

На правах рукописи



Зеленин Александр Сергеевич

**ЦИФРОВЫЕ СРЕДСТВА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ
УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ
НА ЦИФРО-АНАЛОГО-ФИЗИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель (консультант) доктор технических наук, доцент,
Попов Максим Георгиевич

Официальные оппоненты:

Сацук Евгений Иванович, доктор технических наук, доцент,
Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы», начальник службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики АО «СО ЕЭС»

Илюшин Павел Владимирович, кандидат технических наук,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», проректор по научной работе

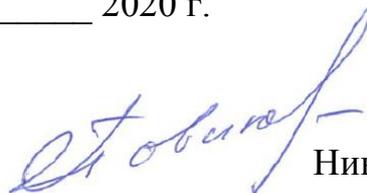
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Защита состоится «__» _____ 2020 г. в __:__ часов на заседании диссертационного совета Д 512.002.01 на базе акционерного общества «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ФСК ЕЭС») по адресу 115201, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3, этаж 3, зал НТС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НТЦ ФСК ЕЭС» по адресу www.ntc-power.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Новиков
Николай Леонтьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Обеспечение надежности и устойчивости электроснабжения потребителей в современных электроэнергетических системах (ЭЭС) осуществляется с использованием быстродействующих и эффективных устройств автоматического регулирования, защиты и противоаварийной автоматики (РЗА). В настоящее время исследование динамических свойств энергосистем, их устройств РЗА выполняется с использованием физических и математических моделей. Физическое моделирование силового оборудования ЭЭС развивалось с 20-х годов XX века в лабораториях *General Electric Co*, *Evans and Bergcall*, *Nickle and Lauton*, а также в ЛЭТИ, ВЭИ, ЛПИ, Среднеазиатском индустриальном институте академика М.П. Костенко, МЭИ, НИИПТ и др. Применение математических моделей ЭЭС при проведении испытаний устройств РЗА долгое время оставалось ограниченным, без введения в реальном времени противоаварийных воздействий физическими устройствами РЗА. Современная вычислительная техника и специализированное программное обеспечение таких компаний как *Mathworks*, *OPAL-RT Technologies Inc.*, *RTDS Technologies Inc.* позволили исследовать математические модели силового оборудования ЭЭС в режиме реального времени. Немаловажный вклад в теоретические и практические исследования динамических свойств энергосистем внесли организации: НТЦ ЕЭС, СО ЕЭС, НТЦ ФСК, ВНИИЭ, ВЭИ, НИУ МЭИ, СПбПУ и др. В частности, на сегодняшний день физическое моделирование энергосистем используется при исследованиях работы устройств РЗА на цифро-аналого-физическом комплексе (ЦАФК) АО «НТЦ ЕЭС», на электродинамической модели электроэнергетической системы НИУ МЭИ.

При испытаниях на ЦАФК создаются эквивалентные физические модели энергосистем с использованием физические моделей генераторов, их автоматических регуляторов возбуждения и скорости, трансформаторов, линий электропередачи, нагрузки. Исследуемые физические устройства противоаварийного управления подключаются к оборудованию ЦАФК, воспроизводящему условия их работы в действительной энергосистеме.

Для проведения достоверных экспериментальных исследований важным является качественное измерительно-информационное обеспечение, с помощью которого производятся количественные оценки погрешности измерительных органов регуляторов возбуждения, частоты и мощности. Для

снижения или устранения методической составляющей погрешности в работе используется частотная коррекция коэффициентов передаточных характеристик измерительных органов цифровых средств реального времени. При этом для имитации действия устройств противоаварийного управления энергосистемы, не являющихся исследуемыми и не предоставляемыми на испытания, требуется качественное воспроизведение их работы. Все эти вопросы определяют необходимость и актуальность разработки и исследований цифровых средств реального времени, применяемых для испытаний устройств противоаварийного управления с использованием физических моделей энергосистем. Здесь и далее цифровые средства реального времени – разработанное автором программное обеспечение, функционирующее в режиме реального времени и моделирующее устройства автоматики энергосистем, созданные автором на базе промышленных микропроцессорных плат устройства, выполняющие имитацию работы устройств автоматики энергосистем.

Объектом исследования являются электроэнергетическая система и устройства автоматики энергосистем. **Предметом исследования** являются динамические свойства устройств автоматики энергосистем, таких как автоматические регуляторы возбуждения, автоматика ограничения повышения частоты, регуляторы скорости и др., разработанные цифровые средства реального времени, используемые для испытаний устройств автоматики энергосистем на цифро-аналого-физическом комплексе.

Цели и задачи исследования. *Целью* данной диссертационной работы является создание и исследование цифровых средств для испытаний устройств автоматики энергосистем на цифро-аналого-физических комплексах.

Для достижения сформулированной цели в диссертации были поставлены и успешно решены следующие *задачи*:

1. Разработаны и исследованы способы измерений параметров режима трехфазных электромеханических систем, методы их цифровой обработки в темпе переходных процессов в энергосистемах, способы учета динамических свойств этих измерительных органов устройств автоматики энергосистем.
2. Разработана и исследована методика экспериментального определения частотных характеристик каналов автоматических регуляторов возбуждения, выполнен анализ достоверности цифровых моделей регуляторов возбуждения.
3. Разработаны цифровые модели устройств автоматики энергосистем, численный метод решения систем дифференциально-алгебраических

уравнений переходных процессов в устройствах противоаварийного управления, а также выполнена оценка его эффективности.

4. Разработаны и исследованы программные и микропроцессорные средства противоаварийного управления, структурные схемы испытательных стендов на цифро-аналого-физическом комплексе. Апробация разработанных средств выполнена при сравнении их частотных характеристик с заданными к воспроизведению характеристиками устройств автоматики энергосистем.

Методология и методы исследования. Методология исследования заключается в сопоставительном анализе динамических характеристик созданных цифровых средств и физических устройств противоаварийного управления, полученных в результате теоретических и экспериментальных (лабораторных) исследований.

При проведении исследований использовались методы теории синтеза и анализа математических моделей силового электрооборудования и его систем автоматического управления, численные методы решения дифференциально-алгебраических уравнений электромагнитных и электромеханических переходных процессов, методы цифровой обработки экспериментальных данных.

Разработка прикладного программного обеспечения цифровых средств произведена с использованием объектно-ориентированного подхода.

Научная новизна

1. Разработана, исследована и внедрена методика экспериментального определения динамических свойств автоматических регуляторов возбуждения, учитывающая характеристики их измерительных органов. Создан и в результате исследований апробирован испытательный стенд для экспериментального определения динамических свойств автоматических регуляторов возбуждения.
2. Разработаны и внедрены цифровые средства реального времени для испытаний устройств противоаварийного управления. Работа разработанных цифровых средств исследована при их функционировании в составе моделей энергосистем, функционирующих в режиме реального времени.

