

ЭНЕРГЕТИК · 6

2014

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ ЖУРНАЛ



**Энергоэффективная секция воздушного конденсатора.
Площадка ОАО "ВТИ", Москва**



ЗАО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ВНЕДРЕНЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ТУРБОКОН

<http://www.turboconkaluga.ru>

ОАО "ВСЕРОССИЙСКИЙ ДВАЖДЫ ОРДENA ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ"

ВТИ

<http://www.vti.ru>



ЭНЕРГЕТИК

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ
ЖУРНАЛ
УЧРЕДИТЕЛИ:
МИНЭНЕРГО РОССИИ, ОАО «ФСК ЕЭС»,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ
АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭСК»,
НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,
ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОПРОФСОЮЗ,
НП «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС»

№ 6 ИЮНЬ 2014 г.

Москва, НТФ «Энергопрогресс»

Издаётся с июня 1928 г.

Редакционная коллегия:

А. Ф. ДЬЯКОВ, член-корр. РАН,
д. т. н., проф. (главный редактор)
Е. В. АМЕТИСТОВ,
член-корр. РАН, д. т. н., проф.
Я. Л. АРЦИШЕВСКИЙ, к. т. н.
Б. А. АФАНАСЬЕВ
И. И. БАТЮК
Б.-Э. БАЯР, к. т. н. (Монголия)
Г. А. БЕЗЧАСТНОВ
Е. И. БОРИСОВ, д. т. н., проф.
П. А. БУТЫРИН, член-корр. РАН,
д. т. н., проф.
И. С. ВАРТАЗАРОВ, к. т. н.
Ю. А. ВИНЯРСКАЯ
(зам. главного редактора)
Ю. В. ВИХРЕВ, к. т. н.
В. И. ГУЦА
В. А. ДЖАНГИРОВ, к. э. н.
Л. М. ЕРЁМИН
В. В. ЖУКОВ, д. т. н., проф.
Ю. И. ЖУКОВ, к. т. н.
Е. Н. ИВАНОВ, к. т. н.
М. КОЛЦУН, к. т. н., проф.
(Словакская Республика)
В. П. КУЗИЧЕВ
В. М. ЛИПОВСКИХ
Б. К. МАКСИМОВ, д. т. н., проф.
В. М. МОЛОДНОК, д. т. н., проф.
В. Г. НИКОЛАЕВ, д. т. н.
И. А. НОВОЖИЛОВ
Э. М. ПЕРМИНОВ, к. т. н.
Н. Д. РОГАЛЕВ, д. т. н., проф.
С. Л. СЛЯДНЕВ
В. И. ТРЕМБОВЛЯ
(зам. главного редактора)
Э. М. ФАРХАДЗАДЕ, д. т. н., проф.
(Азербайджанская Республика)
Э. Н. ШАВРОВ
Н. Г. ШУЛЬГИНОВ, к. т. н.
В. И. ЭДЕЛЬМАН, д. э. н., проф.

Журнал включён

в Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов и изданий ВАК

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
115200, Москва, ул. Автозаводская, 14
Телефон (495) 675-19-06; факс (495) 234-74-21
www.energetik.energy-journals.ru
E-mail: 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 28.05.2014. Подписано в печать 16.05.2014. Формат 60×84 $\frac{1}{3}$. Печать офсетная.
Печ. л. 7,5. Заказ №/06-2014. Оригинал-макет выполнен издательством «Фолиум». Отпечатано типографией издательства «Фолиум» 127411, Москва, Дмитровское ш., 157

