



# ЭНЕРГЕТИК · 10

2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ ЖУРНАЛ

- СИСТЕМЫ СМПР/WAMS "ПОД КЛЮЧ"
- СИСТЕМЫ РАС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
- НОВЫЙ РЕГИСТРАТОР ПАРМА РП 4.11



# ЭНЕРГЕТИК

85 ЛЕТ С ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ

№ 10      октябрь

2013 г.

Москва, НТФ «Энергопрогресс»

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ  
ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ОАО «ФСК ЕЭС»,  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ  
АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭС»,  
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. БАТОК  
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. САВВАИТОВ  
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 30.09.2013. Подписано в печать 20.10.2013. Формат 60×84 $\frac{1}{8}$ . Печать офсетная.  
Печ. л. 8,25. Заказ №10-2013. Оригинал-макет выполнен издательством «Фолиум».  
Отпечатано типографией издательства «Фолиум»  
127411, Москва, Дмитровское ш., 157

## Содержание

ОСНОВЫ НАДЁЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ. Молодюк В. В., Баринов В. В., Исамухамедов Я. Ш. Предложения по развитию методики среднесрочного прогнозирования спроса на электроэнергию (во взаимосвязи с индикаторами социально-экономического развития страны и регионов) для разработки схемы и программы развития ЕЭС России . . . . .	2
Григорьев А. В. Есть ли экономический смысл в диагностическом обслуживании оборудования электростанций? . . . . .	6
Назолин А. Л., Поляков В. И. Надёжность электроэнергетики. Повышение живучести и продление срока службы турбогенераторов методами режимной оптимизации . . . . .	8
Поздравляем юбиляра Ю. Г. Шакаряна (к 80-летию со дня рождения)	13
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЗА. 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 . . . . .	14
В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ. Байбаков С. А. Оценка эффективности применения компрессорных тепловых насосов в схемах теплофикационных установок турбин	17
Поздравляем юбиляра В. В. Молодюк (к 70-летию со дня рождения)	25
ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ. Вихрев Ю. В. Повышение эффективности новых буроугольных энергоблоков . . . . .	26
Виницкий Ю. Д., Лобзин Л. А., Кузнецов А. М., Вольхин А. С., Айджанов А. А. Оценка технического состояния турбогенератора без выемки ротора из статора	29
К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ. Молодюк К. В. Разработка методики повышения эффективности работы предприятий энергетического машиностроения . . . . .	33
ПОЗДРАВЛЯЕМ С ВЕКОВЫМ ЮБИЛЕЕМ! Джангиров В. А. Ветеран Партизанской ГРЭС Давыд Ефимович Щирый отметил 100-летний юбилей. . . . .	36
РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ. Рябова А. Е., Арцишевский Я. Л. Релейная защита и автоматика выделения участка сети с ГТУ-ТЭЦ . . . . .	37
Давыдова Н. К., Тёмкина Р. В. Виртуальные лабораторные работы по изучению микропроцессорной дифференциальной защиты трансформатора в различных режимах электросети . . . . .	39
Евсюков И. А., Жуков В. В. Особенности пуска «с нуля» энергоблока ПГУ-450	42
Белова О. С., Темников А. Г., Черненский Л. Л. Исследование спектральных характеристик разряда из искусственного облака заряженного водного аэрозоля .	42
Воробьёв С. В., Гусенков А. В. Применение грозотросов из полимерных материалов с повышенной электропроводностью . . . . .	43
Герастенок Т. К., Темников А. Г. Исследование механизмов формирования восходящего лидера как стадии поражения молнией наземных объектов . . . . .	44
<b>В ПОМОЩЬ ПРОЕКТИРОВЩИКУ</b>	
Дмитриев М. В., Шескин Е. Б. Проблемы отключения реактированных линий 330 – 750 кВ элегазовыми выключателями . . . . .	46
<b>ОБМЕН ОПЫТОМ</b>	
Кудинов А. А., Усов С. В. Повышение эффективности работы Сызранской ТЭЦ за счёт использования детандер-генераторной установки . . . . .	51
Жигунов В. В. Рекомендации по настройке регуляторов уровня и исследование их динамических свойств . . . . .	54
Новые разработки ВТИ . . . . .	60
<b>ОБОРУДОВАНИЕ И УСЛУГИ</b>	
Беспалова А. Средства индивидуальной защиты рук . . . . .	61
Высокоточные многофункциональные измерительные преобразователи Т400	62
Приборы СКБ ЭП: передовые технологии на службе энергетиков России . . . . .	64
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт	

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЗА

## Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: оценка качества переходного процесса

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 (Real-Time Digital Simulator — RTDS) для оценки качества процесса регулирования автоматическими регуляторами возбуждения (APB) при различных возмущениях, предложены способы наглядного представления параметров процесса регулирования.