Теоретическая значимость работы

1. Предложены быстродействующие модели измерительных органов режимных параметров трехфазной системы, позволяющие выполнять измерения на фиксированном интервале интегрирования; обоснованы

рекомендации по учету динамических свойств разработанных методов измерений.

2. Предложена методика экспериментального получения частотных характеристик автоматических регуляторов возбуждения, учитывающая характеристики работы их измерительных органов.

3. Предложены и обоснованы меры и критерии оценки достоверности динамических свойств математических моделей устройств автоматического управления.

Практическая значимость работы

1. Разработаны цифровые средства для моделирования работы устройств противоаварийного управления в составе физических моделей энергосистем. Разработанные программные средства моделирования внедрены и использовались при исследованиях по обоснованию параметров настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов Сургутской ГРЭС-2, Волжской ГЭС, Ростовской АЭС и др., а также по определению уставок автоматики ограничения повышения частоты Калининградской ТЭЦ-2.

2. Разработан испытательный стенд для экспериментального снятия частотных характеристик автоматических регуляторов возбуждения и обоснования их соответствия критериям Стандарта СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» (далее – Стандарт). Разработанный испытательный стенд внедрен в АО «НТЦ ЕЭС» и использовался при сертификации промышленных автоматических регуляторов возбуждения производства *Siemens, Andritz* и др.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Методы измерения частоты напряжения и результаты исследований динамических свойств измерительных органов с конечно-импульсной характеристикой.

2. Результаты исследований частотной коррекции динамических свойств измерительных органов с конечной-импульсной характеристикой, используемых в устройствах противоаварийного управления для контроля режимных параметров.

3. Методика и результаты экспериментальных исследований частотных характеристик автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов.

4. Результаты исследований созданных программных и микропроцессорных средств моделирования устройств автоматики энергосистем.

Публикации и апробация результатов. По теме диссертационной работы опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в список рекомендуемых из перечня ВАК. Кроме этого в наукометрических индексируемых базах *Scopus* размещена 1 публикация.

Основные результаты работы докладывались на III, VI и VII международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012 г.; Иваново, 2015 г.; Казань 2016 г.), Европейских встречах пользователей *RTDS* (Копенгаген, 2014 г.; Генк, 2018 г.), круглом столе «Задачи и технологии моделирования РЗА» Международной выставки производителей релейного оборудования и автоматики (Москва, 2016 г.).

Работа выполнялась при поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга в форме гранта для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2014 года (распоряжение №161 Комитета по науке и высшей школе от 05.12.2014).

Личный вклад автора в получении результатов диссертационной работы. Личный вклад автора заключается в проведении экспериментальных и теоретических исследований, анализе и обобщении результатов. Для этого автором были разработаны стенд экспериментального определения частотных характеристик АРВ; программные и микропроцессорные средства моделирования устройств противоаварийного управления с прикладным программным обеспечением; структурные схемы испытаний для проведения исследований энергосистем с разработанными цифровыми средствами. Основные теоретические и практические результаты получены автором лично. Автор выражает благодарность всем сотрудникам кафедры «Электрические станции и автоматизация энергосистем» ФГАОУ ВО «СПбПУ» и научно-исследовательского отдела 3 АО «НТЦ ЕЭС». Особенную благодарность автор выражает: Кушниру А.Н., Штефке Й. и Попову М.Г.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений, списка литературы из 60 наименований. Основной текст диссертации общим изложен на 174 страницах, содержит 70 рисунков и 11 таблиц, текст диссертации занимает не менее 90 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены способы оценки динамических свойств измерительных органов напряжения и частоты устройств режимного противоаварийного управления.

Как правило, измерительные органы устройств РЗА отдельных производителей обладают разными динамическими свойствами. Укрупненно измерительные органы РЗА можно подразделить по признаку наличия (инерционные измерения) и отсутствия (безынерционные измерения) запаздывания. Характерным примером инерционных измерений являются КИХ-фильтры, в основе описания которых используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Применение безынерционных методов измерения имеет известные ограничения о стационарности и симметрии трехфазной системы. Однако такая идеализация позволяет относительно просто выполнять экспериментальную оценку динамических свойств инерционных органов, измеряющих стационарные и симметричные электрические сигналы. Для аналитической оценки запаздывания в работе исследуются блоки выборки и хранения «*zero-order hold*», описываемые передаточной функцией:

$$W_{zoh}(p, T) = (1 - e^{p(T-T_d)}) / (p(T - T_d)) \quad (1)$$

где T – общее время прохождения отчета измеренного сигнала, с; T_d – период дискретизации, с. Оценка динамических характеристик измерительных органов частоты напряжения, контролирурующих смену знака электромагнитных сигналов, производится функцией $W(p) = W_{zoh1}(p, T_1) W_{zoh2}(p, T_2)$. Параметры T_1 , T_2 определяются в зависимости от количества контролируемых фаз и числа учитываемых при измерении смен знака фазных сигналов на периоде. В частности, $T_1 = 0.01$ с, $T_2 = 0.02/6$ с – при измерении по двум сменам знака сигналов на периоде каждого из трех фазных напряжений.

Исследование динамических свойств измерительных органов с запаздыванием производилось в работе с использованием авторской методики, основной целью которой является коррекция интегральных коэффициентов A и B ДПФ, вычисленных на фиксированном интервале усреднения, равном $1/f_0 = 20$ мс. Погрешность их расчета ($A \neq a$, $B \neq b$ при $f \neq f_0$) для гармонического сигнала $y(t) = a \cos(2\pi ft) + b \sin(2\pi ft)$ содержит

информацию о частоте напряжения, которая определяется численным решением уравнения ($s_U = (f - f_0)/f_0$):

$$s_U = 1/(2\pi m) \operatorname{arctg}\left(\frac{(1 + s_U)(A_2 B_1 - A_1 B_2)}{A_1 A_2 + (1 + s_U)^2 B_1 B_2}\right) \quad (2)$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 – интегральные коэффициенты оконного ДПФ, вычисленные в моменты времени t_1 и $t_2 = t_1 + m/f_0$.

При подстановке уравнений для A, B в выражение расчета напряжения прямой последовательности после упрощений можно получить, что частота f_U может быть определена решением уравнения ($s_U = (f_1 - f_0)/f_0$):

$$s_U = 1/(2\pi) \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{C1 + s_U C2 + s_U^2 C3}{Z1 + s_U Z2 + s_U^2 Z3}\right) \quad (3)$$

где $C1, C2, C3, Z1, Z2, Z3$ вычисляются из интегральных параметров (A, B) и введены для упрощения выражения.

