# Опыт применения программно-аппаратного комплекса RTDS для исследования функционирования устройств РЗА

На кафедре РЗиАЭс НИУ «МЭИ» в научно-образовательном центре «Надежность и эффективность РЗА, ПА и телекоммункаций в ИЭС ААС» установлен специализированный программно-аппаратный комплекс RTDS (Real-Time Digital Simulator), позволяющий выполнять исследования функционирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в реальном режиме времени. С его использованием была выполнена серия исследовательских работ по анализу функционирования автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), устройств синхронизированных векторных измерений (далее – PMU, phasor measurement unit), анализу электромагнитных переходных процессов реактированных линий электропередачи сверхвысокого напряжения, исследование технологических нарушений на кабельно-воздушных линиях 500 кВ, исследования новых алгоритмов РЗА для участка электрических сетей района «Сколково» и т.д. В настоящей статье описывается опыт применения RTDS для выполнения исследований функционирования реальных устройств АРВ и PMU.

**Авторы:**
Дьяков А.Ф.,
Максимов Б.К.,
Арцишевский Я.Л.,
Климова Т.Г.,
Расщепляев А.И.,
Волошин А.А.

## ПРИМЕНЕНИЕ RTDS ДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АРВ

При анализе функционирования автоматических регуляторов возбуждения решались следующие задачи:

- создание и верификация цифровых моделей реальных микропроцессорных устройств АРВ;
- оценка качества функционирования реальных устройств АРВ в соответствии требованиям Стандарта организации ОАО «СО ЕЭС» [1];
- оценка влияния структуры и параметров АРВ на параметры переходных процессов в ЭЭС;
- определение областей устойчивости по различным параметрам АРВ и оптимальной настройки регуляторов в различных схемно-режимных ситуациях и возможных аварийных условий.

Далее описывается опыт решения первых трех задач. Опыт определения оптимальной настройки АРВ требует специального описания и будет представлен в отдельной статье.

## СОЗДАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕАЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ АРВ

Для адекватного моделирования режимов работы электроэнергетической системы требуется разработка моделей реальных микропроцессорных устройств АРВ. Для создания цифровых моделей реальных микропроцессорных устройств АРВ необходима математическая модель микропроцессорного регулятора возбуждения, алгоритм работы которого описывается разностными уравнениями в дискретном времени. В математических моделях АРВ часто используется описание дифференциальными уравнениями в непрерывном времени. Цифровая реализация звеньев, входящих в состав регулятора, отличается от их аналогового представления, что вносит погрешность в цифровую модель АРВ. Поэтому возникает необходимость получения тождественной цифровой модели реальных микропроцессорных устройств АРВ на базе их математической модели. Указанная задача решается в три этапа:

- получение частотных характеристик АРВ (АЧХ, ФЧХ и АФХ);
- аппроксимация экспериментальных характеристик, т.е. получение по частотным характеристикам передаточных функций каналов;
- проверка правильности (верификация) полученной математической модели путем сравнения откликов на тестовые возмущения, возникающих в схемах с реальным устройством АРВ и в схемах с его цифровой моделью.

В настоящей статье все этапы получения цифровых моделей иллюстрируются на примере автоматического регулятора возбуждения типа AVR-3МТК [3].

При переходе к дискретному представлению алгоритмов регулирования происходит искажение частотных характеристик регуляторов, проявляется основное свойство частотных характеристик цифровых элементов – их периодичность. Возможны разные способы получения дискретных алгоритмов, при этом наибольшие проблемы возникают при создании алгоритмов дискретного дифференцирования. Из рис. 1 видно, что в микропроцессорной реализации используемый алгоритм расчета производной канала производной частоты напряжения имеет наибольшие искажения АЧХ, поэтому этот канал выбран для иллюстрации всех способов определения частотных характеристик.

Необходимые для определения математической модели АРВ частотные характеристики возможно получить разными способами.

По определению, для линейных систем АЧХ показывает, как изменяется амплитуда входного синусоидального сигнала при прохождении через исследуемое звено, изменение фазы при этом определяет ФЧХ звена. Отсюда следует первый способ экспериментального получения частотных характеристик [1]. На вход каждого канала подается синусоидальный сигнал с изменяющейся в диапазоне 0,1÷3 Гц частотой, амплитуда сигнала ограничивается требованием работы схемы АРВ и преобразователей напряжения и частоты в линейном режиме. Для этого используется сигнал напряжения или тока с модулированными соответствующим образом параметрами.

