ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности электроснабжения потребителей в современных электроэнергетических системах достигается за счет применения прогрессивных устройств автоматического управления, регулирования и/или защиты (РЗА). Их модернизация в целом определяется обновлением элементной базы аппаратного обеспечения при сохранении основных функциональных алгоритмов противоаварийного управления [6]. Ввиду значительного многообразия микропроцессорных устройств и технических условий их создания, определяемых, как правило, только производителями, стала актуальной проблема испытаний таких устройств. Экспериментальные исследования с использованием физического оборудования необходимы для выявления истинных динамических свойств этих устройств, обусловливающих их техническое и функциональное совершенство.

В настоящее время физическое моделирование энергосистем используется при исследованиях работы устройств РЗА на цифро-аналого-физическом комплексе (ЦАФК) АО НТЦ ЕЭС «Противоаварийное управление» [2], а также на электродинамической модели электроэнергетической системы НИУ МЭИ. Для проведения экспериментальных исследований на ЦАФК создаются эквивалентные физические модели энергосистем с использованием силового оборудования (модельные физические синхронные генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, асинхронные двигатели и статическая нагрузка) и устройств управления (автоматические регуляторы возбуждения, автоматические регуляторы скорости и др.).

Испытываемые физические устройства автоматического управления подключаются к оборудованию

ЦАФК, и таким образом имитируется их работа в реальной энергосистеме. Однако довольно часто возникает необходимость имитации действия устройств противоаварийного управления энергосистемы, не предоставляемых на испытания [3]. Для этого в составе ЦАФК могут применяться в том числе и программные средства моделирования, в которых цикл выполнения основной программы составляет около 5 мс. Такая дискретизация по времени обусловлена ограничениями по скорости информационного обмена в локальной вычислительной сети, а также производительностью автоматизированных рабочих мест. Но для испытаний устройств отдельных видов системной автоматики подобная дискретизация численного решения уравнений в силу требований по быстродействию неприемлема.

23

Устранение указанных ограничений по быстродействию возможно при модернизации структуры испытательного комплекса, в которой вместо программных средств применены специальные цифровые средства имитации работы серийно выпускаемых устройств противоаварийной автоматики.

Здесь и далее по тексту под цифровыми средствами реального времени понимается прикладное программное обеспечение, интегрированное в промышленную микропроцессорную плату и функционирующее в режиме реального времени. Эти цифровые средства имитации устройств автоматики энергосистем разработаны одним из авторов (А.С. Зелениным) на базе промышленных микропроцессорных плат. Предложенный подход и оптимизация программных алгоритмов позволяют повысить частоту дискретизации контролируемых управляющих (выходных) сигналов до частоты 10 кГц (dt = 100 мкс) и выше [4].

ЦИФРОВЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА УСТРОЙСТВ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

АВТОРЫ

М.Г. ПОПОВ, ФГАОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

А.С. ЗЕЛЕНИН, АО «НТЦ ЕЭС ПРОТИВО АВАРИЙНОЕ УПРАВЛЕ-НИЕ» ехническое совершенство и надежность функционирования средств диагностики, автоматики и релейной защиты в первую очередь определяются качеством входной информации. Современная цифровая комплексная система диагностики реального времени делает возможным разрабатывать и проектировать без привлечения реального оборудования принципиально новые средства и алгоритмы защиты и противоаварийной автоматики.

Ключевые слова: релейная защита и противоаварийная автоматика; режимное противоаварийное управление энергосистемами; диагностика и испытания устройств противоаварийного управления; цифровизация энергетики; цифровые технологии и системы реального времени.



Устройства АСУ ТП современной подстанции

«ЕДИНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ

СИСТЕМА И ИЗОЛИРОВАННО РАБОТАЮЩИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ. УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ»

4. Общие положения

ИЗ ГОСТ Р 58058-2018

4.1. При проектировании и эксплуатации энергосистем проверка выполнения требований к устойчивости и определение максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях (допустимой нагрузки электростанций) должны осуществляться на основании расчетов установившихся электроэнергетических режимов, статической устойчивости и динамической устойчивости (далее — расчеты режимов и устойчивости).

