методов малых безразмерных приращений, операционного исчисления, аппарата передаточных функций. При исследовании статических и динамических режимов работы БСГ с системами регулирования частоты с элементами искусственного интеллекта использована среда «*MATLAB*» с пакетами расширений «*Simulink*», «*Neural Network*», «*Fuzzy Logic*», «*Optimization Toolbox*», теория нечетких множеств, теория нечеткой логики, теория искусственных нейронных сетей, теория генетических алгоритмов, компьютерное моделирование и программирование.

На защиту выносятся:

1. Разработанные компьютерные имитационные модели систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с использованием нечеткой логики и нейронной сети, позволяющие проводить исследования процессов регулирования частоты в статических и динамических режимах работы.
2. Результаты теоретических исследований процессов регулирования частоты выходного напряжения БСГ с системами регулирования частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети.
3. Результаты экспериментальных исследований систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с использованием нечеткой логики и нейронной сети.
4. Новые технические решения по созданию систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с использованием нечеткой логики и нейронной сети, защищенные патентами РФ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны и экспериментально подтверждены компьютерные имитационные модели систем регулирования частоты БСГ, позволяющие, в отличие от существующих, проводить исследования комбинированных систем регулирования частоты генераторов с элементами искусственного интеллекта в статических и динамических режимах работы.
2. Разработан метод оптимизации характеристик регулятора частоты выходного напряжения на основе нечеткой логики с помощью генетического алгоритма, позволяющий оптимизировать вид функций принадлежности регулятора частоты; разработан метод получения обучающей выборки регулятора частоты выходного напряжения на основе нейронной сети с помощью генетического алгоритма, позволяющий оптимизировать характеристики регулятора частоты.
3. Предложены новые технические решения систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с элементами искусственного интеллекта, защищенные патентами Российской Федерации (№99910, №103992).

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что результаты, полученные в работе, позволяют разрабатывать системы регулирования частоты выходного напряжения БСГ с элементами искусственного интеллекта,

обеспечивающие повышение качества электрической энергии в различных режимах работы.

Использование разработанных компьютерных имитационных моделей систем регулирования частоты выходного напряжения с элементами искусственного интеллекта, результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также разработанных методов оптимизации параметров систем регулирования частоты позволяет сократить сроки разработки и отладки систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с элементами искусственного интеллекта.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны образцы систем регулирования частоты с элементами искусственного интеллекта, позволяющие обеспечить улучшение качества электрической энергии по сравнению с известными техническими решениями и представляющие собой охрано- и конкурентоспособные образцы техники с улучшенными показателями, защищенные патентами Российской Федерации.

Достоверность научных положений, выводов и результатов работы основывается на корректном использовании основных положений теории; использовании признанных научных положений; применении математического аппарата, отвечающего современному уровню; результатах экспериментальных исследований опытных образцов систем регулирования частоты выходного напряжения генераторов с элементами искусственного интеллекта.

Реализация результатов работы.

Научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических, экспериментальных исследований и практические разработки используются в учебном процессе в Уфимском государственном авиационном техническом университете по специальности 140609 – «Электрооборудование летательных аппаратов».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях различного уровня. Среди них:

– the 12th International Workshop on Computer Science and Information Technologies, Ship "Sergei Kuchkin", Moscow - St. Petersburg, RUSSIA, September 13-19, 2010;

– всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения», Уфа, 2010 г.;

– шестая всероссийская школа-семинар аспирантов и молодых ученых, Уфа, 2011 г.;

– всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения», Уфа, 2011 г.;

– межвузовская научно-техническая конференция «Электротехнические комплексы и системы», Уфа, 2011.

Публикации по теме диссертации. Основные положения, выводы и практические результаты изложены в 12 публикациях: в 5 научных статьях, из которых 2 опубликованы в изданиях из перечня ВАК, материалах 5 научно-технических конференций; получено 2 патента РФ на полезные модели.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 106 источников и 7 приложений общим объемом 135 страниц. В работе содержится 41 рисунок и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной научной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научные результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы и постановка задач исследования. Проведен обзор и анализ отечественных и зарубежных работ в области применения интеллектуальных систем регулирования частоты выходного напряжения синхронных генераторов.

На основе анализа известных работ определено, что в них в основном проводятся только экспериментальные исследования с целью выявить возможность использования интеллектуальных систем в качестве автоматических регуляторов напряжения и частоты, причем задействован только канал регулирования по отклонению.

Выявлено отсутствие математических моделей комбинированных систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактных синхронных генераторов с вращающимися выпрямителями и магнитоэлектрических генераторов в составе электромашинных преобразователей на основе нечеткой логики и нейронных сетей, позволяющих проводить исследования в статических и динамических режимах работы.

Проведенный анализ интеллектуальных систем регулирования подтвердил актуальность проблемы и позволил определить цель и задачи работы, решение которых позволит создать комбинированные системы регулирования частоты выходного напряжения генераторов с элементами искусственного интеллекта, повышающие качество электрической энергии.