Использование выражения (2) для вычисления частоты трехфазной системы напряжений с частотной модуляцией характеризуется

проявлением колебаний удвоенной ($2f_0$) частоты (рисунок 1). Мгновенная частота напряжения, определяемая по (3), указанным дефектом (колебаниями) не обладает. После определения частоты f_1 истинные значения a, b могут вычисляться по выражениям частотной коррекции измерений (при $f \neq f_0$):

$$a = \frac{\pi}{2} \left((1 + s_U)^2 - 1 \right) \left(\frac{\sin(2\pi s_U)}{1 - \cos(2\pi s_U)} \frac{A}{1 + s_U} - B \right) \quad (4)$$

$$b = \frac{\pi}{2} \left((1 + s_U)^2 - 1 \right) \left(\frac{A}{1 + s_U} + \frac{\sin(2\pi s_U)}{1 - \cos(2\pi s_U)} B \right) \quad (5)$$

Использование частотной коррекции позволяет использовать фиксированный интервал времени интегрирования независимо от частоты исходного сигнала (в диапазоне (25;75) Гц).

Определение интегральных коэффициентов A, B с использованием приближенного численного метода характеризуется

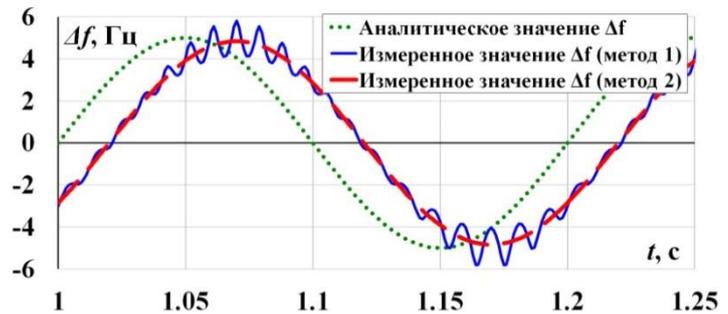


Рисунок 1 – Осциллограммы расчета частоты по выражению (2) – метод 1, (3) – метод 2

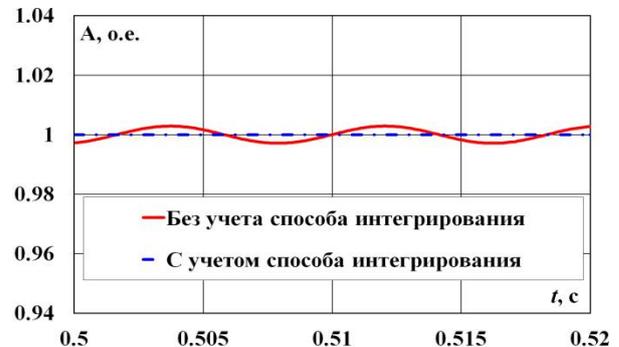


Рисунок 2 – Осциллограммы расчета амплитуды по исходным выражениям частотной коррекции (2), (3) и по предложенным (6), (7)

недокомпенсацией методической погрешности, максимальное значение которой может составлять 0.35 % для сигналов с частотой 40 Гц. Ее полная компенсация (устранение погрешности до уровня менее 0.01 %) возможна при коррекции коэффициентов по выражениям (рисунок 2):

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \begin{bmatrix} \cos \alpha_i + \cos \beta_i & \sin \alpha_i + \sin \beta_i \\ -\sin \alpha_i + \sin \beta_i & \cos \alpha_i - \cos \beta_i \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\alpha_i = 2\pi \frac{i}{N} \Delta f \beta_i = 2\pi \frac{i}{N} (\Delta f + 2) \quad (7)$$

При этом установлено, что скачкообразное изменение амплитуды и частоты напряжения прямой последовательности (рисунки 3, 4) сопровождается запаздыванием в измерительных органах напряжения и частоты значением не более 20 мс и 40 мс, соответственно. По истечении этих интервалов времени погрешность измерений амплитуды и частоты напряжения составляет менее 0.1 %.

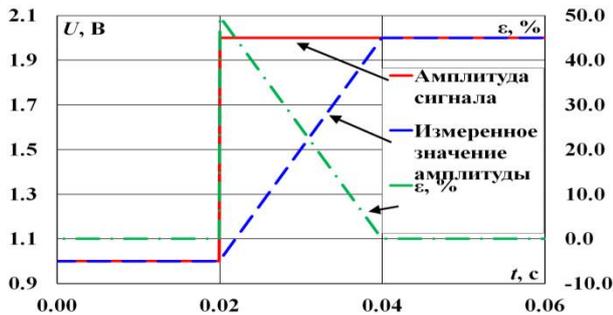


Рисунок 3 – Амплитуда измеряемого сигнала U_1 и погрешность ее измерения (ε) при ступенчатом изменении амплитуды

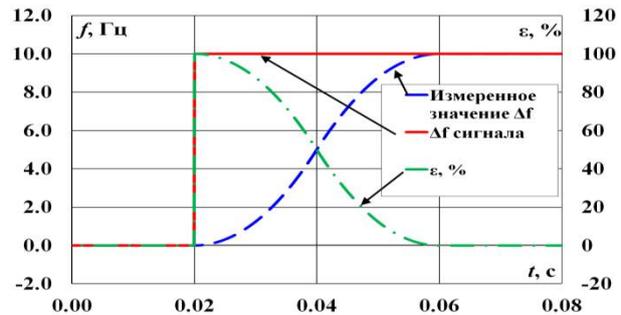


Рисунок 4 – Сигнал Δf_i и погрешность измерения (ε) при ступенчатом изменении частоты

Также в результате исследований частотных свойств измерительных органов установлено, что относительная по модулю погрешность измерения мгновенной частоты с амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ) напряжения достигает значения более 10 %. Нечувствительность измерительного органа при контроле нестационарных сигналов с разрывами второго рода (рисунок 5) составляет около 40 мс.