4.4. При проведении расчетов режимов и устойчивости с целью проверки выполнения требований к устойчивости, определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях (допустимой нагрузки электростанций) должны учитываться нормативные возмущения в соответствии с требованиями настоящего стандарта.

6. Нормативные требования к устойчивости энергосистем

6.1. По условиям устойчивости энергосистем нормируются:

- минимальный коэффициент запаса статической апериодической устойчивости по активной мощности в контролируемом сечении;
- минимальный коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узле нагрузки.

Согласование уровней вторичных

сигналов АЦП осуществляется

вторичными преобразователями

сигналов (датчики). В блоке вторич-

ных преобразователей используются

четыре датчика тока (фазные токи,

ток возбуждения) и четыре датчика

напряжения (фазные напряжения,

напряжение возбуждения). Блок из-

мерения и цифровой обработки сиг-

налов выполняет расчет следующих

 интегральные значения фазных напряжений и токов с помощью

КИХ-фильтров, а также при час-

тотной коррекции их измере-

параметров:

ний;

сигналов измерительных трансфор-

маторов тока и напряжения и входных

симметричные составляющие прямой последовательности тока и напряжения;

- частоты напряжения;
- составляющие нулевой и обратной последовательностей тока (I₀, I₂), напряжения (U₀, U₂).

Усреднение измеренных с помощью АЦП электрических сигналов тока возбуждения и напряжения возбуждения производится на интервале времени 20 мс. Для фильтрации импульсных электромагнитных помех в измерительном тракте используются полосно-заградительные фильтры, настроенные на частоту 50 Гц.



СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ



Рис. 1

ОБОБЩЕННАЯ СТРУК-ТУРА МИКРОПРО-ЦЕССОРНЫХ ИМИТА-ЦИОННЫХ СРЕДСТВ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО **УПРАВЛЕНИЯ**

Имитация работы устройства противоаварийного управления электрооборудованием объединенных энергосистем, функционирующего в режиме реального времени, осуществляется с использованием отладочной микропроцессорной платы STM32F4Discovery, которая имеет периферийные устройства ввода/вывода. Программирование платы и задание реализуемой математической модели может быть осуществлено на основе MATLAB Simulink (рис. 1).

Эта цифровая имитационная модель противоаварийной автоматики включает в себя блоки измерения и цифровой обработки сигналов, функциональные алгоритмы противоаварийного управления и формирования управляющих воздействий.

Измерение сигналов и формирование управляющих воздействий производится с помощью следующих модулей ввода/вывода платы (рис. 1):

- 12-битный модуль аналого-цифрового преобразования (АЦП) с мультиплексором для 16 каналов;
- модуль ввода/вывода дискретных сигналов;
- 12-битный двухканальный модуль цифро-аналогового преобразования (ЦАП).

Вычисленные интегральные значения параметров электрического режима в дальнейшем передаются в синтезированный функциональный алгоритм противоаварийной автоматики, а после его работы — в функциональный алгоритм формирования управляющих воздействий в виде выходных аналоговых и/или дискретных сигналов Управляющие воздействия преобразуются в электрические сигналы с помощью устройств вывода (ЦАП, дискретные порты платы) и подаются на исследуемый (испытуемый) физический объект.

Следует отметить, что при синтезе новых функциональных схем (законов) противоаварийного управ-

Название канала, коэффициент его усиления, ед. измерения	Номер эксперимента (номер рисунка)									
	1 (4)	2 (5)	3	4	5	6	7	8	9	
Пропорционально-интегральный канал регулирования по отклонению напряжения статора, К _{ои} , е.в.н.1*/е.н.с.**	16,6	10	10	10	10	10	10	10	10	
Канал регулирования по первой производной напряжения статора, К _{1U} , е.в.н./(е.н.с./с)***			1				2	2	2	
Канал регулирования по первой производной тока возбуждения, К _{IIP} е.в.н./(е.т.р./с)****				1			3	3	3	
Канал регулирования по отклонению частоты напряжения статора, К _{ор} е.в.н./Гц					2			5	5	
Канал регулирования по первой производной частоты напряжения статора, К _{1F} е.в.н./(Гц/с)						1			4	