Содержание

В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ. Курский А. С., Калыгин В. В. Региональная энергетика и атомная теплофикация	3
Неуимин В. М. Характерные режимы эксплуатации теплофикационной паротурбинной установки. Особенности терминологии	7
БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА. Красных А. А., Казаковцев В. В., Суслов Е. А. Стационарные сигнализаторы напряжения	10
ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. Слободян С. М. Коагуляция контакта вакуумного выключателя	13
Цытович Л. И., Дудкин М. М., Рахматуллин Р. М., Брылина О. Г., Тюгаев А. В. Помехоустойчивая интегрирующая синхронизация ведомых сетью вентильных преобразователей	15
Шаварин Н. И., Волков И. В., Семёнов Д. А. Микропроцессорная система АВР с явным резервированием трансформаторов собственных нужд на подстанциях и электростанциях	18
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: влияние структуры и параметров АРВ на колебательные свойства АСР	21
Поправка к статье Петрова Ю. В., Саломасова Ю. М., Грузного А. В., Галлускина В. Б., Серанта Ф. А., Каравишвили А. Р. «Опыт Подольского машиностроительного завода (ЗиО) по глубокой модернизации котельного оборудования сверхкритического давления на энергоблоках мощностью 300 и 500 МВт». Энергетик. 2014. № 5. с. 55 – 62	25
ЗАРУБЕЖНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. Вихрев Ю. В. О путях развития ТЭС в Европе	26
Саламов А. А. Яйванская ГПУ	27
К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ. Гатагова С. В., Гассиева О. И. Экономическая целесообразность строительства малых гидроэлектростанций в целях снижения величины тарифа на электроэнергию на примере Республики Северная Осетия – Алания	29
Дёмин Ю. К., Картавцев С. В., Калинин Н. В. Оценка эффективности компрессорной установки при замене охлаждающего теплоносителя	32
ВЕСТИ ИЗ ПЕНСИОННОГО ФОНДА. Результаты деятельности НПФ электроэнергетики в 2013 г.	34
Желонкин Н. В., Рябчиков А. Ю., Аронсон К. Э., Мурманский И. Б. Результаты промышленных испытаний новой серии маслоохладителей с профицированными трубками	35

ХРОНИКА, ИНФОРМАЦИЯ

Молодюк В. В., Исамухамедов Я. Ш., Баринов В. А. Экспертное заключение на «Схему и программу развития Единой энергетической системы России на 2013 – 2019 гг.», утвержденные Минэнерго России в апреле 2013 г.

ОБМЕН ОПЫТОМ

Кубышкин И. Б. О выборе оптимального помола твёрдого топлива

Сергеев И. А., Суслов С. Ю., Тимофеев Н. В. Аналитические методики определения содержания полиаминов в водах ТЭС

Новые разработки ВТИ

ОБОРУДОВАНИЕ, УСЛУГИ

Фаворский О. Н., Леонтьев А. И., Фёдоров В. А., Мильман О. О. Воздушные конденсаторы — основа систем отвода тепла от паротурбинных установок в XXI веке

Денисенко И. Российская энергия для интернационального проекта

СЕ102М — универсально, выгодно, надёжно

Бравиков Д. Г., Волович Г. И. Прибор для измерения усилий нажатия ламелей разъединителей

Новости компании «РТСофт»

Abstracts

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт

© НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2014 г.

Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: влияние структуры и параметров АРВ на колебательные свойства АСР

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»



Я. Л. Арцишевский



Т. Г. Климова



А. В. Жуков



Е. И. Сацук



А. И. Расщепляев

Анализируется влияние структуры и параметров автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) на возникновение низкочастотных колебаний в энергосистемах (ЭС). Рассматривается спектральный состав частотной режимной характеристики при различных схемах ЭС и вариации параметров энергообъектов в случае включённых и отключённых каналах стабилизации АРВ. Приводится наглядное представление состава переходных процессов и влияния каналов стабилизации на параметры колебательных мод переходного процесса при различных тестовых возмущениях в системе.

Ключевые слова: автоматическая система регулирования, регулятор возбуждения, структура и параметры, низкочастотные колебания, состав переходных процессов.

Появление разнообразных цифровых программно-аппаратных систем моделирования сложных ЭС в реальном времени позволяет проводить испытания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), в том числе АРВ, в различных схемно-режимных ситуациях, близких к реальным, а также решать такие практические задачи, как определение качества регулирования [1] и верификация математических моделей цифровых устройств [2].

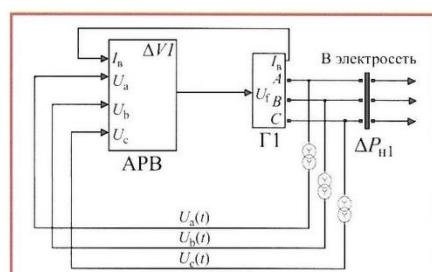


Рис. 1. Структурная схема АСР

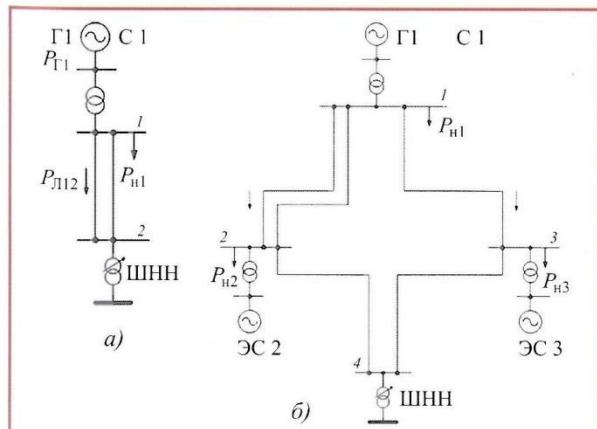


Рис. 2. Принципиальные электрические схемы (а, б) энергосистем, используемые для исследования АСР:
 С — электростанция; ШНН — шины низкого напряжения