Во второй главе разработаны компьютерные имитационные модели систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с вращающимся выпрямителем и магнитоэлектрического генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя (ЭМП) ПТ-500ЦБ, на основе нечеткой логики и нейронных сетей.

Структура систем регулирования частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети для БСГ с вращающимся выпрямителем представлена на рисунке 1.

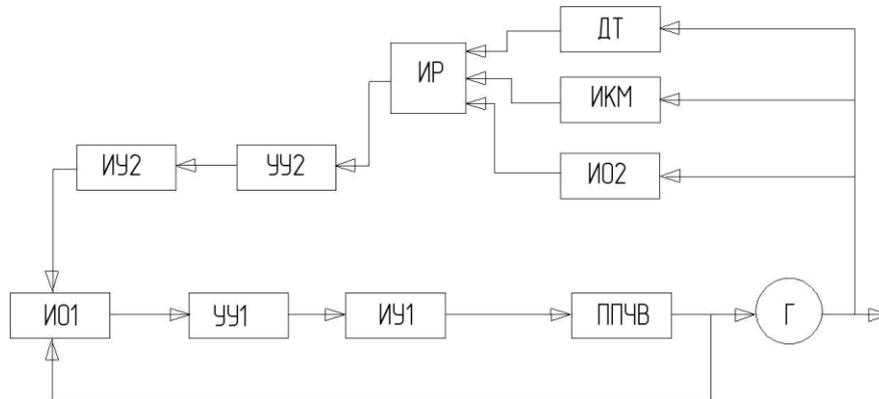


Рисунок 1 – Структурная схема системы регулирования частоты:

ИО1, УУ1, ИУ1 – измерительный орган, устройство усиления и исполнительное устройство грубого канала регулирования частоты,

ИО2, УУ2, ИУ2 - измерительный орган, устройство усиления и исполнительное устройство точного канала регулирования частоты, ППЧВ – привод постоянной частоты вращения, Г – генератор, ДТ – датчик тока, ИКМ – измеритель коэффициента мощности, ИР – интеллектуальный регулятор

При разработке модели использованы следующие уравнения:

- для объекта регулирования, состоящего из синхронного генератора и привода постоянной частоты вращения

$$(T_M p + S_M) v = N\sigma - 2u + \rho + \lambda v_{a.d.}, \quad (1)$$

где T_M – постоянная времени привода, S_M – коэффициент самовыравнивания привода, v – относительное изменение угловой частоты, N – коэффициент усиления привода по параметру управления, σ – относительное перемещение управляющего устройства привода, u – относительное изменение напряжения, ρ – относительное изменение сопротивления нагрузки, λ – коэффициент, характеризующий влияние возмущающего воздействия, $v_{a.d.}$ – относительное изменение частоты вращения авиационного двигателя;

- для грубого и точного каналов регулирования частоты

$$(T_\sigma p + 1)\sigma = -k_v v - k_\xi \xi; \quad T_\xi p \xi = k_\omega v, \quad (2)$$

где T_σ – постоянная времени регулятора по грубому каналу, k_v – коэффициент усиления грубого канала регулирования частоты, k_ξ – коэффициент передачи сигнала от корректора, ξ – относительное перемещение шайбы червячного редуктора корректора, T_ξ – коэффициент, характеризующий время перекладки шайбы корректора из одного крайнего положения в другое, k_ω – коэффициент, характеризующий эффективность влияния точного канала регулирования на перемещение золотника.

Для структурной схемы системы регулирования частоты (рисунок 1) на основе уравнений (1) и (2) составлена компьютерная имитационная модель систем регулирования частоты БСГ с вращающимся выпрямителем на основе нечеткой логики и нейронной сети, представленная на рисунке 2.