Примечание: * е.в.н./е.н.с. — единицы возбуждения номинальные;

** е.н.с. — единицы номинального напряжения статора;

*** е.н.с./с — единицы скорости изменения напряжения статора;

**** е.т.р./с — единицы скорости изменения тока ротора.

Таблица 1

ПОКАЗАТЕЛИ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Номер эксперимента (рисунки)	Частота	колебаний, Гц	Логарифмический декре- мент затухания, о. е.			
	RTDS	модель	RTDS	модель		
1 (рис. 4а)	1,02	1,02	0,001	-0,008		
2 (рис. 5а)	1,00	1,00	0,307	0,303		
3	0,98	0,97	0,111	0,094		
4	0,96	0,96	0,287	0,275		
5	1,01	1,00	0,025	0,008		
6	0,86	0,87	0,055	0,111		
7	1,28	1,28	0,470	0,457		
8	1,14	1,14	0,126	0,143		
9	1,15	1,15	0,268	0,287		

ления, как правило, не требуется существенного структурного изменения измерительных органов достаточно провести их параметрическую настройку.

Разработанные микропроцессорные средства с двухканальными ЦАП могут осуществлять имитацию сразу двух устройств управления.

В частности, в микропроцессорном устройстве может быть реализована одна из моделей автоматического регулятора возбуждения (APB) и одна из моделей турбины с системой ее управления. В этом случае на физический объект генератор подаются сигналы управления его возбудителем и моментом (скоростью вращения) его электропривода.

Некоторые результаты лабораторных экспериментальных исследований таких микропроцессорных средств имитации устройств релейной защиты, автоматики и противоаварийного управления электрооборудованием энергосистем изложены ниже.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬ-НЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ПРОТИВОАВА-РИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

Экспериментальные исследования разработанных микропроцессорных средств имитации противоаварийной автоматики проводились в лаборатории АО «НТЦ ЕЭС» «Противоаварийное управление». Основной целью лабораторных исследований являлась апробация разработанных средств имитации противоаварийной **УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ** ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ (АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ)

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АРВ, РЕАЛИЗОВАННОГО С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ



Рис.3

автоматики в условиях близких к полевым. При проведении физических экспериментов с микропроцессорными имитаторами устройств противоаварийного управления также выполнялась оценка их эффективности и достоверности воспроизведения ими внешних динамических характеристик в нестационарных режимах работы объединенных энергосистем, аналогично методикам других авторов [1, 5, 7–9]. Эти аспекты изложены ниже.

Рассмотрим сначала основные результаты экспериментальных исследований и качественный, сопоставительный анализ полученных расчетных осциллограмм в нестационарных режимах работы энергосистем. При этом в качестве эталонных значений контролируемых режимных параметров, относительно которых определяется мгновенная относительная погрешность є (t), приняты расчетные величины из программно-аппаратного комплекса моделирования энергосистем в режиме реального времени (ПАК RTDS), где реализована исследуемая схема «генератор — линия электропередачи — шины неизменного напряжения» (далее — тестовая схема; рис. 2).

К тестовой схеме в ПАК RTDS было подключено микропроцессорное устройство имитации автоматического регулятора возбуждения (APB). Расчетные сигналы модели синхронного генератора — цифровые значения мгновенных фазных напряжений u_A, u_B, u_C и токов i_A, i_B, i_C, i_f преобразуются в потенциальную форму (±10 В) электрических сигналов с использованием ЦАП в интерфейсных блоках GTAO (рис. 2). Эти электрические сигналы ±10 В в результате их усиления и стабилизации (по току) обладают соответствующими номинальными уровнями вторичного тока (до 5 А) или вторичного напряжения (до 100 В) измерительных трансформаторов.