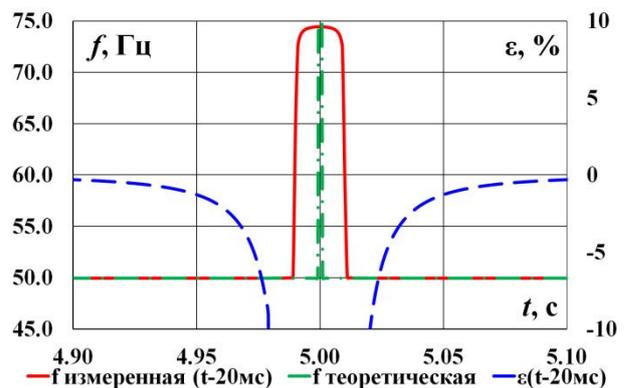


Рисунок 5 – Измеряемая частота напряжения прямой последовательности и погрешность ее измерения (ε) при АЧМ (разрыв второго рода)

Для оценки динамических свойств разработанных автором методов измерения в диссертации используется выражение (1). При этом производится сравнительный анализ измеренных и расчетных (по аналитическим выражениям) значений частоты, действующего значения напряжения прямой последовательности. Аналогичные оценки выполнены применительно к значениям амплитуды и фазы колебаний модулируемых сигналов. Установлено, что погрешность для мгновенных значений не превышала 0.2 %, а погрешность для интегральных параметров – не более 0.1 % для амплитуды, 0.25 % для фазы.

Разработанные математическое описание методов измерений использовано при создании программных и микропроцессорных средств моделирования устройств автоматики энергосистем.

Во второй главе разработана и апробирована методика экспериментального определения амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик автоматических регуляторов возбуждения (АРВ).

Для получения ЭЧХ разработан испытательный стенд (рисунок 6), содержащий программно-аппаратный комплекс моделирования энергосистем в режиме реального времени *Real Time Digital Simulator (RTDS)*. В *RTDS* выполняется моделирование энергосистемы, содержащей синхронный генератор (СГ), возбудитель, линию электропередачи, управляемый источник напряжения.



Рисунок 6 – Схема стенда получения экспериментальных частотных характеристик

Исследуемый АРВ подключается к физическим сигналам усилителей тока и напряжения математической модели энергосистемы, выходной сигнал АРВ выполняет управление возбудителем (VSI, рисунок 6). Получение ЧХ

осуществляется при вводе воздействий, приводящих к колебаниям параметров режима работы СГ, измерении амплитуды и фазы колебаний входных и выходных сигналов от АРВ. Воздействия направлены на изменение амплитуды источника напряжения либо частоту напряжения энергосистемы.

Первоначально определяются ЧХ пропорционально-интегрального канала по отклонению напряжения статора при отключенных остальных каналах регулятора (при модуляции напряжения). Экспериментально снятое значение (точка) АЧХ и ФЧХ канала АРВ представляет собой отношение амплитуд A_{U_f}/A_{U_1} и разность фаз $\varphi_{U_f} - \varphi_{U_1}$ входных и выходных сигналов.

В большинстве современных АРВ канал регулирования по отклонению напряжения невозможно логически или настройкой параметров вывести из работы. Тем не менее, можно получить ЭЧХ для нескольких одновременно работающих каналов АРВ. В частности, для получения ЭЧХ двух каналов регулирования (по отклонению напряжения и частоты напряжения) необходимо провести две серии экспериментов с разными значениями коэффициентов усиления в этих каналах (K_{0U} и K_{0F}). Тогда приведенная система уравнений будет иметь единственное решение:

$$\begin{cases} A_{U_f}^{\text{эксп1}} e^{j\varphi_{U_f}^{\text{эксп1}}} = K_{0U}^{\text{эксп1}} A_{W1} e^{j\Delta\varphi_{W1}} A_{U_1}^{\text{эксп1}} e^{j\varphi_{U_1}^{\text{эксп1}}} + \\ \quad + K_{0F}^{\text{эксп1}} A_{W2} e^{j\Delta\varphi_{W2}} A_{f_1}^{\text{эксп1}} e^{j\varphi_{f_1}^{\text{эксп1}}} \\ A_{U_f}^{\text{эксп2}} e^{j\varphi_{U_f}^{\text{эксп2}}} = K_{0U}^{\text{эксп2}} A_{W1} e^{j\Delta\varphi_{W1}} A_{U_1}^{\text{эксп2}} e^{j\varphi_{U_1}^{\text{эксп2}}} + \\ \quad + K_{0F}^{\text{эксп2}} A_{W2} e^{j\Delta\varphi_{W2}} A_{f_1}^{\text{эксп2}} e^{j\varphi_{f_1}^{\text{эксп2}}} \end{cases} \quad (8)$$

где A_{U_1} , A_{f_1} – амплитуды колебаний параметров U_1 и f_1 ; φ_{U_1} , φ_{f_1} – абсолютные значения фазы колебаний U_1 и f_1 ; A_{W1} , $\Delta\varphi_{W1}$, A_{W2} , $\Delta\varphi_{W2}$ – искомые значения АЧХ и ФЧХ канала по отклонению напряжения, канала по отклонению частоты напряжения.

Выполняя аналогичным образом N экспериментов, можно определить ЧХ каждого из N каналов регулирования, в том числе и при вариации параметров настройки (постоянных времени) каналов АРВ.

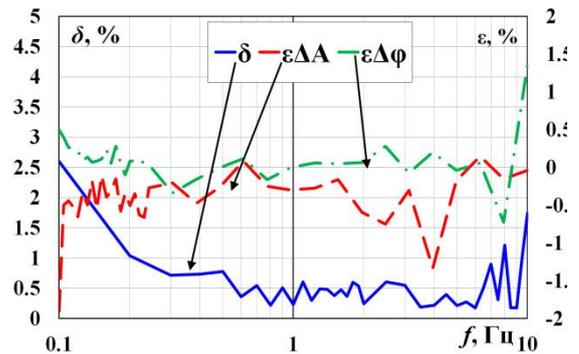
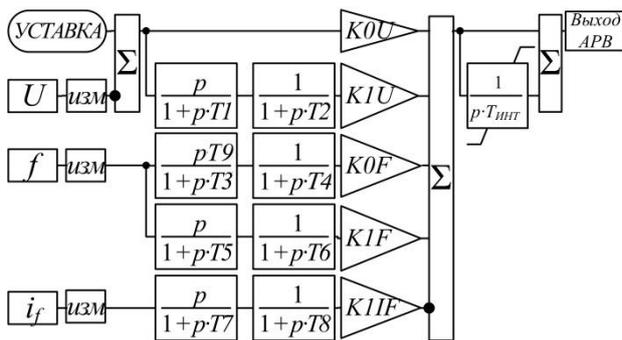
Для оценки достоверности ЭЧХ, получаемых с использованием вышеописанной методики, произведено их сравнение с аналитически рассчитанными. Результаты исследований одной из известных моделей АРВ, реализованной в *RTDS* показаны на рисунке 7. Погрешности определения ЭЧХ каналов заданной модели АРВ определялись по выражениям приведенных