Применение ПАК RTDS позволяет сформировать непрерывную последовательность входных модулированных сигналов, что существенно ускоряет проведение эксперимента. Регулятор работает автономно. Результат определения АЧХ и ФЧХ и построенного по этим характеристикам АФХ для обоих каналов стабилизации показан красными маркерами «x» на рис. 2.

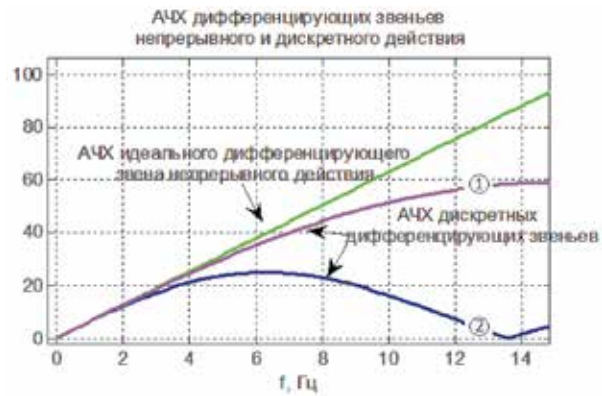


**Рис. 1.** АЧХ идеального дифференцирующего звена непрерывного и звеньев дифференцирования дискретного действия, (1) – дифференцирование в каналах производной напряжения и тока возбуждения, (2) – дифференцирование в канале производной частоты напряжения

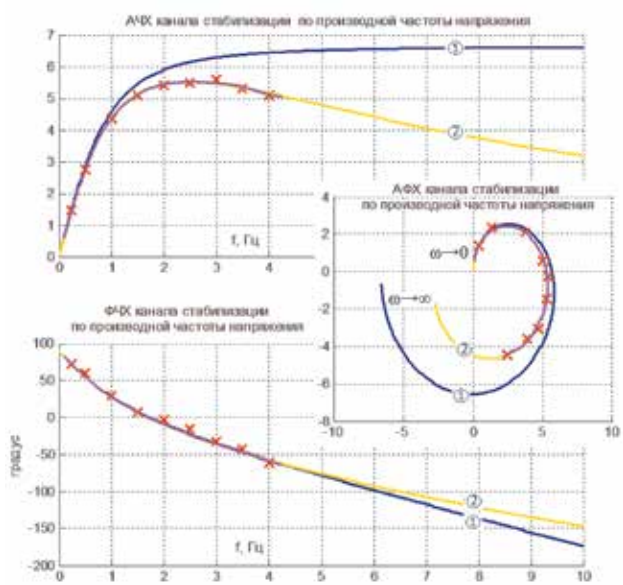


**Рис. 2.** Теоретические (1), экспериментальные и аппроксимированные (2) АЧХ, ФЧХ и АФХ канала стабилизации по производной частоты напряжения в линейном масштабе

Вычисление характеристик в каждой точке достаточно трудоемко. Использование ПАК RTDS позволяет применить более удобные способы получения частотных характеристик. Второй–четвертый способы получения частотных характеристик основаны на спектральном методе анализа линейных систем [5]. Указанные способы различаются условиями работы АРВ, возможностью модулирования входных сигналов и получения измерений откликов [6]. Результаты измерений частотных характеристик практически совпадают, отмечены одной линией (рис. 2, сплошная сиреневая линия).

Методы аппроксимации экспериментальных данных позволяют получить передаточные функции исследуемых каналов АРВ, дающие аппроксимированные частотные характеристики практически совпадающие с аналогичными экспериментальными. Пример такого совпадения показан на рис. 2.

**Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Расщепляев А.И., Волошин А.А.,**
ФБГОУ ВПО «НИУ «МЭИ» Кафедра релейной защиты и автоматизации энергосистем (РЗиАЭс).