Структурная схема цифровой модели APB, встроенной в микропроцессорное устройство его имитации, приведена на рис. 3. При проведении экспериментов основное внимание уделялось исследованию и анализу переходных процессов при различных настройках каналов регулирования [1, 5, 8]. В связи с этим для упрощения последующего анализа переходных процессов защитные 28

УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛН ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ (АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ)

ЭТАЛОННЫЕ И ВОСПРОИЗВОДИМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (А), НАПРЯЖЕНИЙ СТАТОРА И РОТОРА (Б) И МГНОВЕННЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИХ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ (В) С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ АРВ С К_{пі} = 16,6 Е.В.Н./ Е.Н.С. В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ







функции и ограничители АРВ были временно выведены из действия.

Лабораторные исследования проводились в ограниченном (20 с) интервале реального времени, при этом не решалась задача выбора оптимальных параметров настройки АРВ, обеспечивающих минимальное время и наибольшее демпфирование переходного процесса. В табл. 1 отражен перечень лабораторных экспериментов (вторая строка) и соответствующие им коэффициенты усиления каналов регулирования возбуждения.

В заголовках столбцов 2, 3 табл. 1 в круглых скобках дополнительно указаны номера рисунков с наиболее характерными расчетными осциллограммами, включенными в настоящую статью.

В качестве одного из традиционных возмущающих воздействий [1, 5, 7-9] в исследовании устойчивости энергосистемы моделировалось внешнее (на выводах генератора) трехфазное короткое замыкание через переходное сопротивление (рис. 4. 5). Характеристики, полученные в результате численного расчета модели АРВ, реализованной в ПАК RTDS, обозначены в подрисуночных надписях рис. 4, 5 с индексами «RTDS». Эти характеристики приняты в качестве эталонных при вычислении относительной приведенной мгновенной погрешности напряжения возбуждения (ε.,.), напряжения статора (ε.,) и активной мощности (є_р). Зависимости, воспроизводимые микропроцессорными средствами моделирования АРВ, на этих же рисунках имеют индекс «Мод.».

Выбор наиболее тяжелых с точки зрения оценки эффективности микропроцессорных средств моделирования выполняется по результатам анализа демпферных свойств исследуемой энергосистемы при различных настройках регуляторов возбуждения синхронного генератора. В табл. 2 приведены показатели демпфирования электромеханических колебаний электрической мощности при различных параметрах настройки регуляторов.

Из анализа декрементов затухания (столбцы 4, 5 табл. 2) следует, что наиболее характерным (наихудшим) с точки зрения оценки эффективности работы модели является режим с возникновением слабо затухающих (или близких к ним) колебаний электрической мощности, обусловленных избыточным усилением (K_{оц} = 16.6 е.в.н./е.н.с.) канала регулирования по отклонению напряжения статора (эксперимент 1 в табл. 1, 2 и на рис. 4).

Устранение автоколебаний без введения дополнительной стабилизации возможно только при снижении коэффициента усиления К_{ан}, например, до 10 е. в.н./е. н.с. (эксперимент 2 в табл. 1, 2 и на рис. 5).

Отметим также не только количественное, но и качественное искажение переходных характеристик мощности, напряжений ротора и статора (рис. 4 а, б) — на границе области устойчивости исследуемой электроэнергетической системы микропроцессорное средство имитации АРВ воспроизводит неустойчивый процесс с инкрементом +0,008 с-1 (последний столбец табл. 2).

Важным является замечание о том, что все последующие оценки показателей эффективности и качества воспроизведения внешних динамических характеристик производятся применительно к характеристикам погрешности воспроизведения активной мощности, а не к действительному переходному процессу энергосистемы.

ЭТАЛОННЫЕ И ВОСПРОИЗВОДИМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (А), НАПРЯЖЕНИЙ СТАТОРА И РОТОРА (Б) И МГНОВЕННЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИХ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ (В) С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ АРВ С $K_{nii} = 10 E.B.H./E.H.C.$ В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ





-sH



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОС-ТИ МИКРОПРОЦЕССОР-НЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИ-РОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

