

# ЭНЕРГЕТИК · 9 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ ЖУРНАЛ

**ПАРМА ВАФ-А(М) – умный универсальный  
цифровой вольтамперфазометр.**

**Лучший измерительный прибор своего класса.**

**Победитель конкурса «100 лучших товаров России»  
в номинации «Продукция производственно-технического назначения».**

**Главный инструмент энергетика, энергоаудитора,  
специалиста служб РЗА и ПАА.**



# ЭНЕРГЕТИК

85 лет с отечественной энергетикой

№ 9

сентябрь

2013 г.

Москва, НТФ «Энергопрогресс»

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ  
ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ОАО «ФСК ЕЭС»,  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ  
АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭК»,  
НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,  
ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОПРОФСОЮЗ,  
НП «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС»

Издаётся с июня 1928 г.

Редакционная коллегия:

А. Ф. ДЬЯКОВ  
(главный редактор)  
В. Е. АЗЕРНИКОВ  
Я. Л. АРЦИШЕВСКИЙ  
Б. А. АФАНАСЬЕВ  
И. И. БАТЮК  
Г. А. БЕЗЧАСТНОВ  
Е. И. БОРИСОВ  
И. С. ВАРТАЗАРОВ  
В. Н. ВАХРУШКИН  
Ю. А. ВИНЯРСКАЯ  
(зам. главного редактора)  
Ю. В. ВИХРЕВ  
В. И. ГУЩА  
В. Е. ДЕНИСОВ  
В. А. ДЖАНГИРОВ  
Л. М. ЕРЁМИН  
В. В. ЖУКОВ  
Ю. И. ЖУКОВ  
Е. Н. ИВАНОВ  
С. Ф. КОСИКОВСКИЙ  
В. П. КУЗИЧЕВ  
В. М. ЛИПОВСКИХ  
Ю. Я. ЛЮБАРСКИЙ  
Б. И. МЕХАНОШИН  
В. В. МОЛОДЮК  
И. А. НОВОЖИЛОВ  
Э. М. ПЕРМИНОВ  
В. И. РЕШЕТОВ  
Д. С. САВВАТОВ  
С. Л. СЛЯДНЕВ  
Ю. В. ТРОФИМОВ  
В. И. ТРЕМБОВЛЯ  
(зам. главного редактора)  
Э. М. ФАРХАДЗАДЕ  
М. И. ЧИЧИНСКИЙ  
Э. Н. ШАВРОВ  
Н. Г. ШУЛЬГИНОВ  
В. И. ЭДЕЛЬМАН

Журнал включён  
в Перечень ведущих рецензируемых  
научных журналов и изданий ВАК

АДРЕС РЕДАКЦИИ:  
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14  
Телефон (495) 675-19-06; факс (495) 234-74-21  
[www.energetik.energy-journals.ru](http://www.energetik.energy-journals.ru)  
E-mail: [energetick@mail.ru](mailto:energetick@mail.ru)

Редакторы отделов:

Л. А. Кочетова, Е. В. Ромашко  
Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Перепечатка, копирование материалов, опубликованных в журнале «Энергетик», допускается только с письменного разрешения редакции.

Сдано в набор 30.08.2013. Подписано в печать 20.09.2013. Формат 60×84 $\frac{1}{8}$ . Печать офсетная.  
Печ. л. 8,5. Заказ № 09-2013. Оригинал-макет выполнен издательством «Фолиум».  
Отпечатано типографией издательства «Фолиум»  
127411, Москва, Дмитровское ш., 157