относительных погрешностей амплитуды ε_A и фазы ε_φ и обобщенной оценки δ_i , предложенной в Стандарте:

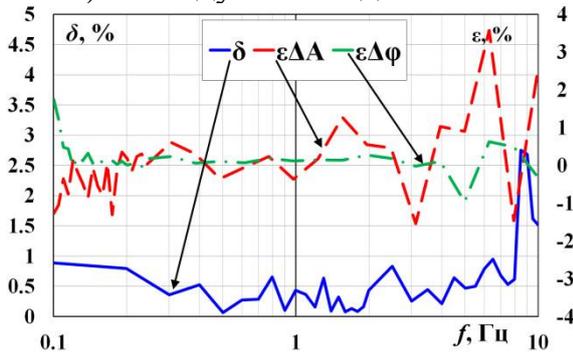
$$\varepsilon_A^i = (A_{\text{изм}}^i - A_{\text{ан}}^i) / A_{\text{норм}} \quad \delta_i = (|\Delta A_i| + |A^i \Delta \varphi_i|) / A_{\text{ан}}^{\text{MAX}} \quad (9)$$

где i – номер точки ЭЧХ; $A_{\text{изм}}^i$ и $A_{\text{ан}}^i$ – экспериментальное и аналитически определенное на частоте f_i значения амплитуды АЧХ (выражение для ε_φ – аналогично); $A_{\text{норм}}$ – нормирующая величина для определения относительной приведенной погрешности ЭЧХ – среднее геометрическое значение:

$$A_{\text{норм}} = \sqrt{|A_{\text{ан}}^{\text{MAX}}| |A_{\text{ан}}^{\text{MIN}}|}; \quad \Delta A_i = A_{\text{изм}}^i - A_{\text{ан}}^i; \quad \Delta \varphi_i = \varphi_{\text{изм}}^i - \varphi_{\text{ан}}^i \text{ (рад).}$$

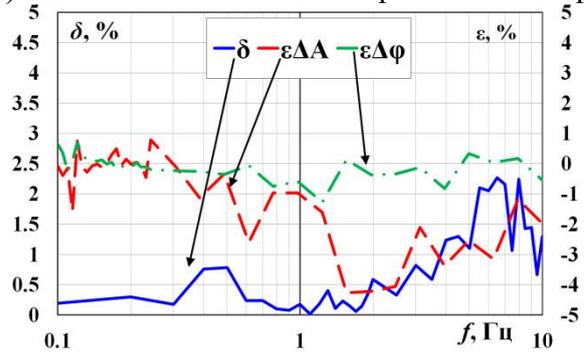


а) исследуемая модель АРВ



в) канал по первой производной напряжения статора

б) канал по отклонению напряжения статора



г) канал первой производной частоты напряжения

Рисунок 7 – Исследуемая модель АРВ (а), погрешности определения ЭЧХ амплитуды ε_A , фазы ε_φ , обобщенная погрешность δ , полученные для каналов АРВ (б, в, г)

Установлено, что погрешности ε_A и ε_φ , оценка δ не превышают $\pm 4\%$ в диапазоне частот $[0,1; 10]$ Гц для всех каналов, что подтверждает корректность исследуемых по разработанной методике динамических свойств моделей АРВ.

Одним из условий сертификации промышленных АРВ является передача его корректной математической модели, проверенной экспериментально. Однако как показали исследования, передаваемые (декларируемые) модели не

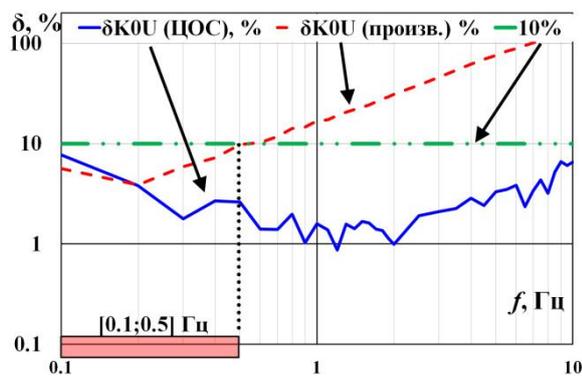
всегда проверяются экспериментально. Декларируемые модели проверялись с методикой.

Выявлено, что декларируемые модели АРВ не отражают динамические свойства действительных устройств, поскольку не учитывают свойства измерительного тракта каналов регулирования. Это приводит к превышению уровня погрешности δ модели для колебаний частотой более 0.5 Гц (таблица 1).

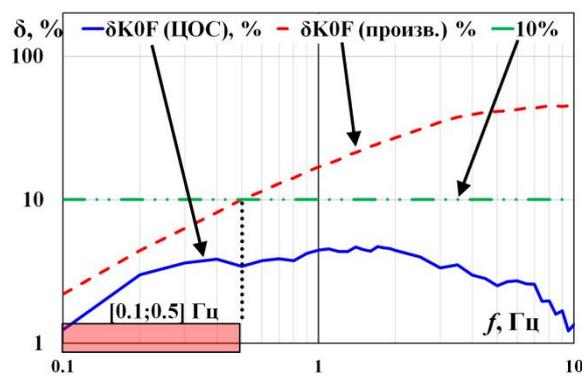
Для создания моделей каналов АРВ, удовлетворяющих требованиям Стандарта в регламентируемом им диапазоне частот [0.1;10] Гц, необходим учет цифровой обработки сигналов (ЦОС), способов измерения параметров режима. Результаты оценки достоверности моделей каналов АРВ с учетом и без учета ЦОС приведены на рисунках 8 а, б.

Таблица 1 – Верхняя граница частотного диапазона ЭЧХ промышленного АРВ, удовлетворяющих требованию Стандарта (δ не превышает 10 %)

Название канала	f , Гц
Канал по отклонению напряжения статора СГ	0.5
Канал по первой производной напряжения статора СГ	1.0
Канал по первой производной тока возбуждения СГ	1.1
Канал по отклонению частоты напряжения статора СГ	0.5
Канал по первой производной частоты напряжения статора СГ	0.8