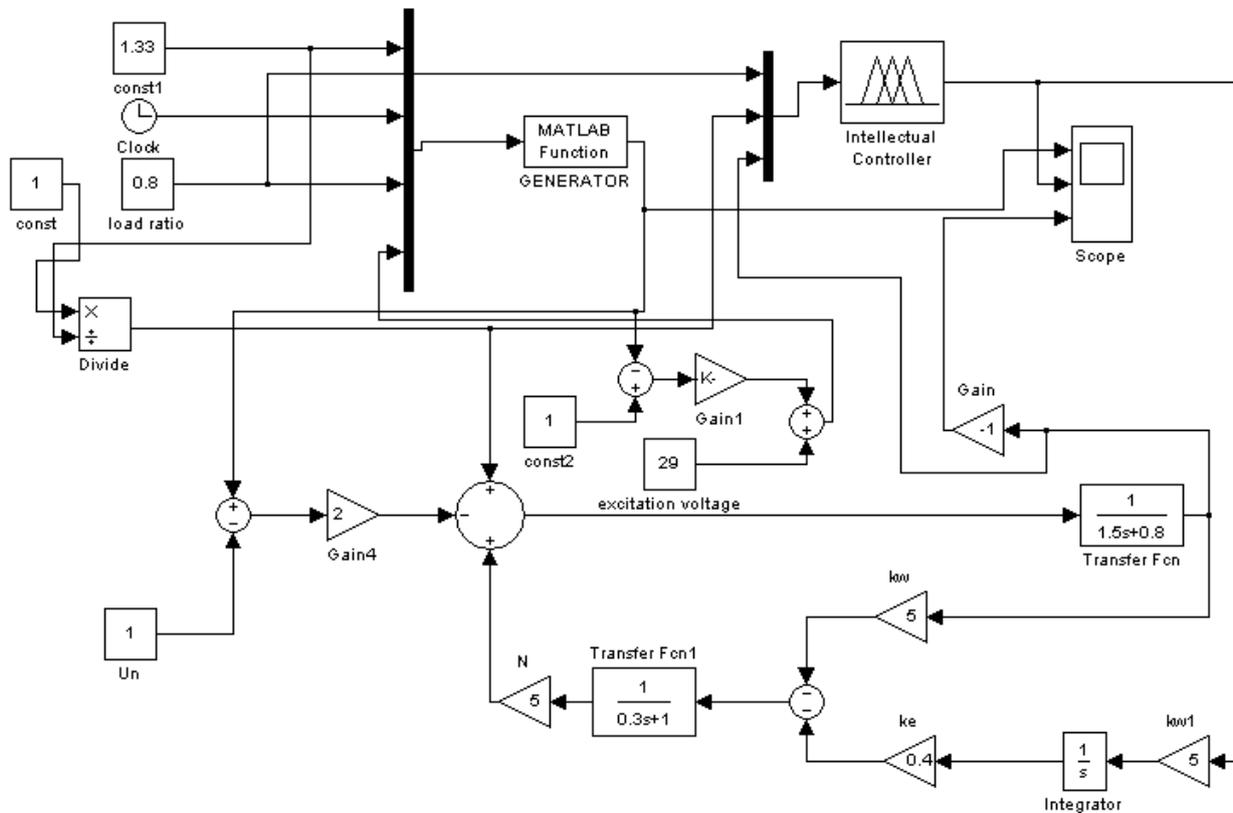


Рисунок 2 – Компьютерная имитационная интеллектуальной системы регулирования частоты БСГ с вращающимся выпрямителем:

Generator – синхронный генератор, Intellectual Controller – интеллектуальный регулятор, Transfer Fcn – передаточная функция, Gain – коэффициент усиления, Integrator – интегрирующее звено, Scope – осциллограф, Load Ratio – коэффициент мощности нагрузки, Excitation Voltage – напряжение возбуждения генератора, Clock – секундомер, const – источник постоянного сигнала, Divide – блок деления

Компьютерная имитационная модель системы регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора, входящего в состав ЭМП, для исследования статических режимов работы разработана на основе полученного выражения:

$$f = \frac{U_a - R_a \cdot \left(\frac{\sqrt{c_m^2 k_1^2 I_u^2 + 4c_m k_2 c \Phi_M I_n - c_m k_1 I_u}}{2c_m k_2} \right)}{60c_e \left(k_1 I_u + k_2 \cdot \left(\frac{\sqrt{c_m^2 k_1^2 I_u^2 + 4c_m k_2 c \Phi_M I_n - c_m k_1 I_u}}{2c_m k_2} \right) \right)} \quad (3)$$

где f – частоты вращения двигателя ЭМП, U_a , I_a , R_a – напряжение, ток и активное сопротивление якорной цепи двигателя ЭМП; Φ_M – поток, развиваемый

постоянными магнитами; c , c_e , c_m – конструктивные коэффициенты; k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности для управляющей и последовательной обмоток возбуждения двигателя ЭМП; I_u – ток управляющей обмотки двигателя ЭМП; I_n – ток нагрузки генератора.

Для разработки компьютерной имитационной модели интеллектуальной системы регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора в составе ЭМП в динамических режимах работы были использованы уравнение (3) и следующая система уравнений:

$$\begin{cases} (T_M p + 1)v = -N\sigma \\ (T_{\text{ОВД}} p + 1)\sigma = u_p \end{cases} \quad (4)$$

где T_M – время разгона привода; v – относительное изменение угловой скорости вращения двигателя ЭМП; N – коэффициент, характеризующий эффективность управления; σ – относительное изменение тока возбуждения двигателя ЭМП; u_p – относительное изменение напряжения регулятора частоты; $T_{\text{ОВД}}$ – постоянная времени обмотки возбуждения двигателя ЭМП.

В качестве моделей регуляторов частоты выходного напряжения БСГ с вращающимся выпрямителем и магнитоэлектрического генератора, входящего в состав ЭМП, использованы системы нечеткого вывода и искусственные нейронные сети. Для систем нечеткого вывода определены функции принадлежности и базы правил, для нейронных сетей определена структура и созданы обучающие выборки. Логику работы систем нечеткого вывода можно представить в виде визуализации поверхности нечеткого вывода (рисунок 3). Структура нейронных сетей представлена на рисунке 4.