## Содержание

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. Джангиров В. А., Леплюшкин Н. В., Маслов В. В. Применение электроэнергии в системах теплоснабжения в целях повышения их энергоэффективности . . . . .	2
СЕРТИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ. Харько В. В., Морозов А. М., Смирнова Е. В. Прикладные аспекты применения Технического регламента Таможенного союза «О безопасности низковольтного оборудования» в электроэнергетике . . . . .	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: создание тестовых схем . . . . .	12
Поправка к статье Туркина А. В., Христенко Е. Б., Келлера В. Д. «Сжигатели водорода с локализованным горением». Энергетик. 2013. № 8. С. 28 – 31 . . . . .	15
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ. Журавлев Д. М., Балашов О. В., Мураховец В. М. Анализ технических решений для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии у потребителей в электрической сети 0,4 кВ . . . . .	16
В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ. Иванов Н. В., Гуторов В. Ф. Об энергетических обследованиях, нормативно-технической документации по топливоиспользованию и нормированию удельных расходов топлива . . . . .	20
Харечко Ю. В. О необходимости пересмотра главы 1.7 Правил устройства электроустановок . . . . .	25
Поздравляем юбиляра. В. И. Решетов (к 75-летию со дня рождения)	27
НАДЁЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ. Буренко Л. А., Филиппова Е. М., Казакова В. А. Меры предупреждения производственного травматизма на энергетических объектах агропромышленного комплекса . . . . .	28
Шавров Э. Н. Роковой круиз. Трагедия на теплоходе «Александр Суворов» . . . . .	30
АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. Буяльский В. И. Метод повышения эффективности управления режимом работы ветротурбины . . . . .	34
К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ. Баркова Д. В. Модель управления энергоресурсами ТЭЦ на основе определения размера экономически выгодной партии поставки . . . . .	38
Антонов А. А., Гусев Ю. П. Влияние способов заземления экранов и взаимоиндукции пофазно-экранированных кабелей 6 – 35 кВ на токи двойных однофазных замыканий на землю . . . . .	42
Бобрик В. И., Чершова В. О. Определение критических напряжений питания двигательной нагрузки в режиме реального времени . . . . .	44
Тян Р. Л., Будовский В. П. Особенности режимных тренажёров диспетчера энергосистем, разработанных в России, Европе и США . . . . .	47

## ОБМЕН ОПЫТОМ

Кривченкова Е. А. Выбор ионообменных смол для эксплуатации в современных схемах обессоливания воды на ТЭС . . . . .	51
---	----

Соколов В. В. Температурный режим труб пароперегревателя газомазутных котлов СКД . . . . .	57
--	----

Новые разработки ВТИ . . . . .	60
--------------------------------	----

## ОБОРУДОВАНИЕ, УСЛУГИ

Сулимов Д. В. ПАРМА УАЧР 12 — современное устройство противоаварийной автоматики . . . . .	61
--	----

Высоковольтные выключатели. Ранняя диагностика неисправностей прибором ПКВ/М6Н . . . . .	62
--	----

Киреева Е. В., Василенко А. О. СЕ102М — универсально, выгодно, надёжно .	63
--	----

Якименко А. А., Абрамов Б. В. О реальной диагностике технического состояния крупных вращающихся машин . . . . .	64
---	----

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт

© НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2013 г.

# Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: создание тестовых схем

АРЦИШЕВСКИЙ Я. Л., КЛИМОВА Т. Г., кандидаты техн. наук  
НИУ МЭИ; 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14

TGKlim@mail.ru  
ЖУКОВ А. В., канд. техн. наук, САЦУК Е. И., доктор техн. наук  
РАСЩЕПЛЯЕВ А. И., магистр, ОАО «СО ЕЭС»

Рассмотрена возможность применения программно-аппаратного комплекса RTDS в целях реализации схем и режимов, необходимых для проведения сертификационных испытаний автоматических регуляторов возбуждения (APB) сильного действия согласно методике стандарта организации ОАО «СО ЕЭС» [1] (далее Стандарт). Показаны примеры составления тестовых схем, режимов и возмущений.

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс RTDS, автоматический регулятор возбуждения сильного действия, APB, сертификационные испытания.

Применение современных цифровых средств моделирования технических систем и процессов в электроэнергетике существенно расширяет возможности проведения различных исследований. В частности, появление цифровых систем моделирования сложных электроэнергетических систем в реальном времени позволяет осуществлять проверку функционирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в близких к реальным схемно-режимным условиям их работы в энергосистеме, обеспечивать стабильность режимных параметров при выполнении повторных экспериментов, что особенно важно для организации сертификационных испытаний устройств РЗА. В статье рассматривается использование программно-аппаратного комплекса (Real-Time Digital Simulator — RTDS) для проверки функционирования автоматических регуляторов возбуждения на соответствие требованиям Стандарта [1].