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс RTDS, регулятор возбуждения сильного действия, качество процесса регулирования, время регулирования, колебательность, перерегулирование.

Появление различных цифровых средств моделирования сложных электроэнергетических систем (ЭЭС) в реальном времени позволяет проводить испытания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в различных схемно-режимных ситуациях, близких к реальным. В работе [1] показана возможность использования комплекса RTDS в целях реализации схем и возмущающих воздействий, необходимых для проверки функционирования APB на соответствие требованиям стандарта организации ОАО «СО ЕЭС» [2] (далее Стандарта).

В данной статье рассматривается возможность количественной оценки качества переходных процессов, характеризующих работу APB, при использовании цифровых осциллографов.

Функционирование APB сильного действия синхронных генераторов проверяется созданием схемно-режимных ситуаций и возмущений, определённых в [2]. Для иллюстрации анализа качества переходных процессов выбраны два тестовых возмущения:

- ступенчатое изменение уставки по напряжению сертифицируемого APB на  $\pm 5\%$  номинального значения, возмущение V1;
- однофазное короткое замыкание (КЗ) длительностью 0,04 с на шинах электрической станции ЭС1, возмущение V2 [1, 2].

Пример получения данных о выбранных режимных параметрах и измерительные приборы, формирующие ин-

формацию о текущем изменении параметра, показаны на рис. 1. Алгоритм измерения значений выбранного параметра задан в комплексе RTDS пакетом программ RSCAD, имеется возможность использования собственных измерительных алгоритмов. Для количественного анализа качества переходных процессов требуемые режимные параметры записываются в виде цифровых осциллограмм в заданном окне наблюдения.

Для иллюстрации возможностей оценки качества переходных процессов рассмотрены режимные параметры: генерируемая мощность P-G генератора Г1 (рис. 2), переток мощности по линиям P-L12 и напряжение на шинах 1 станции ЭС1 при двух тестовых возмущениях. Одно из них создаётся внутри исследуемого APB (V1), второе — внешнее, возникает вне исследуемого устройства (V2). Подробно представлен анализ влияния возмущения на переток по линиям P-L12.

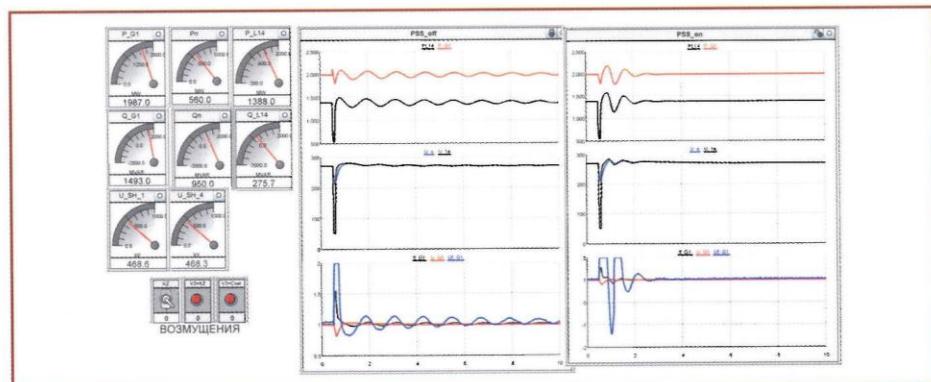


Рис. 1. Фрагмент управляющего окна комплекса RTDS, пример представления информации о переходных процессах

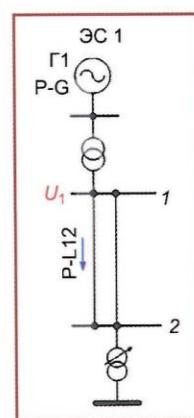


Рис. 2. Тестовая схема [1]

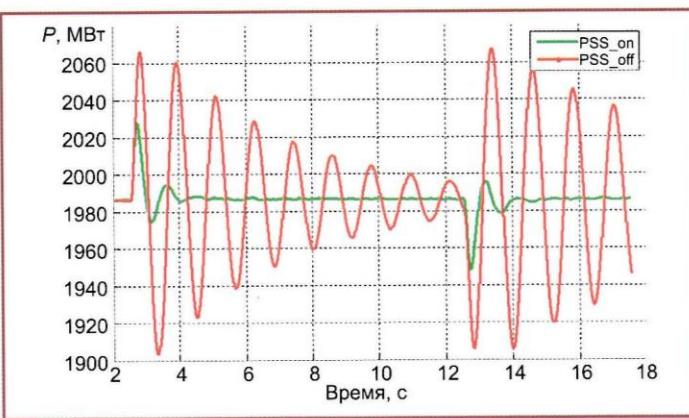


Рис. 3. Изменение перетока мощности по линии 1 – 2 в случае скачкообразного изменения уставки по напряжению сертифицируемого APB при возмущении V1