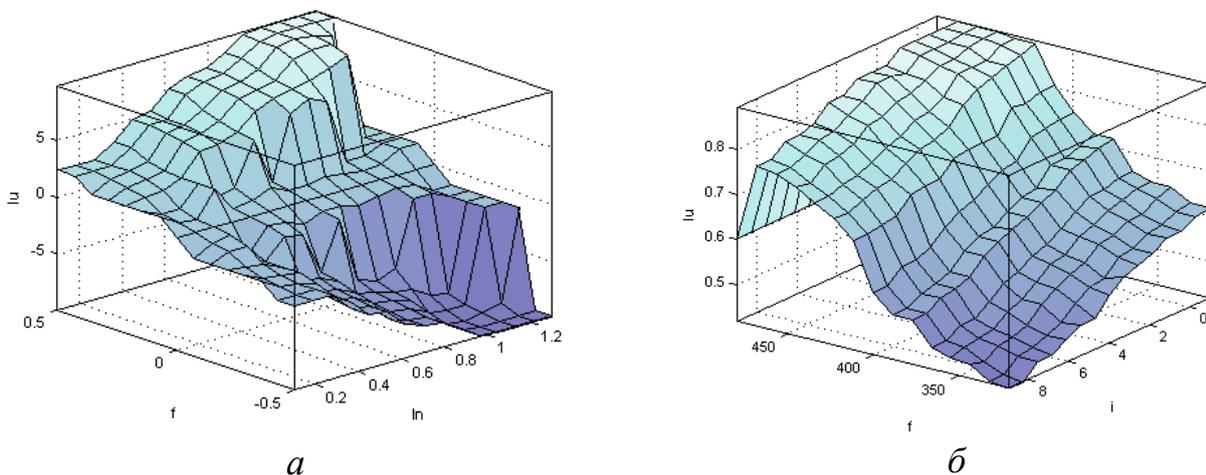


Рисунок 3 – Визуализация поверхности нечеткого вывода регулятора частоты на основе нечеткой логики:

a – для БСГ с вращающимся выпрямителем, b – для магнитоэлектрического генератора, входящего в состав ЭМП

Для того чтобы регуляторы частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети обеспечивали наилучшие показатели качества регулирования, необходимо оптимизировать параметры регуляторов. Для этого разработаны методы оптимизации характеристик регуляторов частоты с помощью генетического алгоритма. Метод оптимизации характеристик регулятора частоты выходного напряжения на основе нечеткой логики позволяет оптимизировать вид функций принадлежности регулятора частоты и заключается в поиске вектора, элементами которого являются координаты проекций вершин функций принадлежности, при котором система регулирования на основе нечеткой логики обеспечивала бы минимальную сумму статической ошибки, провалов частоты и времени регулирования частоты. Метод получения обучающей выборки регулятора частоты выходного напряжения на основе нейронной сети позволяет оптимизировать характеристики регулятора частоты и заключается в поиске такого вектора эталонов нейронной сети, чтобы при применении для обучения нейросетевого регулятора этого вектора сумма статической ошибки, провалов частоты и времени регулирования частоты была минимальной.

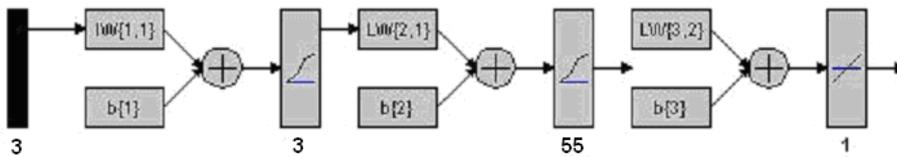


Рисунок 4 – Структура нейронных сетей регуляторов частоты для БСГ с вращающимся выпрямителем и магнитоэлектрического генератора, входящего в состав ЭМП

В третьей главе приведены результаты исследования систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с вращающимся выпрямителем и магнитоэлектрического генератора, входящего в состав ЭМП, на основе нечеткой логики и нейронных сетей в статических и динамических режимах работы по разработанным компьютерным имитационным моделям.

Установлено, что статическая ошибка регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора с интеллектуальными системами управления при изменении тока нагрузки от 0 до 1,2 номинального значения не превышает 0,9%, что меньше, чем при работе со штатной системой регулирования, в 5 раз.

На рисунке 5 приведены временные диаграммы изменения частоты при внезапном подключении номинальной нагрузки к зажимам БСГ с вращающимся выпрямителем, работающего с регулятором частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований штатной аппаратуры регулирования частоты выходного напряжения в составе БСГ с вращающимся выпрямителем и результаты исследования работы БСГ с

вращающимся выпрямителем с регулятором частоты выходного напряжения на основе нечеткой логики и нейронной сети.