На рис. 1 представлен программно-аппаратный комплекс RTDS, установленный в Научно-образовательном центре «Надёжность и эффективность РЗ, ПА и телекоммуникаций в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивными сетями» (Кафедра Релейной защиты и автоматизации энергосистем НИУ МЭИ). Комплекс RTDS включает в себя:

- автоматизированное рабочее место программиста, подключённое к локальной сети Ethernet, с установленным на нём специальным пакетом программ RSCAD, позволяющим моделировать различные схемно-режимные ситуации, контролировать и управлять моделированием в темпе процесса;
- шкаф RTDS 1 (см. рис. 1), содержащий в своём составе вычислительные платы, платы дискретного и аналогово-

го ввода-вывода, а также различные интерфейсные платы;

- шкафы усилителей 2, предназначенные для усиления низкоуровневых аналоговых сигналов с платы цифро-аналогового преобразователя. Каждый шкаф содержит различный набор блоков усиления, формирующих входные сигналы тока и напряжения для тестируемых терминалов РЗА. Входные сигналы усиливаются до уровня, обеспечивающего нормальную работу терминалов. На рис. 1 также представлен терминал устричества APB синхронных генераторов 3.

В графическом редакторе RSCAD/Draft формируется силовая часть электрической схемы, задаются параметры элементов моделируемой системы, разрабатываются программные модели, формирующие сигналы управления и схемы, необходимые для реализации алгоритмов обработки информации. Эта часть комплекса размещается в шкафу RTDS 1 (см. рис. 1).

Исследования устройств APB проводились согласно методике [1], в которой предусмотрено создание 6 схем и 16 режимов. Пример исполнения одной из требуемых схем показан на рис. 2. Шины 2 (элемент 10) являются фиксированной точкой отсчёта при работе схемы, в этой точке формируется необходимое значение напряжения, которое характеризует систему неизменной мощности 11. На кафедре РЗиАЭС МЭИ разработано устройство сопряжения комплекса RTDS с общепромышленной сетью 0,4 кВ. С его помощью в качестве шин неизменной мощности можно применить шины электрической сети ОАО «Мосэнерго».

Окно управления (рис. 3) RSCAD/RunTime обеспечивает управление процессом моделирования в режиме реального времени, в том числе в целях изменения режимов работы оборудования, подачи тестовых сигналов, создания требуемых возмущений, замыканий, отключений основного оборудования и пр. Кроме того, окно RunTime позволяет наблюдать параметры текущего электрического режима (измерять напряжения, токи и пр.) и по-