Характеристики мгновенной относительной погрешности напряжения возбуждения (є, , напряжения статора (є,) и активной мощности (є,), показанные на рис. 4, 5, являются знакопеременными и имеют импульсный характер, обусловленный прежде всего фазовыми (угловыми) погрешностями. Следует отметить, что относительные погрешности напряжения возбуждения и напряжения статора имеют более резкий, выраженный импульсный характер с разрывами характеристик по сравнению с зависимостью относительной погрешности воспроизведения активной мощности ε... Поэтому для дальнейшего анализа и обобщенной оценки эффективности разработанных микропроцессорных средств моделирования используется среднеквадратичная погрешность воспроизведения электрической мощности, которая определяется по выражению

$$E_P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \varepsilon_P^2(t) dt} ,$$

где ε (t) — относительная приведенная мгновенная погрешность контролируемого параметра, %;

(1)

 Т — интервал усреднения, который определяется периодом электромеханических колебаний, с.

Среднеквадратичное значение относительной погрешности воспроизведения мощности Е_р, рассчитанное по формуле (1) при интервале усреднения T = 1 с, является, по сути, характеристикой изменения декремента (или инкремента) мгновенной относительной погрешности.

На рис. 6, 7 приводятся среднеквадратичные значения относительной приведенной погрешности воспроизведения активной мощности Е_p с помощью микропроцессорных средств моделирования устройств противоаварийной автоматики. Дополнительно на рис. 6 синим цветом показана относительная приведенная мгновенная погрешность воспроизведения активной мощности є_p.

В результате анализа характера изменения мгновенной ε_ь и среднеквадратичной Е_□ погрешностей воспроизведения активной мощности (рис. 6) выявлены ограничения применения разработанных микропроцессорных средств моделирования в предельных или близких к предельным режимах по передаваемой мощности. В частности, при подключении микропроцессорных средств моделирования к испытательному стенду реального времени наблюдается асимптотический характер нарушения устойчивости исследуемой энергосистемы.

Этот факт подтверждается возрастаюшими колебаниями мгновенной относительной погрешности ε_р (рис. 6, сплошная синяя линяя). При этом в начальной стадии переходного процесса инкремент колебаний мгновенной погрешности воспроизведения мощности является практически постоянным (рис. 6, сплошная красная линия, интервал времени от 1 до 3 с), его логарифмическое значение составляет около 0,07 о.е. (E_p = 1%, сплошная красная линия, масштаб оси справа, рис. 6) при эквивалентном логарифмическом инкременте характеристики активной мощности 0,008 о.е. (табл. 1, эксперимент 1).

Развитие этого неустойчивого процесса в энергосистеме характеризуется почти линейным ростом инкремента мгновенной погрешности

ИНФОРМАЦИЯ

Физическое моделирование силового оборудования ЭЭС развивалось с 20-х гг. 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.

В нашей стране такого рода исследования проводятся в НТЦ ЕЭС, СО ЕЭС, НТЦ Россети ФСК ЕЭС, ВНИИЭ, ВЭИ, НИУ МЭИ, СПбПУ и др. В частности, на сегодняшний день физическое моделирование энергосистем используется при исследованиях работы устройств РЗА на цифроаналого-физическом комплексе (ЦАФК) АО «НТЦ ЕЭС», на электродинамической модели электроэнергетической системы НИУ МЭИ.

воспроизведения активной мощности (среднеквадратичной погрешности, Е_р) до 0,12 о. е. Практически линейный характер увеличения среднеквадратичной погрешности обусловлен наличием методической, вычислительной или инструментальной погрешностей, которые в результате интегрирования системы дифференциальных уравнений привносят в ее решения ошибку, пропорциональную времени.

(АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ)

УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ

Аналогичным образом могут быть охарактеризованы процессы воспроизведения активной мощности при стендовых испытаниях с микропроцессорными средствами моделирования, в которых введена стабилизация только по отклонению (см. рис. 7 а, сплошная красная линия) или только по скорости изменения частоты (см. рис. 7 а, сплошная синяя линия).

Отличительной особенностью этих характеристик является быстрое затухание мгновенной погрешности и, как следствие, снижение ее среднеквадратичной величины в интервале времени от 1 до 4 с.