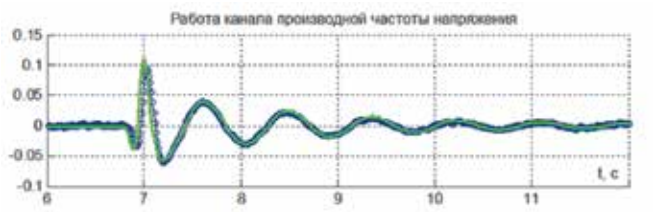


**Рис. 3.** Сравнение сигналов на выходе канала стабилизации по производной частоты напряжения (в) при использовании АРВ (синие кривые) и его RTDS модели (зеленые кривые)

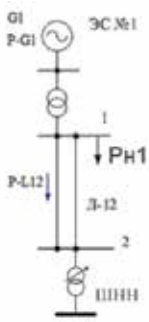


**Рис. 4.** Схема электрической сети, применяемой для оценки качества функционирования АРВ

Сопоставление работы АРВ и его цифровой модели проводится в замкнутой АСР при использовании тестовых сигналов. Наблюдается практически полное совпадение кривых (рис. 3).

Таким образом, результаты испытаний реального устройства АРВ с применением ПАК RTDS могут быть эффективно использованы для создания тождественных цифровых моделей реальных устройств АРВ, которые необходимы для адекватного моделирования режимов работы энергосистем.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АРВ

Анализ качества функционирования АРВ сильного действия синхронных генераторов осуществляется созданием схемно-режимных ситуаций и возмущений, определенных в [1]. Для иллюстрации анализа качества переходных процессов выбрано одно из тестовых возмущений – однофазное короткое замыкание длительностью 0,04 с на шинах электрической станции. Далее показывается возможность количественной оценки качества переходных процессов, характеризующих работу АРВ, при использовании цифровых осциллограмм, полученных при проверке функционирования АРВ [7]. Для иллюстрации возможностей оценки качества переходных процессов рассмотрен переток мощности по линии P-L12 в схеме рис. 4.

При проверке качества работы каналов стабилизации сертифицируемого АРВ необходимо сравнить параметры переходных процессов при включенных и выключенных каналах стабилизации.

Периодограмма показывает, что переходной процесс имеет одну доминирующую колебательную составляющую, независимо от подключения каналов стабилизации. При отключении каналов стабилизации частота колебательного процесса уменьшается, а амплитуда увеличивается.

При использовании корневого критерия оценки качества переходного процесса рассматривается расположение корней на комплексной гиперплоскости [8] (рис. 6). Колебательный процесс представляется вектором, начало которого определяется значениями действительной и мнимой частей корня характеристического уравнения, длина вектора пропорциональна амплитуде колебания, а наклон к горизонтальной оси характеризует его фазу. Дополнительно на плоскости отмечается допустимое минимальное значение действительной части комплексных корней (вертикальная линия $\alpha_{доп}$), определяющее время переходного процесса.

При проверке качества работы каналов стабилизации исследуемого устройства АРВ необходимо сравнить параметры переходных процессов при включенных и выключенных каналах стабилизации. Наглядное сравнение дает графическое представление параметров переходного процесса (рис. 7).

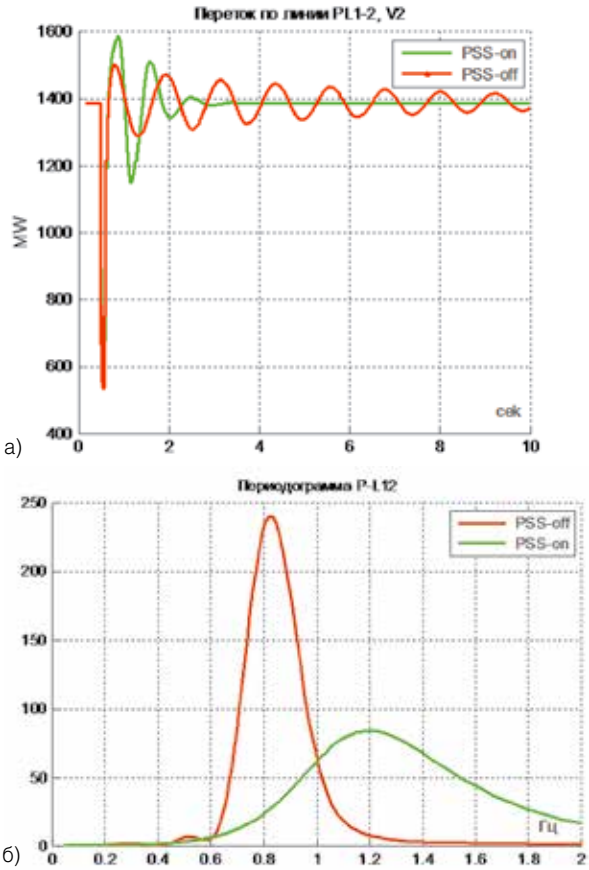


**Рис. 5.** Изменение перетока мощности по линии 1–2 при однофазном КЗ на шинах станции (а) и его периодограмма (б). Зеленая линия относится к процессу при введенных каналах стабилизации (здесь и далее – PSS_on), красная – к процессу при выведенных каналах стабилизации (PSS_off)