Rис. 1. Комплекс RTDS и исследуемый APB

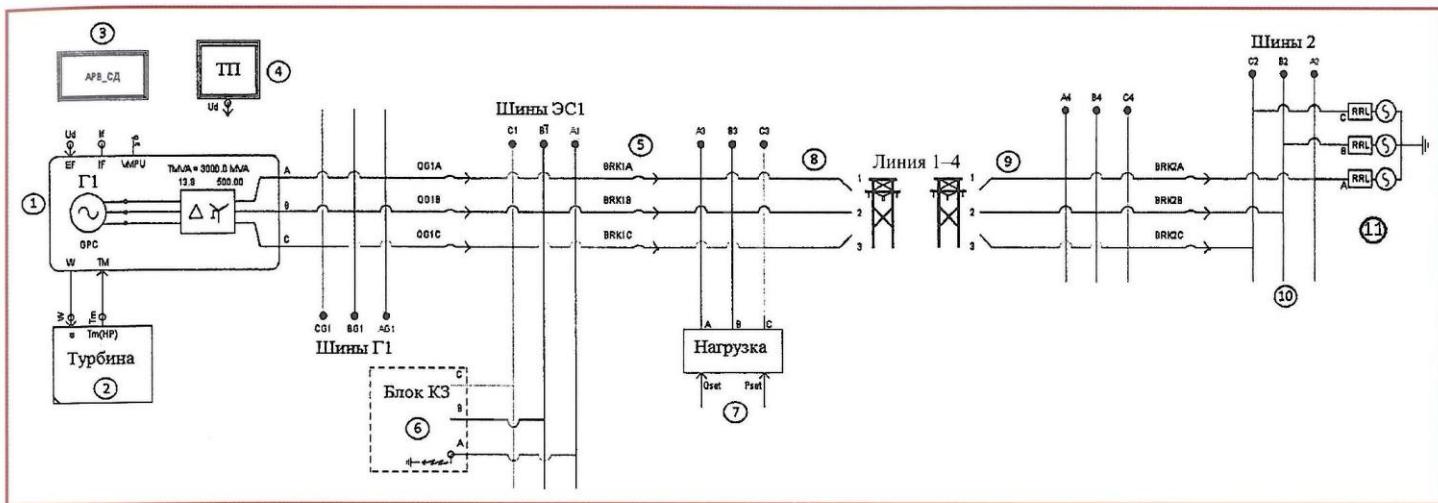


Рис. 2. Схема электроэнергетической системы:

1 — модель синхронного генератора совместно с трансформатором со схемой соединения обмоток  $Y-\Delta$ , который при необходимости может быть исключён; 2 — газовая турбина и её регулятор скорости; 3 — исследуемый АПВ; 4 — тиристорный преобразователь (ТП); 5 — выключатель; 6 — модель короткого замыкания; 7 — модель нагрузки, параметры которой могут динамически изменяться для поддержания мощностей  $P$  и  $Q$  на заданном уровне; 8, 9 — модель линий; 10, 11 — шины неизменной мощности

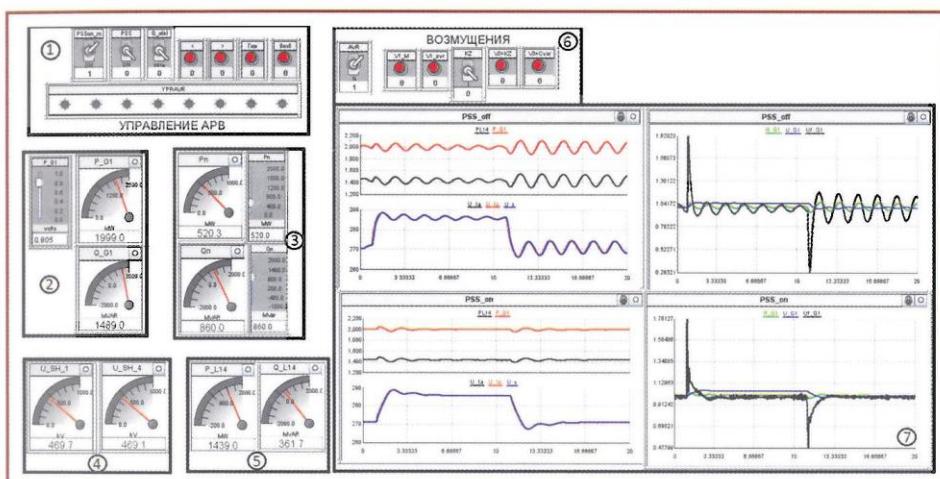


Рис. 3. Окно Ruin Time с элементами управления режимами, возмущениями и фиксирования результатов:

1 — блок сигналов, сформированных в программе для управления АПВ, используются тумблеры (сигналы постоянного значения) и кнопки (кратковременные сигналы); 2 — блок управления режимом работы генератора (слайдер управления механическим моментом) и измерения генерируемых мощностей; 3 — блок управления параметрами динамической нагрузки (слайдеры потребляемой активной и реактивной мощностей) и измерения указанных мощностей; 4 — блок измерения напряжения на шинах системы; 5 — блок измерения переходов мощностей в линии; 6 — блок управления сформированных программным образом возмущений и выбора АПВ (модельный или натурный); 7 — блок графического представления необходимой информации

лучать необходимые графические зависимости.