а) по отклонению напряжения



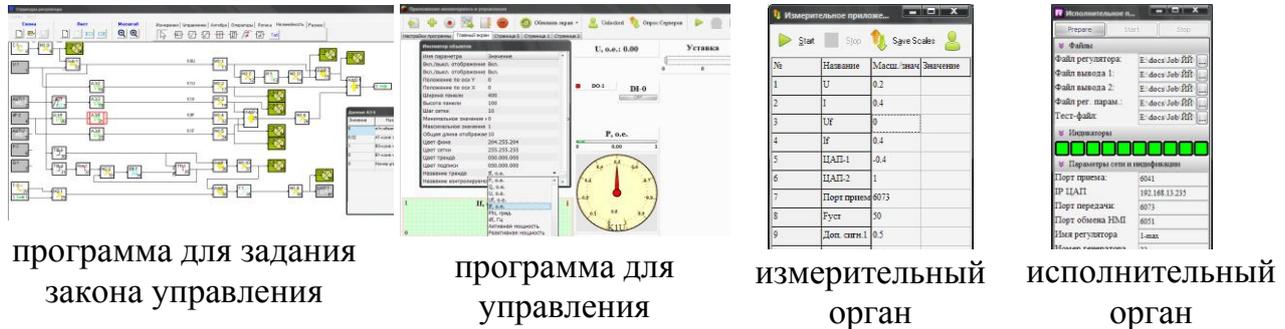
б) по отклонению частоты

Рисунок 8 – Погрешности частотных характеристик каналов математической модели АРВ без учета ЦОС δ (произв.) и с ЦОС δ (ЦОС)

В третьей главе выполнена разработка программных средств моделирования устройств локальной и системной автоматики энергосистем, приведены результаты исследований динамических свойств разработанных программных средств.

Для этого автором было разработано прикладное программное обеспечение, которое структурно состоит из четырех программных модулей (рисунок 9). С их помощью в графическом виде создается математическая

модель структуры управления, производится измерение параметров электрического режима объекта управления и выполняется расчет и формирование противоаварийных управляющих воздействий в режиме реального времени.



программа для задания закона управления

программа для управления

измерительный орган

исполнительный орган

Рисунок 9 – Компоненты разработанного программного обеспечения для моделирования устройств противоаварийного управления

Расчет управляющих воздействий осуществляется с помощью разработанного автором двухэтапного численного метода решения системы нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений. На первом этапе итерационно согласно методу Зейделя определяются значения алгебраических неизвестных и значения производных неизвестных параметров (10), на втором – интегрирование по методу Эйлера (11):

$$\begin{cases} px_M^S = (-a_{M,1}^S px_1^S \dots - a_{M,M-1}^S px_{M-1}^S - a_{2,L}^K x_L^K \dots - a_{2,F}^K x_F^K + b_M) / a_{M,M}^K \\ \dots \\ x_F^S = (-a_{F,1}^S px_1^S \dots - a_{F,M}^S px_M^S - a_{F,L}^S x_L^S \dots - a_{F,F-1}^S x_{F-1}^S + b_F) / a_{F,F}^K \end{cases} \quad (10)$$

$$[x_1^{t+\Delta t} \dots x_m^{t+\Delta t}]^T = [x_1^t \dots x_m^t]^T + [px_1 \dots px_m]^T \Delta t \quad (11)$$

где px_i^h – производная параметра x_i , вычисленное (вычисляемое) на итерации h ; K – текущий номер итерации; s – номер последующей итерации; $a_{i,j}^h$ – коэффициенты уравнений на итерации h (могут быть зависимыми друг от друга и/или от переменных px_i и x_i); b_i – i -ый элемент вектора свободных значений.

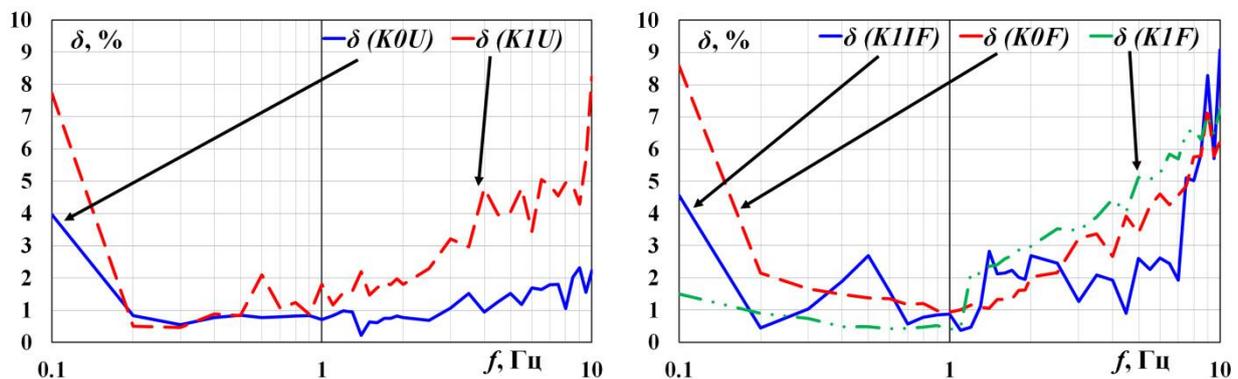
В результате численных экспериментов установлено, что решение систем уравнений составляет менее 1 мс, при общем времени выполнения основной программы 5 мс. Выбор значения 5 мс обусловлен временем ожидания при передаче данных в локальной вычислительной сети (ЛВС) общего назначения (1-2 мс) и вычислительной мощностью автоматизированных рабочих мест.

Передача данных по ЛВС позволяет выполнять моделирование локальных и групповых устройств управления. Поэтому автором с использованием программных средств моделирования предложены две

типовые схемы испытаний. Первая структурная схема испытаний устройств локальной автоматики/управления, согласно которой для каждого объекта управления (обычно – модельный синхронный генератор) работает пара программ – измерительный и исполнительный орган. Общий контроль осуществляет пользователь от главной программы управления. Вторая структурная схема испытаний реализуется при передаче данных между измерительными и исполнительными органами, что позволяет выполнять моделирование устройств группового управления.

Программные средства моделирования турбин, статических систем возбуждения, систем режимного и противоаварийного управления энергосистемами успешно апробированы при исследованиях на ЦАФК, в том числе в работах по определению параметров настройки АРВ генераторов Белоярской АЭС, Сургутской ГРЭС-2, Рефтинской ГРЭС, Балаковской АЭС, Нововоронежской АЭС и др.

Качество воспроизведения математических моделей устройств оценено при анализе динамических свойств модели АРВ, реализуемой разработанными программными средствами (погрешности воспроизведения частотных характеристик приведены на рисунке 10).



- а) каналы по отклонению напряжения статора и его первой производной б) каналы по первой производной тока возбуждения, по отклонению частоты напряжения и его первой производной

Рисунок 10 – Погрешности работы программных средств моделирования автоматического регулятора возбуждения

Установлено, что программные средства моделирования позволяют достичь требуемой степени соответствия реализуемой модели. Например, при моделировании АРВ погрешность ЭЧХ δ не превышает 10 %.