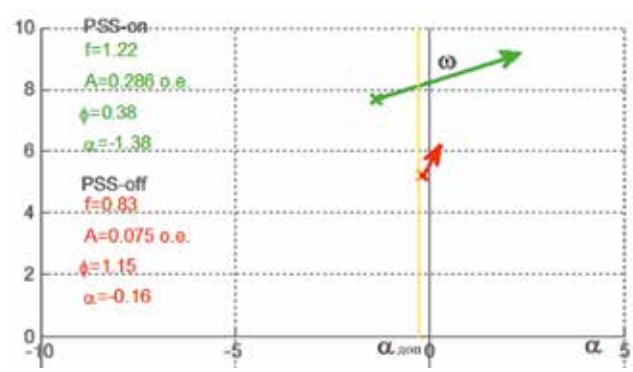


**Рис. 6.** Представление переходного процесса P-L12 при однофазном КЗ на шинах станции на плоскости с двумя системами координат

Для данной схемы и режима при включении каналов стабилизации с используемой настройкой регулятора при однофазном КЗ на шинах станции время переходного уменьшается в $kt \approx 8$ раз, логарифмический коэффициент демпфирования увеличивается в $kd \approx 6$ раз, следует отметить, что перерегулирование при выключенных каналах стабилизации меньше, чем при включенных, примерно в 2 раза ($k\sigma \approx 0{,}6$).

Результаты испытаний реальных устройств АРВ с использованием ПАК RTDS позволяют использовать специальные методы количественной оценки параметров качества переходных процессов, что в свою очередь позволяет проводить оптимальную настройку АРВ по заданным критериям качества переходных процессов.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ АРВ НА ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЭС

Одна из важных задач исследования функционирования автоматических регуляторов возбуждения – исследование влияния структуры и параметров АРВ на колебательные процессы, возникающие вследствие возмущений разного вида.

В качестве возмущения используется тестовый импульс $V$ – увеличение на 5 % уставки по напряжению, задаваемой в АРВ. Данное возмущение возникает внутри системы регулирования, его рассмотрение иллюстрирует создание колебаний, идущих из АСР. Параметры схемы (рис. 4) установлены в соответствии с [1].

Исследуется спектральный состав отклонения частоты напряжения на шинах генератора $G_1$ от номинального значения $\Delta fg(t) = fg(t) - 50$ при включенных и отключенных каналах стабилизации АРВ [3]. Рассматривается влияние коэффициентов преобразования каждого канала стабилизации на спектральные составляющие исследуемого режимного параметра. Параметры рабочего канала напряжения остаются неизменными при различных значениях коэффициентов каналов стабилизации (табл. 1).

При сопоставлении спектральных составляющих и соответствующих временных зависимостей видно, что уже при включении каналов производных напряжения и тока возбуждения существенно уменьшается мощность доминирующей колебательной составляющей (кривая (2), при этом ее частота практически не изменяется. Добавление каналов стабилизации отклонения частоты и производной частоты напряжения еще больше подавляет доминирующую частоту переходного процесса (кривая (3), при этом значение частоты уве-

**Таблица 1.** Значения коэффициентов каналов стабилизации для сигналов (рис. 4)

| | K1u | K1If | K0F | K1F |
|---|---|---|---|---|
| **Сигнал 1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Сигнал 2** | 3 | 2 | 0 | 0 |
| **Сигнал 3** | 3 | 2 | 5 | 5 |
| **Сигнал 4** | 3 | 2 | 15 | 0 |
| **Сигнал 5** | 3 | 2 | 0 | 15 |