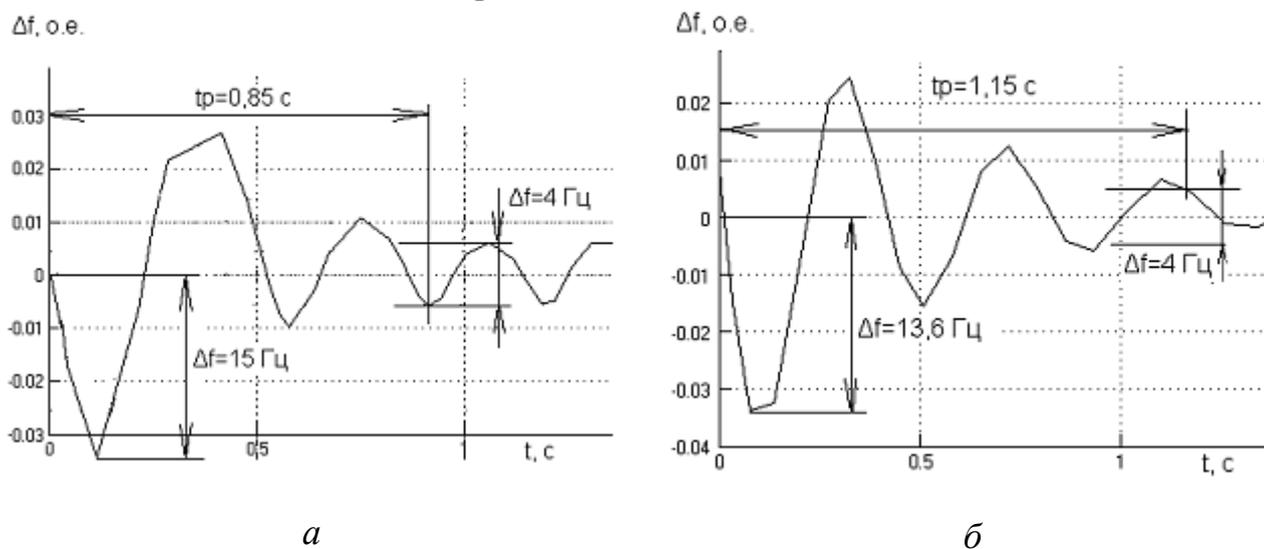


Рисунок 5 – Временные диаграммы процесса регулирования частоты выходного напряжения БСГ с вращающимся выпрямителем с использованием регулятора на основе:

a – нечеткой логики; *б* – нейронной сети

Таблица 1

Результаты исследования систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с вращающимся выпрямителем

Ток нагрузки, о.е.	Штатный регулятор		Нечеткий регулятор		Нейросетевой регулятор	
	Δf , Гц	t_p , с	Δf , Гц	t_p , с	Δf , Гц	t_p , с
0,44	10	1,55	8	0,4	6	0,85
0,78	15,5	2,5	13,6	0,81	8	0,87
1	21,5	2,8	15	0,85	13,6	1,15

Результаты исследования систем регулирования частоты выходного напряжения БСГ с вращающимся выпрямителем показывают, что при использовании нечеткой логики регулятор обладает быстродействием, превосходящим быстродействие штатной аппаратуры регулирования в 3,4 раза, провалы частоты уменьшаются в 1,3 раза, при использовании нейронной сети быстродействие регулятора увеличивается в 2,4 раза, а провалы частоты уменьшаются в 1,7 раза при внезапном подключении нагрузки.

Результаты исследования систем регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора с регулятором на основе нечеткой логики, нейронной сети и штатным регулятором приведены в таблице 2.

Результаты исследования систем регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора показывают, что система регулирования частоты на основе нечеткой логики позволяют уменьшить время регу-

лирования в 2,2 раза, провалы частоты – в 2,1 раза, система регулирования частоты на основе нейронной сети позволяют уменьшить время регулирования в 2,2 раза, провалы частоты – в 1,7 раза по сравнению со штатной аппаратурой регулирования.

Таблица 2

Результаты исследования систем регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора

Ток нагрузки, о.е.	Штатный регулятор			Нечеткий регулятор			Нейросетевой регулятор		
	$f_{уст}$, Гц	Δf , %	t_p , с	$f_{уст}$, Гц	Δf , %	t_p , с	$f_{уст}$, Гц	Δf , %	t_p , с
0,25	400	0,5	1,16	400	0,5	0,33	400	0,5	0,35
0,5	394	2,3	0,94	400	0,5	0,51	400	1,3	0,47
0,75	386	3,8	1,33	400	2,3	0,58	400	1,5	0,62
1	382	5,3	0,78	400	3,8	0,69	400	3,5	0,67

В четвертой главе рассмотрены вопросы практической реализации систем регулирования частоты выходного напряжения синхронных генераторов с элементами искусственного интеллекта.