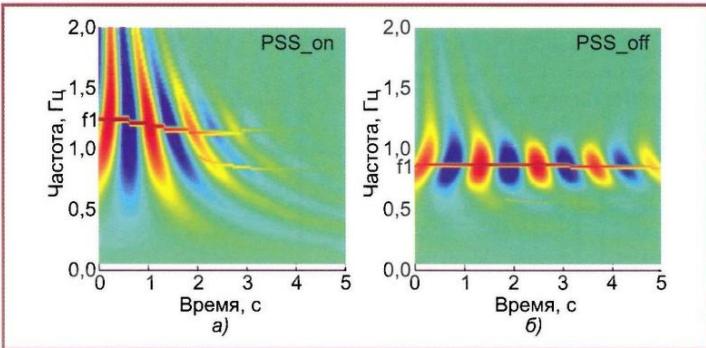


Рис. 4. Действительная составляющая волнового спектра перетока мощности по линии P-L12 при включённых PSS\_on (а) и выключенных PSS\_off (б) каналах оптимизации, время отсчитывается от момента возмущения

На рис. 3 показано изменение перетока мощности по линиям 1 – 2 при скачкообразном изменении уставки по напряжению сертифицируемого АРВ при возмущении V1. Сплошная зелёная линия относится к процессу при введенных каналах стабилизации PSS\_on, красная — при выведенных PSS\_off. Исследование волнового спектра сигналов позволяет определить количество и оценить параметры колебательных составляющих переходного процесса. Апериодическая составляющая вычисляется отдельно.

На рис. 4 представлены проекции в осях времени и частоты действительных

частей волновых спектров перетоков мощности по линиям Р-L12 при включенных (рис. 4, а) и выключенных (рис. 4, б) каналах стабилизации. В выбранных проекциях в каждый момент времени виден частотный состав переходных процессов. Колебательные составляющие отмечаются различной цветовой гаммой. Интенсивность цвета определяется мощностью составляющей. Максимальные и минимальные точки колебаний, соответствующие амплитудным значениям частотной составляющей, соединены линиями. В проекциях видна длительность и мощность каждой составляющей.

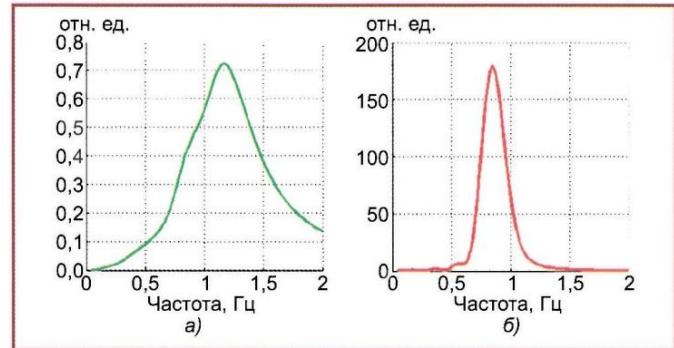


Рис. 5. Периодограммы волнового спектра перетока мощности по линии P-L12 при введенных (а) и выведенных (б) каналах стабилизации

В переходном процессе при включённых каналах стабилизации (см. рис. 4, а) отмечается одна мощная составляющая с частотой  $f_1$  и длительностью около 3 с. Следует отметить, что линия максимумов не горизонтальна, что связано с изменяющейся во времени частотой колебания. Вторая линия максимумов возникает на второй секунде, она существенно слабее первой и практически не влияет на качество переходного процесса. При выключенных каналах стабилизации (см. рис. 4, б) отмечается одна мощная составляющая с меньшей частотой  $f_1$  и несколько очень слабых колебаний.