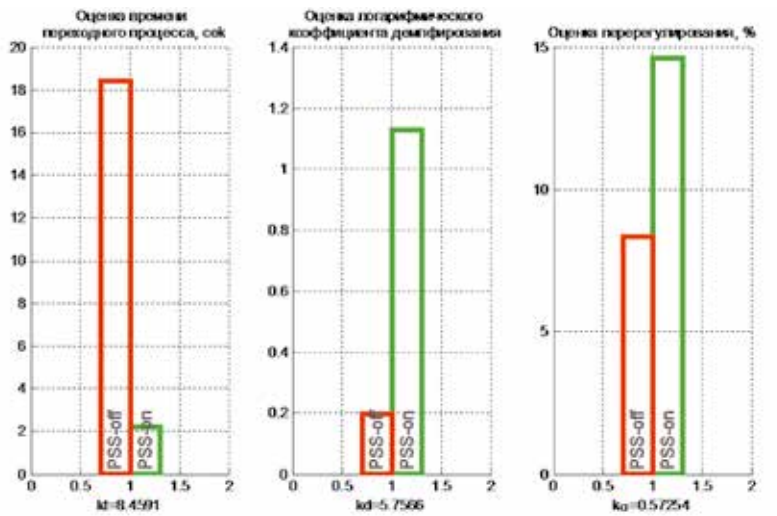


**Рис. 7.** Сравнение характеристик качества переходного процесса P-L12 при однофазном КЗ, диаграмма характеристик регулирования

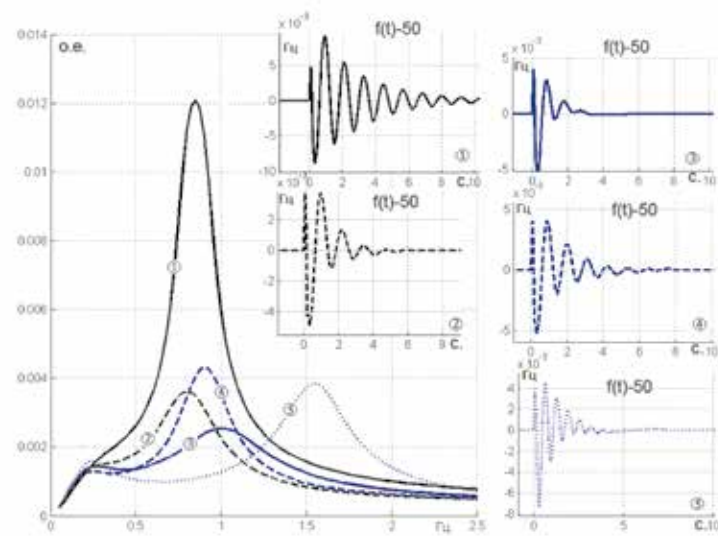


**Рис. 8.** Переходной процесс $\Delta fg(t)$ на шинах G1 (1)–(5) и его спектральное представление при возмущении $V$, коэффициенты $K0F$, $K1F=var$, коэффициенты $K1If$, $K1u$= const

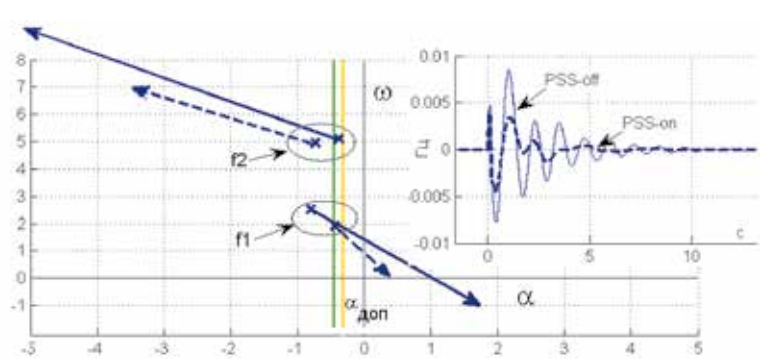


**Рис. 9.** Переходной процесс $\Delta fg(t)$ при возмущении $V1$ и его векторное представление при отключенных (сплошная линия) и включенных (пунктир) каналах стабилизации