В четвертой главе исследуются разработанные микропроцессорные (МП) средства моделирования устройств противоаварийного управления, структурная схема приведена на рисунке 11.

Для моделирования устройства автоматики, используются МП плата с периферийными устройствами ввода/вывода и прикладное программное обеспечение, реализующее модель в формате *Simulink*. Модель устройства автоматики в среде *MATLAB Simulink* включает модели блоков измерения и цифровой обработки сигналов, модель алгоритма функционирования устройства, и модели, осуществляющие формирование управляющих воздействий. Данный подход повысил частоту дискретизации программы до 1 кГц.

Для обоснования возможности использования МП средств моделирования выполнено сравнение переходных процессов, полученных с моделью автоматического регулятора возбуждения, принятой за эталонную, и переходных процессов, полученных с использованием МП средства, реализующего эту модель. Для этого в *RTDS* была реализована схема «СГ-линия-шины неизменного напряжения». Управление возбуждением СГ осуществлялось на выбор исследователя от реализованной в *RTDS* математической модели АРВ либо от модели АРВ МП средства моделирования, подключенного к выходным сигналам *RTDS* с помощью датчиков сигналов. Проводились эксперименты с разными значениями параметров настройки (рисунок 12; на рисунках сигналы, полученные с использованием модели АРВ в *RTDS* отмечены «*RTDS*», с средствами моделирования – «эмул.»).

Для оценки достоверности разработанного МП средства моделирования использовалась среднееквадратичное значение мгновенной относительной погрешности ε , рассчитанной на интервале времени T , между сигналами активной мощности синхронного генератора для обоих типов моделей:



Рисунок 11 – Структурная схема МП средств моделирования

$$E_{\text{СКВ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \varepsilon(t) dt} \quad (12)$$

где $\varepsilon(t)$ – мгновенная относительная погрешность контролируемого параметра, %.

С точки зрения эффективности работы МП средства моделирования наиболее сложным для воспроизведения является режим со слабо затухающими колебаниями параметров режима, в котором незначительные отличия моделей (например, отличия амплитуды и фазы частотных характеристик) многократно интегрируются, что приводит к накоплению и росту погрешности (рисунки 12, 13).

Рост погрешности моделирования в таких режимах в основном обусловлен увеличением фазового рассогласования между сигналами.

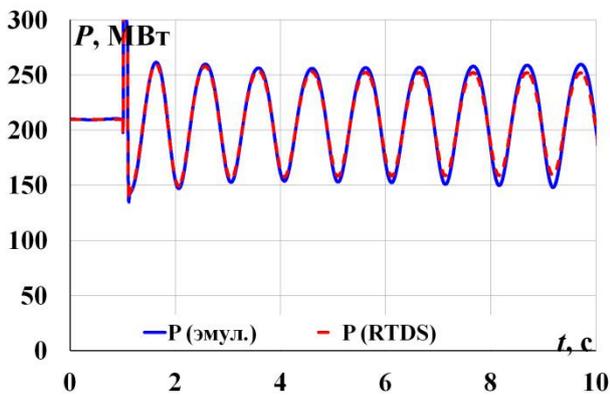


Рисунок 12 – Характеристики изменения активной мощности АРВ с $KOU = 16.6$ е.в.н./е.н.с. при аварийном возмущении

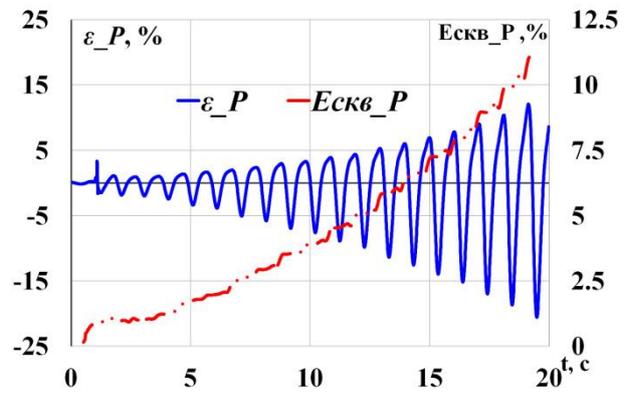


Рисунок 13 – Погрешность моделирования, ее среднеквадратичное значение, вычисленные на интервале 1 с, $KOU = 16.6$ е.в.н./е.н.с.

В то же время, при задании значений настроек, не отвечающих границе области колебательной устойчивости, погрешность воспроизведения свойств модели асимптотически стремится к нулю (рисунок 14 – интегральные погрешности при различных параметрах настройки моделей АРВ).

Показано, что погрешность

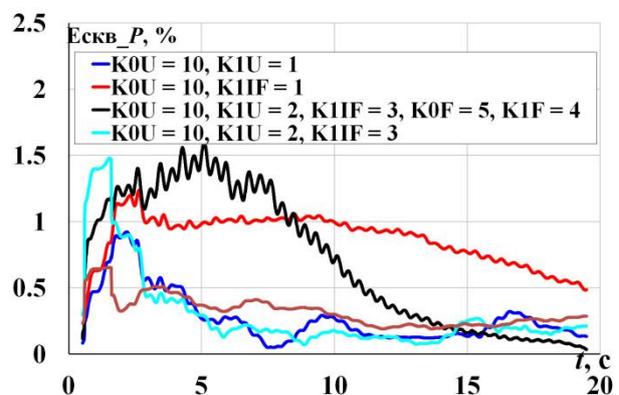
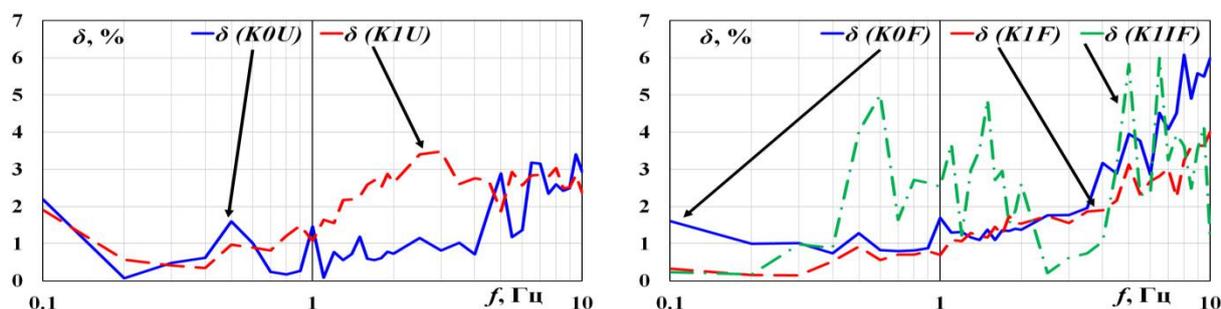


Рисунок 14 – Среднеквадратичные значения относительной погрешности воспроизведения активной мощности, вычисленные на интервале 1 с

воспроизведения ЧХ каналов АРВ, реализуемого микропроцессорным средством моделирования, δ не превышает 10 % и удовлетворяет требованиям Стандарта.