Основная причина возникновения низкочастотных колебаний — свойства изменяющихся во времени нагрузок и несогласованная с ними работа систем возбуждения и АРВ синхронных генераторов. Одна из важных задач анализа функционирования АРВ — исследование влияния их структуры и параметров на колебательные процессы, возникающие вследствие разного вида возмущений. К ним относятся:

1. Тестовый импульс ΔV_1 — уставка напряжения, задаваемая в АРВ, увеличивается на 5 % на время 0,1 с. Возмущение возникает внутри автоматической системы регулирования (АСР) и иллюстрирует создание колебаний, идущих из АСР (рис. 1);

2. Импульс изменения нагрузки ΔP_{H1} — нагрузка на шинах 1 уменьшается на время 0,1 с. Возмущение незначительно по сравнению с генерируемой мощностью $\Delta P_{H1} \approx P_{G1}$;

3. Импульс изменения нагрузки ΔP_{H2} — нагрузка на шинах 2 уменьшается на время 0,1 с, имеет существенное значение, сравнимое с генерируемой мощностью P_{G1} .

Второй и третий импульсы — внешние по отношению к системе регулирования. Их рассмотрение позволяет оценить реакцию АРВ на внешние возмущения. Амплитуда импульсов устанавливается в соответствии со стандартом организации (СО) [3], а длительность — по рекомендациям [4], поскольку в течение 0,1 с параметры синхронной машины можно считать неизменными. Кроме того, при такой длительности импульса возмущения его спектр практически постоянен в рассматриваемом диапазоне частот, вследствие чего спектры режимных параметров соответствуют виду частотных характеристик преобразования возмущений в режимные параметры.

Рассмотрим две схемы СО [3] (рис. 2). Импульс ΔV_1 — внутреннее возмущение для генератора Г1 (в обеих схемах) и ЭС 2, ЭС 3 (рис. 2, б). Им-

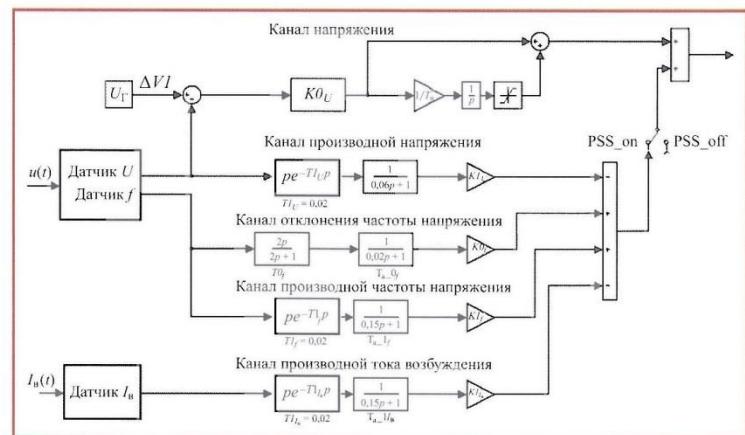


Рис. 3. Математическая модель АРВ типа АРВ-3М:
 T_i — постоянная времени интегрирования; p — оператор Лапласа

Таблица 1

Сигнал (см. рис. 4)	Коэффициент канала стабилизации			
	$K1_U$	$K1_{I_a}$	$K0_f$	$K1_f$
3	3	2	5	5
4	3	2	15	0
5	3	2	0	15

пульсы ΔP_{n1} и ΔP_{n2} — внешние для всех объектов системы, но имеющие разные мощности. Импульс ΔP_{n2} используется при анализе схемы на рис. 2, б.