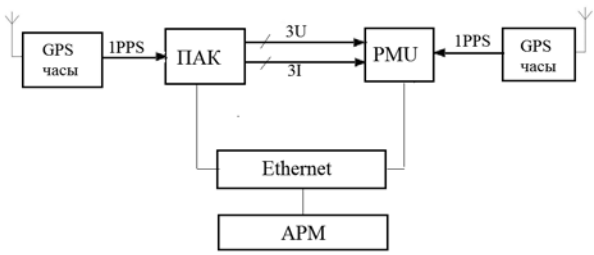


**Рис. 10.** Тестовая схема ПАК RTDSдля анализа функционирования устройств PMU

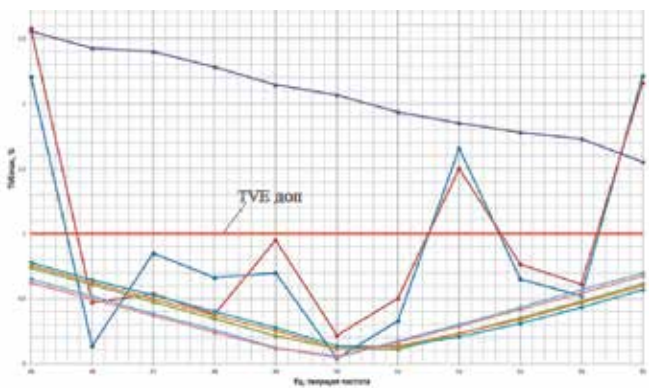


**Рис. 11.** Сопоставление результатов тестирования разных устройств PMU

личивается и проявляется более низкая частота. Чрезмерное увеличение коэффициента канала отклонения частоты напряжения практически не меняет значение частоты доминирующего колебания, но существенно повышает ее мощность (кривая (4). Чрезмерное увеличение коэффициента канала производной существенно меняет значение частоты доминирующего колебания и повышает ее мощность (кривая (5). Совместная установка значений $K_0F$=15 и $K_1F$=15 дает неустойчивое регулирование, возникает расходящееся колебание на доминирующей частоте. На рис. 9 показано векторное представление переходного процесса (3), возникшего при возмущении *V*.

Хорошо наблюдается влияние каналов стабилизации на параметры колебательных составляющих переходного процесса, в том числе и отрицательное влияние на показатель затухания низкочастотной составляющей $f_1$ переходного процесса. Время затухания колебательной моды $f_1$ увеличивается.

Применение ПАК RTDS совместно со специальными методами анализа результатов моделирования позволяет проводить глубокие исследования влияния различных каналов АРВ на переходные процессы.

## ПРИМЕНЕНИЕ RTDSДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ PMU

С целью определения соответствия измерительных характеристик PMU требованиям Стандарта IEEE C37.118.1 на кафедре РЗиАЭс была разработана методика сертификационных испытаний PMU и проведены тестовые испытания, которые позволили определить характеристики PMU в стационарных режимах и при динамических изменениях различных параметров входных сигналов.

Для испытаний PMU была собрана тестовая схема, изображенная на рис. 10, которая включает:

- моделирующий комплекс с устройствами ввода-вывода сигналов через цифровые интерфейсы и/или аналоговые усилители напряжения и тока (ПАК RTDS);
- источник(и) единого времени;
- автоматизированное рабочее место (АРМ) технолога;
- тестируемые устройства PMU;
- цифровой осциллограф с частотой дискретизации не менее 100 МГц и полосой пропускания не менее 60 МГц.

Анализ функционирования устройств PMU проводился для проверки погрешности измерений параметров режима в случаях:

- с отклонением значений сигналов тока и напряжения от номинальных значений;
- с линейным изменением частоты входных сигналов;
- со ступенчатым изменением параметров сигнала (амплитуды и фазы);
- с присутствующей в сигнале апериодической составляющей;
- с гармоническими и интергармоническими искажениями формы сигналов тока и напряжения.

Проверка характеристик PMU в переходных режимах производилась при следующих условиях:

- модуляции амплитуды сигнала;
- модуляции фазового угла;
- при линейном изменении частоты сигнала;
- при ступенчатом изменении амплитуды сигнала;
- при ступенчатом изменении фазового угла.

Соответствие характеристик PMU требованиям к точности в стационарных и переходных режимах оценивается путем сравнения значений амплитуды, фазового угла, частоты, скорости изменения частоты (ROCOF), измеренных посредством PMU, с соответствующими параметрами вектора, заданного цифровым симулятором (эталонным сигналом), путем определения суммарной векторной погрешности (TVE, totalvector error), ошибки измерения частоты (FE, frequency error) и ошибки скорости изменения частоты (RFE, rate of frequency error).