- а) каналы по отклонению напряжения статора и его первой производной
 б) каналы по первой производной возбуждения, по отклонению частоты напряжения и его первой производной

Рисунок 15 – Погрешности микропроцессорных средств моделирования автоматического регулятора возбуждения

Разработанные микропроцессорные средства моделирования устройств противоаварийного управления энергосистемами рекомендованы для использования и внедрены в состав ЦАФК для проведения испытаний.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Все предложенные и обоснованные в диссертации методики измерения электрических сигналов и режимных параметров, разработанные цифровые средства для физических испытаний в реальном времени устройств автоматики энергосистем предназначены для повышения их эффективности и энергетической безопасности их работы. Основными научными результатами диссертации, обладающими теоретической и практической ценностью, являются:

1. Разработана и научно обоснована методика экспериментального определения частотных характеристик отдельных каналов и общей схемы управления микропроцессорных регуляторов возбуждения с учетом динамических свойств их измерительных органов. Данная методика и предложенные меры оценки достоверности определения экспериментальных частотных характеристик рекомендованы для проверки соответствия моделей и устройств регуляторов возбуждения требованиям Стандарта АО «СО ЕЭС», используемого при сертификации микропроцессорных регуляторов возбуждения. Для этого автором разработаны специализированные средства оценки частотных свойств регуляторов возбуждения, функционирующие в реальном масштабе времени.

2. В результате экспериментальных исследований декларируемых производителем моделей микропроцессорных регуляторов возбуждения показано, что модели неадекватно отражают динамические свойства физических устройств вследствие пренебрежения характеристиками их измерительных органов. Такие математические модели вносят существенные искажения в нестационарных режимах электромеханических колебаний с частотой более 1 Гц. Для повышения достоверности математических моделей современных микропроцессорных регуляторов возбуждения предложены и обоснованы способы измерения частоты напряжения (и других режимных параметров), учитывающих амплитудно-фазовые искажения, обусловленные характеристиками дискретного преобразования Фурье.

3. Разработаны в составе физических моделей энергосистем структурные схемы стендов испытаний с программными средствами моделирования устройств локальной, системной режимной и противоаварийной автоматики. Программные средства для испытаний регуляторов паровых и газовых турбин, возбудителей электромашинных и статических систем возбуждения, систем режимного и противоаварийного управления энергосистемами успешно апробированы при исследованиях на цифро-аналого-физическом комплексе, в том числе в работах по определению параметров настройки регуляторов возбуждения генераторов Белоярской АЭС, Сургутской ГРЭС-2, Рефтинской ГРЭС, Балаковской АЭС, Нововоронежской АЭС, а также при определении параметров срабатывания автоматики ограничения повышения частоты в Калининградской энергосистеме.

4. Разработаны микропроцессорные средства для физических испытаний устройств противоаварийного управления, функционирующие в реальном масштабе времени в составе цифро-аналого-физического комплекса. В результате экспериментальных исследований разработанных цифровых средств показано, что их частотные свойства полностью отвечают положениям Стандарта АО «СО ЕЭС», в котором регламентированы требования к качеству математических моделей автоматических регуляторов возбуждения сильного действия. Созданные автором цифровые средства моделирования устройств противоаварийного управления энергосистемами рекомендованы для применения и внедрены в лабораторных испытаниях в составе цифро-аналого-физического комплекса АО «НТИЦ ЕЭС».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Зеленин А.С., Кузнецов В.Л., Попов М.Г. Разработка микропроцессорного испытательно-диагностического комплекса средств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия «Наука и образование». – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – № 2-2(147). – С. 53-58.
2. Гуриков О.В., Зеленин А.С., Кабанов Д.А. Разработка методики настройки системных стабилизаторов зарубежного типа с использованием частотных методов анализа // Электрические станции: произв.-техн. Журнал. – М.: Энергопрогресс, 2015. – 12. – С. 9-17.
3. Гуриков О.В., Зеленин А.С., Штефка Й. Методика построения математических моделей микропроцессорных АРВ по экспериментально снятым частотным характеристикам // Известия НТЦ ЕЭС. – СПб, 2016. – 75. – С. 45-58.
4. Елисеев Д.А., Зеленин А.С. Микропроцессорная система для моделирования устройств автоматического регулирования в составе физических моделей энергосистем // Известия НТЦ Единой Энергетической системы. – 2018. – 79. – С. 73-81.

Публикации в базе данных *Scopus*:

5. *Aleksandr Zelenin, Dmitry Eliseev, Maksim Popov Development and Implementation Experience of Microprocessor Emulators for Cyber-physical AVR Testing Complexes.* – конф. January 28-30, 2019, St.Petersburg. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8657237>

Публикации в других изданиях:

6. Зеленин А.С., Мичурин Н.А. Применение электродинамической модели для исследования режимов в энергосистемах // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Т. II. – С. 17-19.
7. Зеленин А.С., Шескин Е.Б., Штефка Й. Программно-технический комплекс для формирования и реализации цифровых моделей регуляторов возбуждения и мощности энергоблоков // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 238-243.
8. Зеленин А.С., Штефка Й. Расчет частоты по коэффициентам разложения Фурье в трехфазной цепи // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – № 2(69). – С. 32-35.
9. Зеленин А.С. Технология создания цифровых моделей устройств управления возбуждением и мощностью синхронных генераторов цифро-аналого-физического комплекса на микропроцессорной базе с использованием *SIMULINK* // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015. – Т. I. – С. 101-104.

10. Тимофеева Я.А., Зеленин А.С., Гуриков О.В. Сопоставление различных методов измерения частоты электрического тока // Электроэнергетика глазами молодежи-2016: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19 – 23 сентября 2016 г., Казань. – В 3 т. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – Т. 3. – С. 113-114.

11. Гуриков О.В., Зеленин А.С., Кабанов Д.А. Влияние точности цифровой модели автоматического регулятора возбуждения на результаты оптимизации его настроечных параметров // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VII международной научно-технической конференции. – 2016. – Т. II. – С. 179-181

Подписано в печать __. __.2020. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ № __.

Отпечатано с оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии Санкт-Петербургского государственного политехнического
университета. 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.