Исследуем спектральный состав отклонения частоты напряжения на шинах генератора от номинального значения $\Delta f_r(t) = f_r(t) - 50$ на выводах генератора Г1 при включённых PSS_on и выключенных PSS_off каналах стабилизации АРВ типа АРМ-3М (рис. 3) и разных возмущающих воздействиях. Рассмотрим влияние коэффициентов преобразования каждого канала стабилизации на спектральные составляющие исследуемого режимного параметра. Пара-

метры канала напряжения (см. рис. 3) остаются постоянными при любых изменениях коэффициентов каналов стабилизации.

Анализ работы АРВ в схеме, представленной на рис. 2, а

На рис. 4 показан спектральный состав (рис. 4, а) переходного процесса $\Delta f_r(t)$ при разных коэффициентах каналов стабилизации и возмущении $\Delta V1$. Сигнал 1 (рис. 4, б) наблюдается при отключённых каналах стабилизации, ему соответствует спектральное представление 1 (см. рис. 4, а) — самое максимальное и узкополосное. Сигнал 2 получен при значениях коэффициентов каналов производной напряжения $K1_U = 3$ и производной тока возбуждения $K1_{I_a} = 2$. Коэффициенты каналов отклонения частоты напряжения $K0_f$ и производной частоты $K1_f$ равны нулю. Сигналы 3 — 5 получены при разных коэффициентах каналов стабилизации (табл. 1).

Сопоставление спектральных составляющих и соответствующих временных зависимостей показывает, что уже в процессе включения каналов производных напряжения и тока возбуждения существенно уменьшается мощность доминирующей колебательной составляющей (кривая 2), частота её практически не изменяется. Добавление каналов стабилизации отклонения частоты и производной частоты напряжения ещё больше подавляет доминирующую частоту переходного процесса (кривая 3). При этом значение частоты увеличивается и проявляется более низкая частота колебания (её область выделена овалом, см. рис. 4, а), которая практически не зависит от рассматриваемых коэффициентов.

Чрезмерное увеличение коэффициента канала отклонения частоты напряжения $K0_f = 15$ практически не меняет значение частоты доминирующего колебания, но существенно повышает её мощность (кривая 4), а увеличение ко-

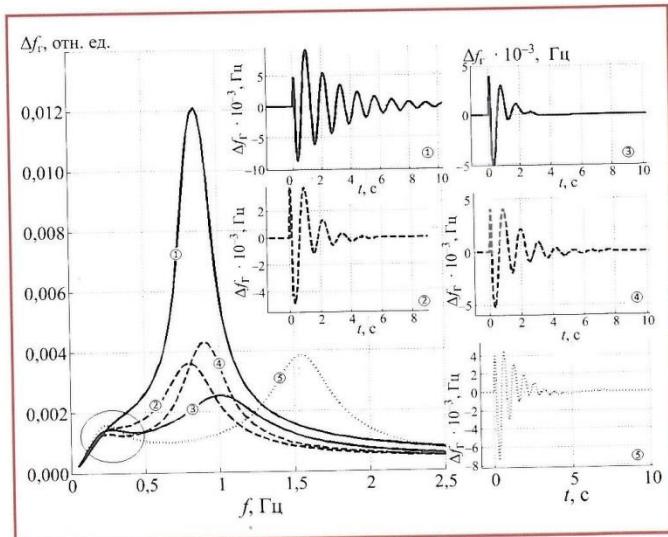


Рис. 4. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ на шинах генератора Г1 1 — 5 (а) и его временные характеристики (б) при возмущении $\Delta V1$, переменных $K0_f$, $K1_f$ и постоянных $K1_{I_a}$, $K1_U$ коэффициентах

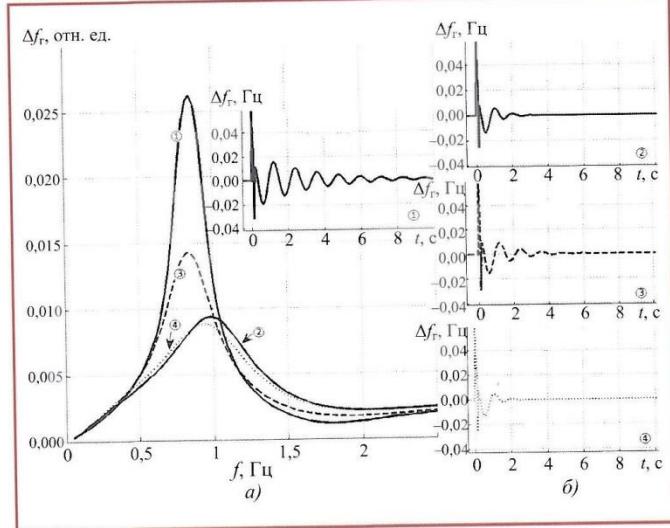


Рис. 6. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ на шинах генератора Г1 1 — 4 (а) и его временные характеристики (б) при возмущении ΔP_b , переменных $K0_f$, $K1_f$ и постоянных $K1_{I_a}$, $K1_U$ коэффициентах