На рисунке 6 представлена структурная схема лабораторной установки, позволяющей исследовать системы регулирования частоты выходного напряжения на основе нечеткой логики и нейронной сети для магнитоэлектрического генератора, входящего в состав ЭМП.

Проведено экспериментальное исследование систем регулирования частоты в статическом и динамическом режимах работы.

Получено, что погрешность регулирования частоты выходного напряжения в статических режимах работы генератора с комбинированными системами регулирования с использованием нечеткой логики и нейронных сетей при изменении нагрузки от 2 до 8 А не превышает $\pm 0,25\%$, что в 8-10 раз меньше, чем при использовании штатного регулятора частоты.

Результаты экспериментальных исследований процессов регулирования частоты с использованием штатного регулятора и регуляторов на основе нечеткой логики и нейронной сети в динамических режимах работы приведены в таблице 3.

На рисунке 7 приведены графики переходных процессов изменения частоты выходного напряжения генератора при подключении номинальной нагрузки к зажимам генератора, работающего с регулятором частоты с использованием нечеткой логики и нейронной сети.

Приведенные данные показывают, что нечеткий регулятор позволяет уменьшить провалы частоты в 1,7 раза, нейросетевой регулятор – в 3,3 раза по сравнению со штатным регулятором; в переходных процессах быстроедействие

нечеткого регулятора превышает быстродействие штатного в 1,5 раза, быстродействие нейросетевого регулятора превышает быстродействие штатного в 1,84 раза.

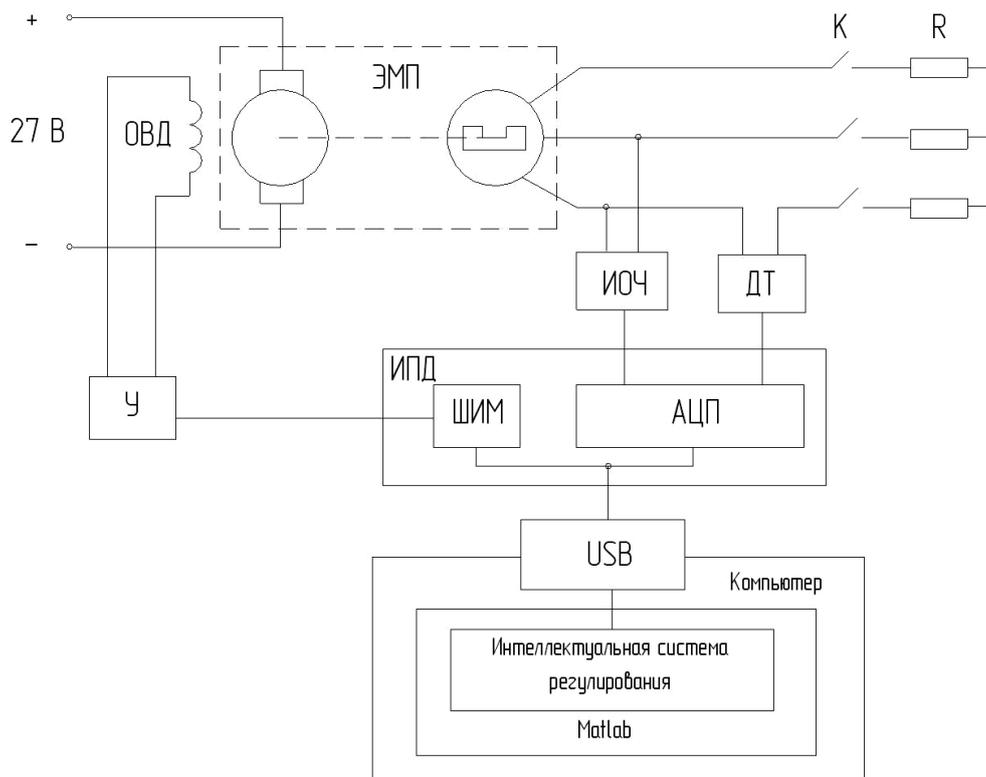


Рисунок 6 – Структурная схема лабораторной установки:

ОВД – обмотка возбуждения двигателя, ЭМП – электромашинный преобразователь, К – ключ, R – нагрузка, ИОЧ – измерительный орган частоты, ДТ – датчик тока, ИПД – интерфейс передачи данных, ШИМ – широтно-импульсный модулятор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, USB – порт последовательного интерфейса передачи данных, У – усилитель

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований интеллектуальных систем регулирования частоты

Ток нагрузки, о.е.	нечеткий регулятор			нейросетевого регулятор			штатный регулятор		
	$f_{уст}$, Гц	Δf , Гц	t , с	$f_{уст}$, Гц	Δf , Гц	t , с	$f_{уст}$, Гц	Δf , Гц	t , с
0,25	400	2	0,781	400	2	0,547	400	2	1,156
0,5	400	5	0,734	400	3	0,578	394	9	0,937
0,75	400	8	0,656	399	3	0,591	386	15	1,328
1	399	10	0,656	399	5	0,561	382	21	0,781