Элементы управления, контроля и регистрации (см. рис. 3) дают возможность создавать и измерять параметры всех необходимых режимов, требуемых методикой сертификационных испытаний Стандарта [1]. Воспроизведение тестовых и расчётных аварийных возмущений выполняется программным способом. Окно управления предназначено для обеспечения модели энергосистемы системой управления элементами (в целях создания нужного режима) и возмущениями, контроля и регистрации параметров электроэнергетического режима.

Проверка работы АПВ сильного действия синхронных генераторов осуществляется путём программной реализации следующих возмущений.

#### Тестовых:

- ступенчатое изменение уставки по напряжению сертифицируемого АПВ на  $\pm 5\%$  номинального значения;
- однофазное КЗ (длительностью 0,03 с) на шинах электрической станции № 1 — ЭС1 (см. рис. 2);
- ступенчатое изменение напряжения на шинах ЭС1 путём подключения ёмкости С3 к шинам ЭС1.

#### Нормативных [2]:

- длительность КЗ — 0,12 с;

- длительность бестоковой паузы однофазного АПВ (ОАПВ) — 1 с;
- длительность бестоковой паузы трёхфазного АПВ — 2 с;
- время отключения фазы (от устройства резервирования отказа выключателя) при отказе выключателя 0,35 с;
- запаздывание на ввод управляющего воздействия от противоаварийной автоматики (ПА) 0,4 с момента возникновения КЗ.

Для программной реализации необходимого возмущения требуется создание управляющих импульсов. Пример последних (реализация однофазного КЗ вблизи шин ЭС1 с успешным ОАПВ линии) представлен на рис. 4. Длительность импульса КЗ определяется необходимостью успешного ОАПВ линии, а длительность бестоковой паузы ОАПВ задана в [2]. Данные импульсы подаются на блок КЗ и выключатель (см. рис. 2),

Испытания проводятся для проверки:

- наличия статической колебательной устойчивости и стабилизации нормальных, ремонтных и послеаварийных режимов;
  - динамической устойчивости при расчётных и предельных аварийных возмущениях в энергосистеме;
  - правильности и эффективности работы АПВ с учётом действия системы ПА;
  - параметров настройки каналов стабилизации или системного стабилизатора;
  - отсутствия внутригрупповой неустойчивости.
- В документации комплекса RTDS и в тестовых примерах отсутствуют рекомендации для подключения АПВ, в данной реализации программного обеспечения предполагается только использование модельного АПВ. Поэтому при подключении АПВ были разработаны устройство сопряжения регуля-

Рис. 4. Управляющие импульсы при реализации однофазного КЗ вблизи шин ЭС1 с успешным ОАПВ линии