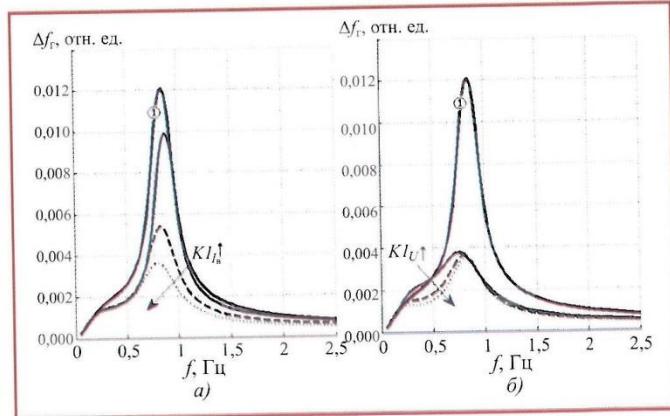


Рис. 5. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ на шинах генератора Г1 при возмущении $\Delta V1$, коэффициенте $K1_U = 3$ и изменяющемся коэффициенте $K1_{I_a}$ (а), а также при $K1_{I_a} = 2$ и $K1_U = 0, 3, 5$ (б)

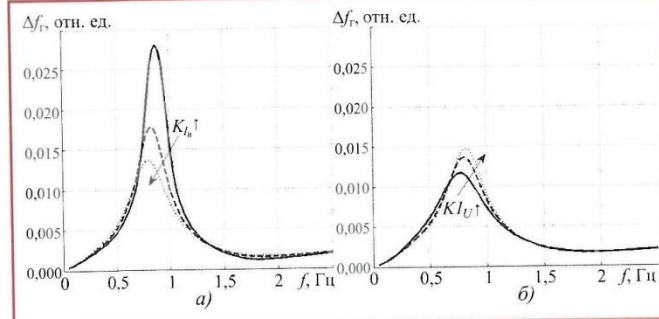


Рис. 7. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ на шинах генератора Г1 при возмущении ΔP_b , коэффициентах $K1_{I_a}$ (а), $K1_U = \text{var}$ (б) и $K0_f = K1_f = 0$

эффективности канала производной $K1_f = 15$ существенно меняет значение частоты доминирующего колебания и повышает её мощность (кривая 5). Совместная установка значений $K0_f = 15$ и $K1_f = 15$ приводит к неустойчивому регулированию, возникает расходящееся колебание на доминирующей частоте.

Сравнение спектральных составляющих процессов 1–5 показывает наибольшую относительную ширину кривой 3, что соответствует наименьшей длительности переходного процесса (временная зависимость 3), а наименьшую ширину спектра имеет спектральная составляющая 1, относящаяся к наиболее длительному переходному процессу 1.

Таким образом, существуют значения коэффициентов каналов отклонения частоты напряжения $K0_f$ и её производной $K1_f$, обеспечивающие максимальное подавление доминирующей частоты и наименьшее время переходного процесса. Эти коэффициенты соответствуют оптимальной настройке АРВ для данной схемы и режима её работы.

На рис. 5 показаны спектральные представления отклонения частоты на шинах генератора при различных коэффициентах (коэффициенты каналов внешней стабилизации $K0_f$, $K1_f$ равны нулю). При отключённых каналах стабилизации переходный процесс имеет спектральную составляющую 1. В этом случае канал тока возбуждения существенно подавляет интенсивность колебания на доминирующей частоте переходного процесса с небольшим уменьшением значения частоты, а канал производной напряжения влияет существенно меньше с небольшим увеличением значения частоты доминирующего колебания.

На рис. 6 показано спектральное представление отклонения частоты напряжения на шинах генератора от номинального значения $\Delta f_r(t)$ при разных

коэффициентах каналов стабилизации и внешнем возмущении ΔP_1 (см. рис. 2, а). Сигнал 1 наблюдается при отключённых каналах стабилизации, ему соответствует спектральная составляющая 1. Сигнал 2 получен при коэффициентах канала производной напряжения $K1_U = 3$, канала производной тока возбуждения $K1_{I_b} = 2$, каналов отклонения частоты напряжения $K0_f = 5$ и производной частоты $K1_f = 5$.