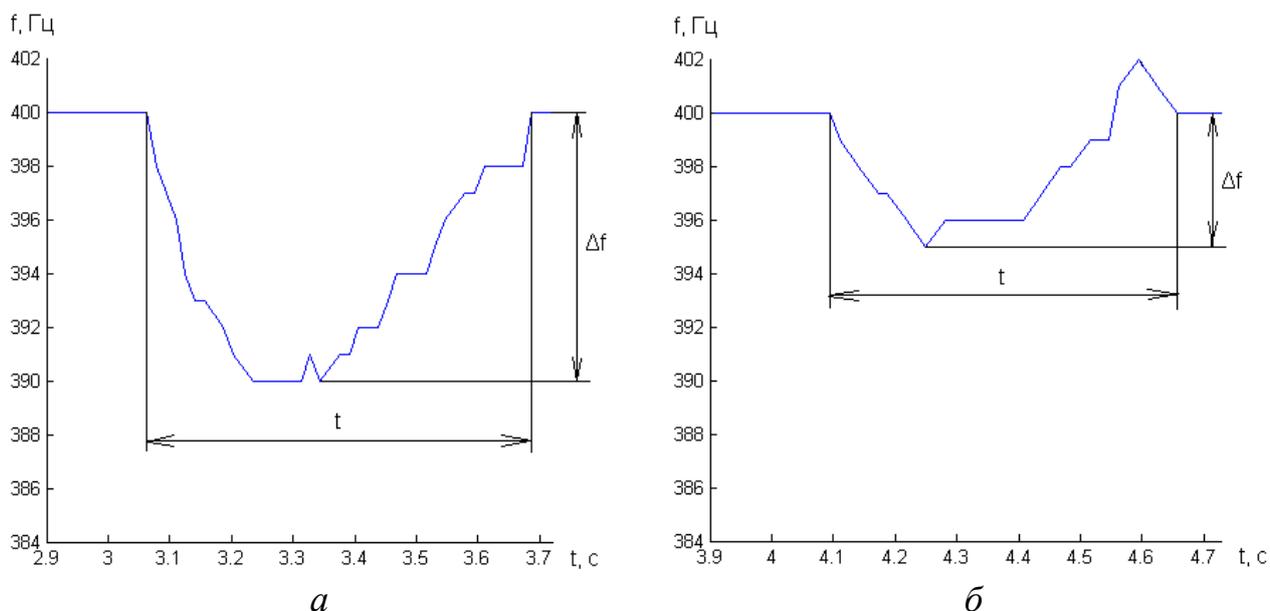


Рисунок 7 – Графики $f=\varphi(t)$ при подключении номинальной нагрузки:
a – с применением нечеткого регулятора; *б* – с применением нейросетевого регулятора

Сравнение результатов экспериментальных исследований регуляторов частоты на основе нечеткой логики и нейронной сети было проведено с результатами работы штатного регулятора, который в преобразователе ПТ-500ЦБ является пропорциональным. При сравнении результатов экспериментальных исследований регуляторов частоты с элементами искусственного интеллекта с результатами работы ПИД-регулятора их показатели качества будут отличаться на меньшую величину.

Предложены новые технические решения регуляторов частоты выходного напряжения синхронных генераторов на основе нечеткой логики и нейронной сети, обеспечивающие повышение качества регулирования частоты (патенты на полезные модели №99910, №103992).

В приложениях приведены коды программ для микроконтроллера, коды алгоритмов для обмена данными между интерфейсом передачи данных и компьютером, коды на языке MATLAB для проведения эксперимента с системами регулирования на основе нечеткой логики и нейронной сети.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны компьютерные имитационные модели систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактного синхронного генератора с вращающимся выпрямителем и магнитоэлектрического генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя, на основе нечеткой логики и нейронных сетей для исследования статических и динамических режимов работы. Разработанные модели подтверждены экспериментальными исследованиями.

ми систем регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора.

2. Разработан метод оптимизации характеристик регулятора частоты выходного напряжения на основе нечеткой логики с помощью генетического алгоритма, позволяющий оптимизировать вид функций принадлежности регулятора частоты; разработан метод получения обучающей выборки регулятора частоты выходного напряжения на основе нейронной сети с помощью генетического алгоритма, позволяющий оптимизировать характеристики регулятора частоты.

3. На основе исследования установлено:

- в статических режимах работы ошибка регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора с интеллектуальными системами управления при изменении тока нагрузки от 0 до 1,2 от номинального значения не превышает 0,9%, что меньше, чем при работе со штатной системой регулирования, в 5 раз.

- в динамических режимах работы БСГ с вращающимся выпрямителем с регулятором на нечеткой логике и нейронной сети при подключении нагрузок от $0,44I_n$ до I_n провалы частоты составляют не больше 3,8% от номинального значения, что меньше провалов частоты при использовании штатного регулятора в 1,43 раза; время регулирования не более 1,15 с, что быстрее времени регулирования частоты при использовании штатного регулятора в 2,4 раза.