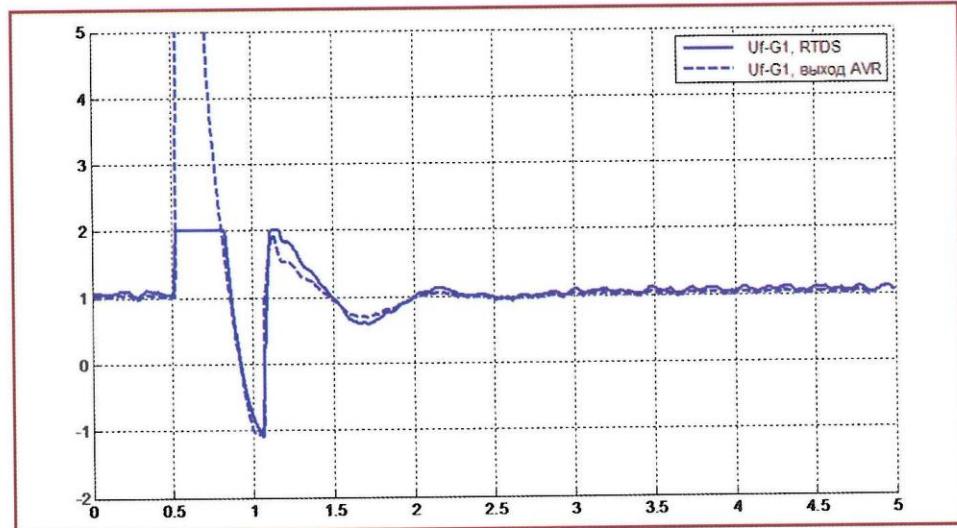


Рис. 5. Иллюстрация работы ТП системы возбуждения синхронного генератора

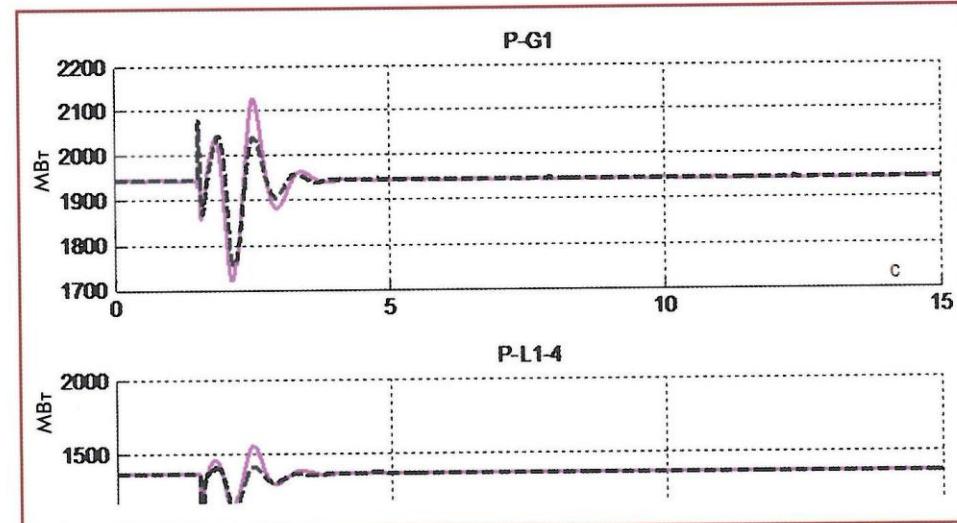


Рис. 6. Сравнение действий динамической (сплошная линия) и статической (пунктирная) нагрузок

тора с моделью ТП, управляемого стандартными шестью импульсами с выхода АРВ, и схема, преобразующая сигнал с выхода ТП в информационный сигнал, требуемый для управления моделью генератора.

Результат работы ТП представлен на рис. 5. Здесь пунктиром показан сигнал, формируемый АРВ сильного действия перед преобразованием его в импульсы управления ТП. В моделях этот сигнал после ограничения уровней подаётся на обмотку возбуждения модели генератора. Сплошной линией представлен соответствующий сигнал, полученный в модели комплекса RTDS. Следует отметить высокий процент совпадения оригинала и результата преобразования.

В комплексе RTDS имеется возможность моделирования различных комплексных нагрузок. Целесообразно выбрать модель нагрузки, удобную в управлении и максимально ухудшающую условия работы сертифицируемого оборудования. Действия различных нагрузок сравниваются при использовании тестового возмущения — однофазного КЗ (длительностью 0,03 с) на шинах ЭС1. При анализе различных нагрузок используются приведённые далее понятия.

**Динамическая нагрузка (ДН),** в терминах комплекса RTDS. В случае изменения напряжения в пределах  $(0,8 \div 1,2)U$  она потребляет фиксированную мощность, т. е. имеет изменяющееся сопротивление. При этом коэффициенты регулирующего эффекта по напряжению равны нулю [3], используется активная и реактивная ДН. **Статическая нагрузка (СН)** в терминах комплекса RTDS имеет фиксированное значение активного и реактивного сопротивлений, т. е. потребляемая мощность не остаётся постоянной при изменении напряжения и частоты, вследствие чего будет проявляться регулирующий эффект нагрузки.