Сигнал 3 получен при нулевом значении коэффициента $K1_f$ и неизменных остальных, а сигнал 4 — при нулевом значении коэффициента $K0_f$. Кривые 2 и 4 свидетельствуют, что канал производной частоты напряжения при внешнем возмущающем воздействии в наибольшей степени подавляет амплитуду колебаний на доминирующей частоте и увеличивает значение последней.

На рис. 7, а показано спектральное представление отклонения частоты на шинах генератора при $K1_U = 3$ и изменяющемся значении $K1_{I_b} = 0, 1, 2$. На рис. 7, б приведено аналогичное спектральное представление при $K1_{I_b} = 2$ и изменяющемся значении $K1_U = 0, 3, 5$. В обоих случаях коэффициенты $K0_f$, $K1_f$ равны нулю. Графики на рис. 7 свидетельствуют, что канал тока возбуждения существенно подавляет амплитуду на доминирующей частоте переходного процесса с небольшим

уменьшением значения частоты. В то время как канал производной напряжения увеличивает спектральную составляющую с небольшим увеличением частоты доминирующего колебания.

Оба возмущения в рассматриваемом диапазоне частот имеют практически равномерный спектр. Однако при исследовании работы АРВ, установленного на Г1 (см. рис. 2, а), в спектральном представлении отклонения частоты напряжения на шинах генератора от номинального значения $\Delta f_r(t)$ наблюдается доминирующая частота, значением и мощностью которой можно управлять, изменения коэффициенты каналов стабилизации. При отсутствии каналов стабилизации значение доминирующей частоты определяется параметрами генератора, схемы и режимом работы энергосистемы.

Анализ работы АРВ в схеме, показанной на рис. 2, б

На рис. 8, а показан спектральный состав отклонения частоты напряжения на шинах генератора от номинального значения $\Delta f_r(t)$, в котором наблюдается несколько выраженных колебаний при возмущении $\Delta V1$. Сигнал 1 существует при отключённых каналах стабилизации, ему соответствует спектральное представление 1 (рис. 8, б), имеющее доминирующую частоту, определяемую собственной частотой генератора и режимом сети, и несколько более слабых колебаний. Сигналы 2 и 3 получены при значениях коэффициентов, представленных в табл. 2.

Сопоставление спектральных представлений свидетельствует, что включение каналов стабилизации подавляет максимум доминирующей частоты, а включение канала производной частоты напряжения увеличивает её значение. На рис. 8, б кривая 1 соответствует спектральному представлению сигнала, наблюдавшегося при отключённых каналах стабилизации. Здесь имеет место

Таблица 2

Сигнал (см. рис. 8)	Коэффициент канала стабилизации			
	$K1_U$	$K1_{I_b}$	$K0_f$	$K1_f$
1	0	0	0	0
2 (чёрная пунктирная линия)	3	2	0	0
2 (синяя пунктирная линия)	3	2	5	0
3 (чёрная сплошная линия)	3	2	5	5
3 (синяя сплошная линия)	3	2	0	5

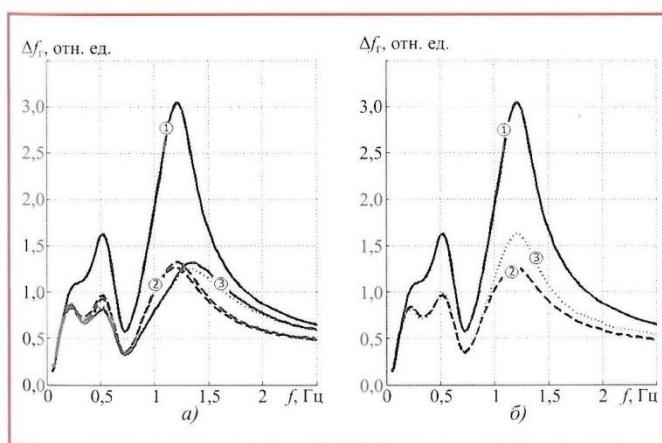


Рис. 8. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ при возмущении $\Delta V1$ и разных значениях коэффициентов:

а — $K0_f = K1_f = \text{var}$, $K1_{I_b} = K1_U = \text{const}$; б — $K1_{I_b} = K1_U = \text{var}$, $K0_f = K1_f = 0$