В остальных случаях (см. рис. 7 а, б) при введении стабилизации по производной напряжения и/или тока возбуждения следует безусловно признать достоверность моделей и эффективность микропроцессорных средств моделирования, поскольку среднеквадратичная относительная погрешность воспроизведения их переходных характеристик имеет приемлемое значение (не более 1,6%) и асимптотически стремится к нулю. Данный факт объясняется снижением амплитуды колебаний, при котором фазовое рассогласование становится несущественным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствована структурная схема стендовых испытаний в реальном времени устройств локальной и системной режимной автоматики с использованием микропроцессорных средств моделирования. Использованный подход и оптимизация

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРИВЕДЕННОЙ МГНОВЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ Є, (СПЛОШНАЯ СИНЯЯ ЛИНИЯ) ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МОЩНОСТИ И ЕЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ Е, (СПЛОШНАЯ КРАСНАЯ ЛИНИЯ) ПРИ К_{оu} = 16,6 Е.В.Н./Е.Н.С.



программных алгоритмов позволили повысить частоту дискретизации контролируемых управляющих сигналов до 1 кГц и выше.

Выполнена апробация и оценка эффективности микропроцессорных средств моделирования устройств противоаварийной автоматики. Для обоснования эффективности работы микропроцессорных средств моделирования предложена и обоснована мера оценки качества воспроизведения переходных процессов, определяемая среднеквадратичными значениями относительной приведенной погрешности.

Показано, что наиболее сложными режимами для воспроизведения являются режимы слабо демпфируемых колебаний ввиду интегрирования ошибки, обусловленной фазовой погрешностью.

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ 5, 6, 8 (А) И 2–4, 7, 9 (Б) ИЗ ТАБЛ. 1 С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ АРВ ПРИ ВАРИАЦИИ ЕГО НАСТРОЙКИ





ЛИТЕРАТУРА

- Богданов А.В., Попов М.Г. Исследование электрических процессов статических систем возбуждения синхронных машин//Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2 (спецвыпуск). С. 25–28.
- 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. 2015. № 12. С. 9–17.
- Гуриков О.В., Зеленин А.С., Штефка Й. Методика построения математических моделей микропроцессорных АРВ по экспериментально снятым частотным характеристикам//Известия НТЦ ЕЭС. 2016. № 75. С. 45–58.
- Елисеев Д.А., Зеленин А.С. Микропроцессорная система для моделирования устройств автоматического регулирования в составе физических моделей энергосистем//Известия НТЦ ЕЭС. 2018. № 79. С. 73–81.
- Захарова Е.В., Попов М.Г. Поисковые исследования структурных критериев статической устойчивости сложных объединенных энергосистем//Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 1 (537). С. 37–44.
- Зеленин А.С. Кузнецов В.Л., Попов М.Г. Разработка микропроцессорного испытательно-диагностического комплекса средств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем//Научнотехнические ведомости СПбГПУ, серия «Наука и образование». 2012. № 2–2 (147). С. 53–58.
- Попов М.Г., Базлов Д.А. и др. Особенности динамических свойств автономной микросети с источниками распределенной генерации //Релейная защита и автоматизация. 2020. № 1 (38). С. 26–31.
- Попов М.Г., Захарова Е.В. и др. Исследование статической устойчивости сложных объединенных энергосистем произвольной структуры//Электрические станции. 2015. № 11. С. 61-69.
- Попов М.Г. Исследование и выбор методов численного интегрирования жестких уравнений электромеханических переходных процессов электроэнергетических систем//Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. Т. 1. № 5. С. 89–93.

Ноябрь 2021





Открытый шахматный турнир энергетиков памяти **М.М. Ботвинника**

> **.** 2021

ШАХМАТНЫЙ ТУРНИР ЭНЕРГЕТИКОВ

Приглашаем команды энергетиков поддержать нашу добрую традицию и принять участие в ежегодном открытом шахматном турнире!

Состоится личное и командное первенство по правилам ФИДЕ для быстрых шахмат.

НАБИРАЙТЕ ЧЕТЫРЕХ ИГРОКОВ И регистрируйте команду на сайте турнира www.turnir.ntc-power.ru