- в динамических режимах работы магнитоэлектрического генератора с регулятором на нечеткой логике и нейронной сети при подключении нагрузок от $0,25I_n$ до I_n провалы частоты составляют не больше 3,8% от номинального значения, что меньше провалов частоты при использовании штатного регулятора в 1,4 раза; время регулирования не более 0,69 с, что быстрее времени регулирования частоты при использовании штатного регулятора в 1,13 раза.

4. Разработаны, практически реализованы в виде экспериментальных образцов и исследованы системы регулирования частоты выходного напряжения магнитоэлектрического генератора на основе нечеткой логики и нейронной сети. Путем экспериментальных исследований установлено:

- в статических режимах работы генератора с комбинированными системами регулирования с использованием нечеткой логики и нейронных сетей при изменении нагрузки от 2 до 8А погрешность регулирования частоты выходного напряжения не превышает $\pm 0,25\%$, что в 8-10 раз меньше, чем в штатном регуляторе частоты;

- в динамических режимах работы провалы частоты уменьшаются в среднем в 1,7 раза при использовании нечеткого регулятора и в среднем в 3,3 раза при использовании нейросетевого регулятора по сравнению со штатным регулятором;

- быстродействие в среднем в 1,5 раза выше при использовании нечеткого регулятора и в среднем в 1,84 раза выше при использовании нейросетевого регулятора по сравнению со штатным регулятором;
- расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования не превышает 10–15 %, что подтверждает достоверность разработанных математических моделей.

5. Предложены новые технические решения по созданию систем регулирования частоты выходного напряжения бесконтактных синхронных генераторов на основе нечеткой логики и нейронной сети, обеспечивающих повышение качества регулирования частоты (патенты на полезные модели №99910, №103992).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

В изданиях из перечня ВАК:

1. Разработка и исследование интеллектуальных систем регулирования частоты выходного напряжения синхронных генераторов / Г.Н. Утляков, В.И. Каримов // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. УГАТУ, 2011. т.15, №1(41). – С.165-170.

2. Экспериментальные исследования интеллектуальных систем регулирования частоты выходного напряжения синхронного генератора в составе электромашинного преобразователя / Ф.А. Гизатуллин, В.И. Каримов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2; URL: www.science-education.ru/102-5926 (дата обращения: 06.04.2012).

Авторские свидетельства и патенты:

3. Патент на полезную модель № 99910 МПК H02P 9/02. Регулятор частоты синхронного генератора / Г.Н. Утляков, А.Р. Валеев, В.М. Асадуллин, В.И. Каримов, А.С. Есаулов. Заявлено 29.06.2010, опубл. 27.11.2010. Бюл. №33.

4. Патент на полезную модель №103992 МПК H02P 9/30. Регулятор частоты электромашинного преобразователя / Г.Н. Утляков, А.Р. Валеев, В.М. Асадуллин, В.И. Каримов. Заявлено 03.11.2010, опубл. 27.04.2011. Бюл. №12.

В других изданиях:

5. О построении интеллектуального регулятора частоты синхронного генератора / Г.Н. Утляков, А.Р. Валеев, В.М. Асадуллин, В.И. Каримов // Электронные устройства и системы: межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 31-33.

6. Интеллектуальный регулятор частоты электромашинного преобразователя / Г.Н. Утляков, А.Р. Валеев, В.М. Асадуллин, В.И. Каримов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 39-41.

7. Моделирование систем регулирования частоты на основе нейронных сетей / Г.Н. Утляков, В.И. Каримов, А.Р. Валеев, В.М. Асадуллин // Труды 12-й международной конференции по информатике и информационным технологиям. Теплоход «Сергей Кучкин», Москва – Санкт-Петербург, 2010. – т.1, с. 89. (На английском языке).

8. Моделирование интеллектуальных систем регулирования частоты электромашинного преобразователя / В.И. Каримов // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: сб. тр. – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 269-271.

9. Моделирование интеллектуальных систем регулирования частоты электромашинного преобразователя в динамических режимах / В.И. Каримов // Актуальные проблемы науки и техники. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение, управление и экономика: Сборник трудов Шестой Всероссийской школы-семинара аспирантов и молодых ученых, 15-18 февраля 2011 г. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т.-Уфа: УГАТУ, 2011.- С. 72-75.

10. Моделирование статических и динамических режимов работы нейросетевого регулятора частоты электромашинного преобразователя / В.И. Каримов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 27-29.

11. Моделирование динамических режимов работы нечеткого регулятора частоты электромашинного преобразователя / В.И. Каримов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 29-31.

12. Экспериментальная установка для исследования интеллектуальных систем регулирования частоты электромашинного преобразователя / В.И. Каримов // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т / Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 190-193.

КАРИМОВ Вагиз Ильгизович

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ
С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНЫХ
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 20.11.2012. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 1038.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12