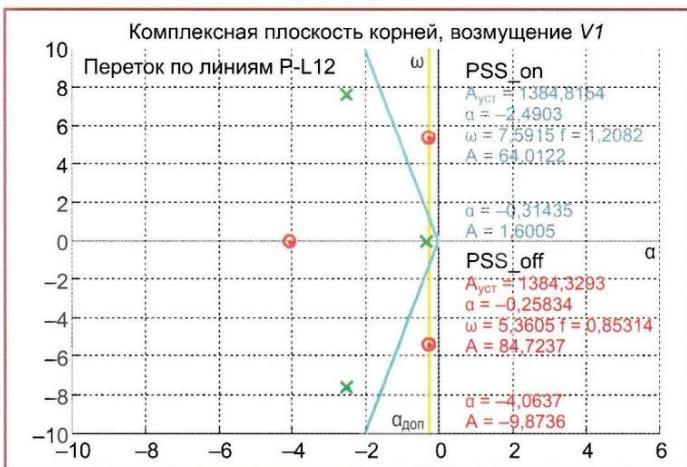


Рис. 6. Комплексная плоскость корней для переходного процесса, включающего в себя апериодическую и одну переменную колебательную составляющую:

$A$  — амплитуда колебательной составляющей переходного процесса, МВт;  $\alpha$  — действительная часть комплексного корня характеристического уравнения, определяющая затухание колебательной составляющей,  $1/\text{с}$ ;  $\omega$  — мнимая часть комплексного корня характеристического уравнения, определяющая колебательность процесса,  $\text{рад}/\text{с}$

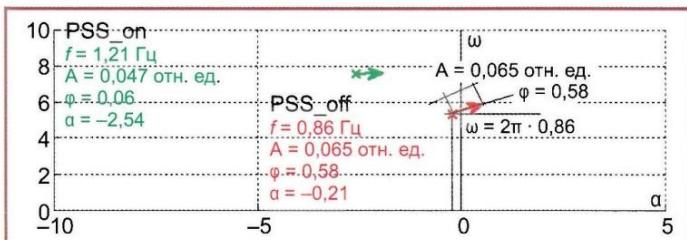


Рис. 7. Гипервекторное представление переходного процесса на линии P-L12 при возмущении V1

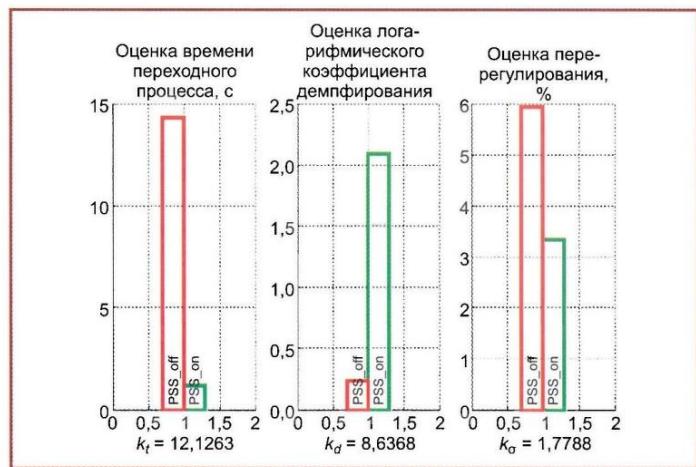


Рис. 8. Сравнение характеристик качества переходного процесса на линии P-L12 при возмущении V1, диаграммы характеристик регулирования

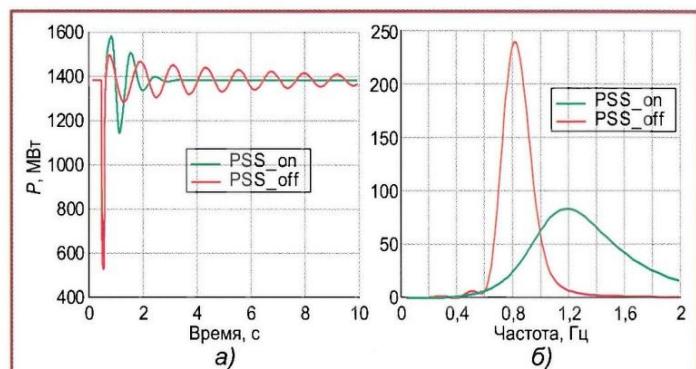


Рис. 9. Изменение перетока мощности по линии I – 2 в случае однополюсного КЗ на шинах станции при возмущении V2 (а) и его периодограмма Р-L12 (б)

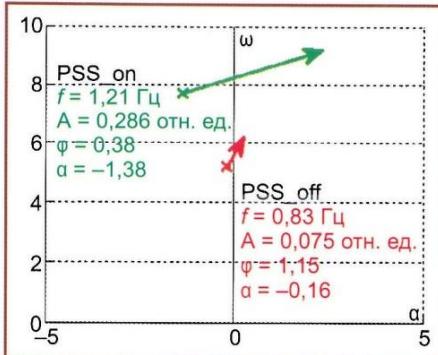


Рис. 10. Гипервекторное представление переходного процесса на линии P-L12 при возмущении V2

Основная составляющая длится более 5 с (больше наблюдаемого окна).