Суммарная векторная погрешность вычисляется в соответствии с формулой:

$$TVE = \sqrt{\frac{\left(X_r(n) - X_r\right)^2 + \left(X_i(n) - X_i\right)^2}{X_r^2 + X_i^2}},$$

где $X_r(n)$ и $X_i(n)$ – измеренные значения, переданные PMU, $X_r$ и $X_i$ – теоретические значения входного сигнала в момент при известных условиях $X_m$, $\omega$ и $\varphi$.

На рис. 11 показаны рассчитанные значения суммарной векторной погрешности в опыте изменения частоты, полученные в ходе проведения тестовых испытаний 8 устройств PMU разных производителей. Видно, что один PMU ни при каком значении частоты не удовлетворяет по точности требованиям Стандарта. Еще два PMU обеспечивают нужную точность не во всем диапазоне заданных частот. Остальные пять устройств в данном опыте полностью удовлетворяют требованиям Стандарта.

Исследования функционирования устройств PMU различных производителей, выполненный с использованием ПАК RTDS, позволил разработать специальную методику сертификационных испытаний. Кроме того, анализ функционирования устройств PMU показывает необходимость уточнения предъявляемых требований к погрешности измерения параметров режима, а также необходимость совершенствования устройств PMU ряда производителей для обеспечения возможности их применения в качестве технических средств для WAMPACS.

В заключении хотелось бы отметить, что само по себе наличие специальных моделирующих комплексов не может обеспечить гарантированное получение высоких научных результатов. Для

получения значимых научных результатов необходима соответствующая квалификация исполнителей. В связи с этим в рамках научно-образовательного центра «Надежность и эффективность РЗА, ПА и телекоммуникаций в ИЭС ААС» кафедры РЗиАЭс создается электронная площадка для организации взаимодействия инженеров и исследователей, применяющих различные моделирующие комплексы. Основная цель создания электронной площадки – организация обмена опытом применения различных моделирующих комплексов для решения задач РЗА, как в образовательном процессе, так и для выполнения научно-исследовательских работ. Указанный обмен опытом обеспечит переход исследований на качественно новый уровень и повысит мировой рейтинг публикаций российских исследователей в области электроэнергетики. Электронная площадка будет доступна по адресу www.mpei-rza.ru в декабре 2014 г. Вопросы и предложения по организации, и участию можно направлять на адрес voloshinaa@mpei.ru.

## ВЫВОДЫ

ПАК RTDS – высокоэффективный инструмент для выполнения исследований функционирования реальных устройств РЗА. Применение ПАК RTDS позволяет не только получить результаты моделирования работы электроэнергетических систем, но и разрабатывать новые методы для анализа функционирования реальных устройств РЗА.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012, дата утверждения 03.04.2012. «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов».

2. «Методические указания по устойчивости энергосистем» (утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277).

3. *Логинов А.Г., Фадеев А.В.* Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электросила». – Электротехника, 2001, 9.

4. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. – Высш. шк, 1985. – 536 с.

5. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М. Высшая школа, 2000. – 462 с.

6. *Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Жуков А.В., Сацук Е.И., Расщепляев А.И.* Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Получение и верификация моделей микропроцессорных АРВ, Энергетик, 2014, 1

7. *Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Жуков А.В., Сацук Е.И., Расщепляев А.И.* Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Оценка качества переходного процесса, Энергетик, 2013, 10

8. *Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Расщепляев А.И.* Представление переходных процессов электроэнергетических систем на гиперплоскости с двумя системами координат, Электричество. 2011, 4.

9. IEEE Std C37.118.1-2011. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.

«РТСофт» создает и внедряет:

- комплексные АСУТП
- системы телемеханики (ССПИ)
- системы РЗА
- решения для цифровых подстанций
- системы сбора неоперативной технологической информации (ССПТИ)
- центры управления группами подстанций (ЦУГП)
- тренажеры оперативного персонала

RTSoft
средства и системы автоматизации

105037, Москва, ул. Никитинская, д. 3
Тел.: (495) 967-15-05, факс: (495) 742-68-29
rtsoft@rtsoft.ru www.rtsoft.ru