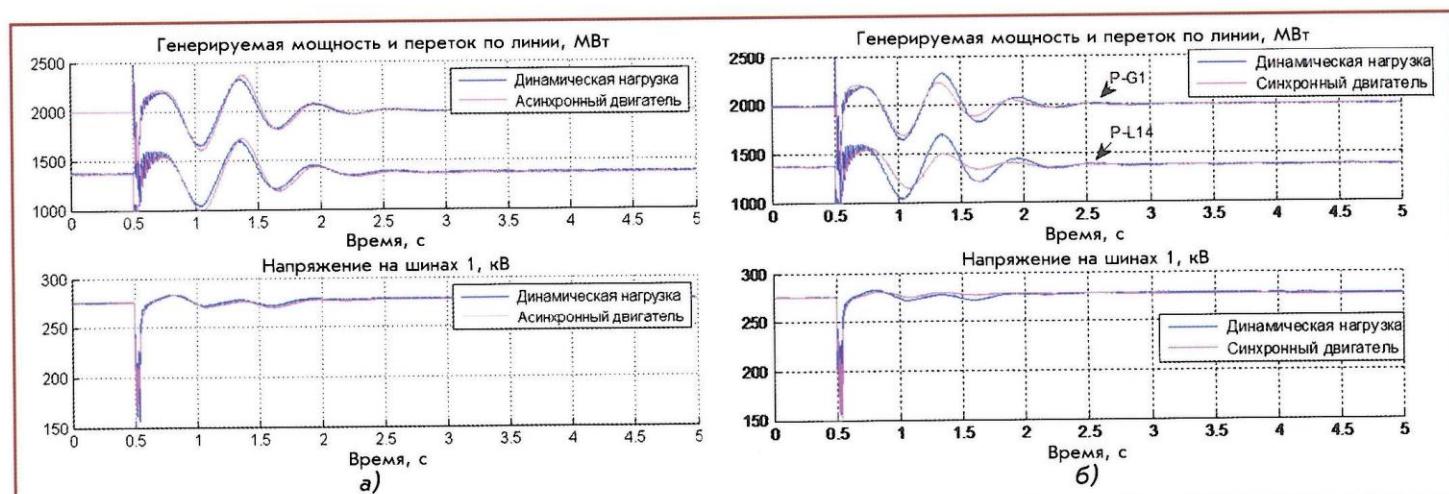


Рис. 7. Сравнение действий ДН и двигателей:  
а — асинхронного; б — синхронного

Нагрузка, относительный показатель	Наблюдаемый параметр		
	генерируемая мощность Р-Г1	переток по линии Р-Л1-4	
ДН	$g_{\text{ДН}}$ $t_{\text{п.п}} \approx 3/ \tau , \text{ с}$	1,5 1,7	1,17 2,06
СН	$g_{\text{СН}}$ $t_{\text{п.п}} \approx 3/ \tau , \text{ с}$	1,46 1,53	1,69 1,33
$g_{\text{ДН}}/g_{\text{СН}}$		1,03	0,69
$t_{\text{п.п.ДН}}/t_{\text{п.п.СН}}$		1,11	1,54

На рис. 6 показано различное влияние активных ДН и СН при включённых каналах стабилизации на генерируемую и передаваемую мощности. Рассматривается генерируемая мощность Р-Г1 (генератор Г1), переток по линии Р-Л1-4 (линия 1 – 4) при тестовом возмущении (однофазное КЗ на шинах 1, см. рис. 2).

В таблице приведены расчётные значения следующих параметров:

$g$  — логарифмический декремент затухания, показывающий во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за один период  $T$  [4]. Значение  $1/g$  определяет число периодов, после которого амплитуда уменьшается примерно на  $1/3$ ;

$t_{\text{п.п.}}$  — время переходного процесса, в течение которого свободные составляющие уменьшаются на 95 %. Процесс будет устойчив, если все корни характеристического уравнения имеют отрицательную действительную часть;

$t_{\text{п.п.}} \approx 3/|\tau|$  — постоянная времени затухания (где  $\tau$  — действительная часть

корня характеристического уравнения, ближайшего к мнимой оси комплексной плоскости корней).

Различия в действиях ДН и асинхронного двигателя — около 2 % (рис. 7, а). Использование ДН приводит к увеличению колебаний и уменьшению демпфирования переходных процессов по сравнению с аналогичными процессами, наблюдаемыми при использовании синхронного двигателя (рис. 7, б).