При суммировании мощности колебаний по времени наблюдения формируется склейограмма (по вертикальной оси откладывается значение пропорциональной мощности с одинаковым весовым коэффициентом в обоих случаях), на которой также отмечается состав переходного процесса (рис. 5). Ширина и высота пика отражают распределение мощности по частоте. Колебательный процесс при отсутствии каналов стабилизации существенно более мощный, чем при их включении, что соответствует виду переходных процессов на рис. 3. Видно, что исследуемый переходной процесс в обоих случаях может быть представлен одной колебательной составляющей.

При использовании корневого критерия оценки качества переходного процесса обычно рассматривается расположение корней на комплексной плоскости (рис. 6). На ней отмечается допустимое минимальное значение действительной части комплексных корней (вертикальная линия  $\alpha_{\text{доп}}$ ), характеризующее время переходного процесса, в течение которого его доминирующая составляющая уменьшается на 95 %.

Колебательность переходного процесса определяется отношением действительной и мнимой частей корней, допустимое значение отношения отмечается лучами на плоскости корней. Колебательность процесса характеризуется логарифмическим декрементом затухания  $g$ . Параметр  $g$  показывает во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за один период  $T$  [3]. Показатель  $1/g$  определяет число периодов, в течение которого амплитуда уменьшится в  $e$  раз, т. е. примерно на треть первоначального значения. Параметры перерегулирования (максимального отклонения от установленного значения) на плоскости корней не фиксируются.

Данное представление не даёт полного описания колебательного процесса из-за отсутствия информации об его амплитуде и фазе. Для полного изображения процесса необходимо использовать его гипервекторное представление [4] (рис. 7). Колебательный процесс описывается вектором, начало которого определяется значениями действительной  $\alpha$  и

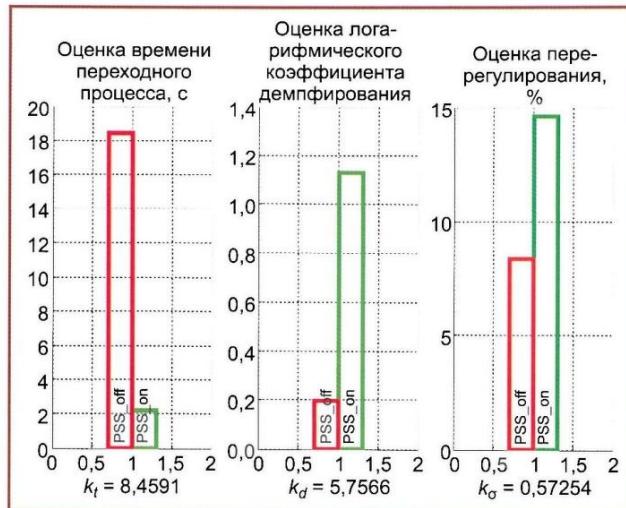


Рис. 11. Сравнение характеристик качества переходного процесса P-L12 при возмущении V2, диаграммы характеристики регулирования

## Выводы

1. Рассмотрено несколько способов представления информации о параметрах переходных процессов и сопоставления результатов проведённых испытаний. Установлено, что наиболее информативно — использование гипервекторного представления и сравнительной диаграммы, отражающих влияние разных параметров и возмущений на характеристики качества процесса регулирования.

2. Показано, что при испытаниях АРВ полученные характеристики качества регулирования при включённых и выключенных каналах стабилизации наиболее информативно представляются на сравнительной диаграмме параметров процесса регулирования.

3. Способы регистрации требуемых режимных параметров позволяют получить массивы данных, удобных для обработки, необходимой в целях получения числовых характеристик переходных процессов и наглядного их представления.

4. Сравнительный анализ параметров переходных процессов при разных возмущениях даёт возможность определить наиболее опасные виды возмущений и точки их приложения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: создание тестовых схем / Я. Л. Арцишевский, Т. Г. Климова, А. В. Жуков и др. // Энергетик. 2013. № 9.

2. СТО 5901280.29.160.20.001—2012. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. — М.: ОАО «СО ЕЭС», 2012.

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

4. Арцишевский Я. Л., Климова Т. Г., Расщепляев А. И. Представление переходных процессов электроэнергетических систем на гиперплоскости с двумя системами координат // Электричество. 2011. № 4.

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