Все требуемые методикой стандарта [1] испытания проведены полностью. Способы регистрации необходимых параметров позволяют эффективно представить результаты и при их обработке получить числовые характеристики переходных процессов (время и логарифмический декремент затухания, пере-регулирование).

## Выводы

1. Программно-аппаратный комплекс RTDS позволяет проводить сертификационные испытания АРВ в объёме,

предусмотренном Стандартом ОАО «СО ЕЭС».

2. Программно-аппаратный комплекс RTDS обеспечивает моделирование схемно-режимных условий работы генерирующего оборудования в энергосистеме любой сложности для проверки функционирования АРВ, позволяет устранять имеющиеся недостатки регулятора алгоритмического или программного характера, а также настраивать АРВ для конкретного объекта генерации.

3. Способ регистрации переменных даёт возможность обрабатывать измерения для качественной и количественной оценки переходных процессов и наглядного представления информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 59012820.29.160.20.001—2012. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. — М.: ОАО «СО ЕЭС», 2012.

2. Методические указания по устойчивости энергосистем, утвержденные приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277.

3. Рагимов Э. В. Учёт изменений частоты в программах расчёта установившихся режимов электроэнергетической системы // Вестник МЭИ. 2013. № 1.

4. Литкенс И. В., Пуго В. И. Колебательные свойства электрических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 216 с.

## ПОПРАВКА

В статье Туркина А. В., Христенко Е. Б., Келлера В. Д. «Сжигатели водорода с локализованным горением», опубликованной в журнале «Энергетик» № 8 за 2013 г. на с. 28 – 31, произошло искажение рисунков 2, 3 и 4 на с. 30. Ниже приведены корректные рисунки.

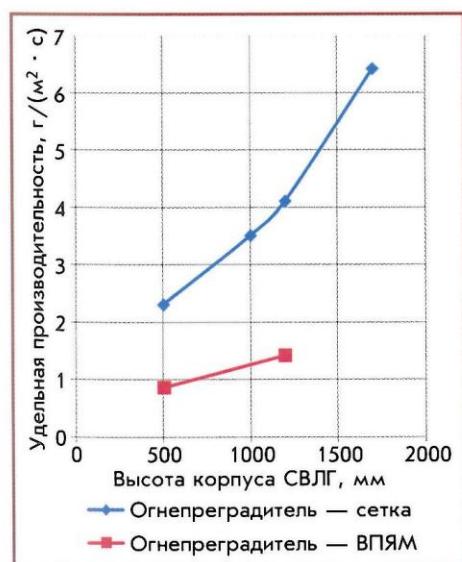


Рис. 2. Зависимость удельной производительности СВЛГ с корпусом диаметром 200 мм при объёмной концентрации водорода 8 %, атмосферном давлении и комнатной температуре от высоты корпуса и типа огнепреградителя

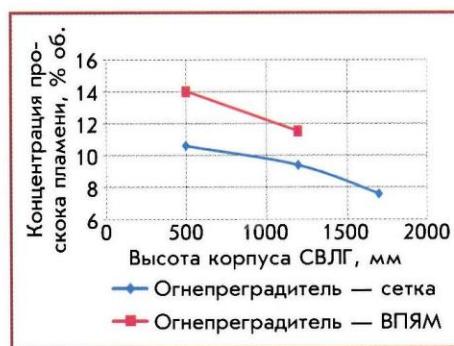


Рис. 3. Зависимость концентрации проскала пламени от высоты корпуса для СВЛГ диаметром 200 мм с одним слоем огнепреградителя на входе и на выходе

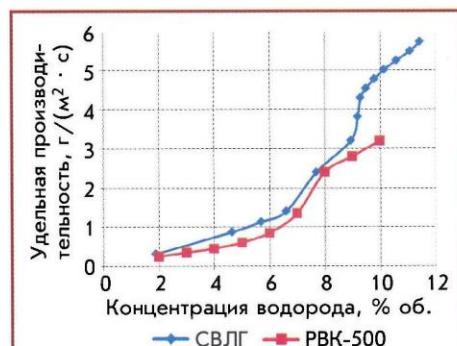


Рис. 4. Удельная производительность СВЛГ и РВК-500