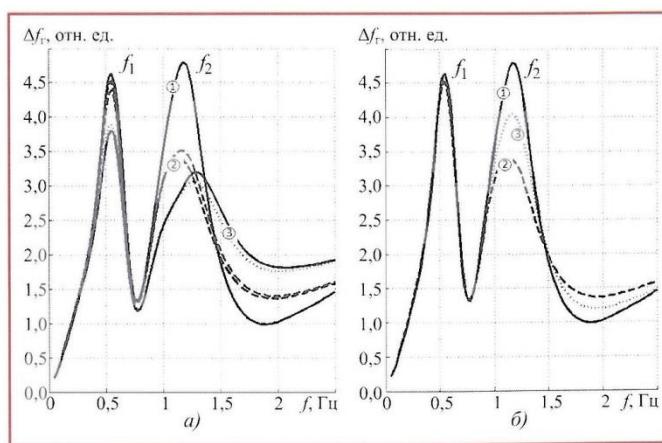


Рис. 9. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ на шинах генератора Г1 при возмущении ΔP_1 и разных значениях коэффициентов:

а — $K0_f = K1_f = \text{var}$, $K1_{I_b} = K1_U = \text{const}$; б — $K1_{I_b} = K1_U = \text{var}$, $K0_f = K1_f = 0$

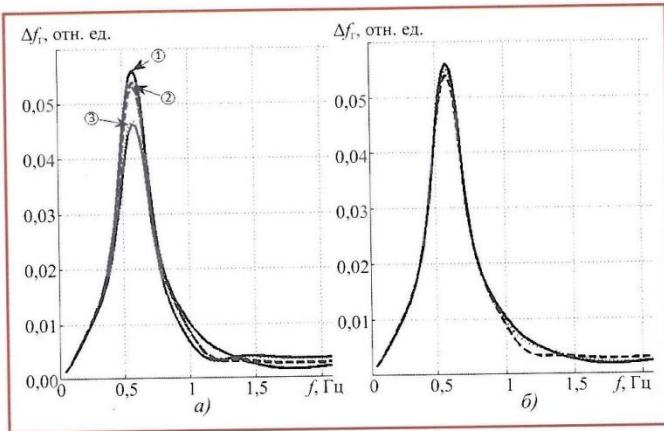


Рис. 10. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ на шинах Γ_1 при возмущении ΔP_2 и разных значениях коэффициентов:
 $a - K_0_f = K_1_f = \text{var}$, $K_1_{I_s} = K_1_U = \text{const}$; $b - K_1_{I_s} = K_1_U = \text{var}$, $K_0_f = K_1_f = 0$

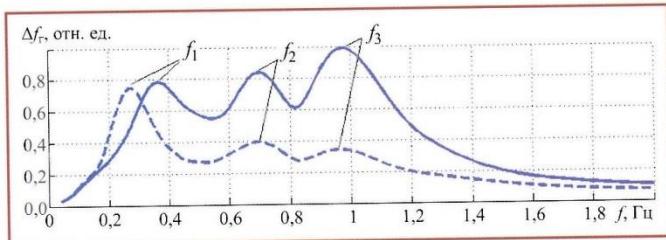


Рис. 11. Спектральное представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ при отключённых (сплошная линия) или включённых (пунктирная) каналах стабилизации

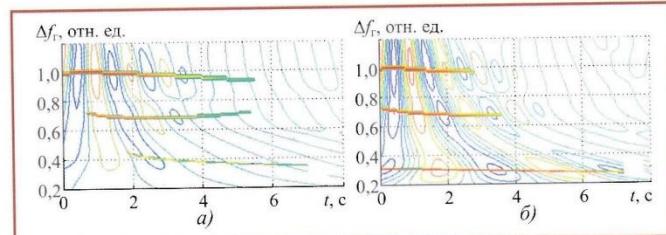


Рис. 12. Контуровое представление волновых спектров процесса $\Delta f_r(t)$ при отключённых (а) и включённых (б) каналах стабилизации

доминирующая частота. Кривая 2 относится к спектру сигнала при $K_1_U = 3$ и $K_1_{I_s} = 2$, а кривая 3 — при $K_1_U = 5$ и $K_1_{I_s} = 1$. В обоих случаях коэффициенты K_0_f , K_1_f равны нулю.

При отключённых каналах стабилизации переходный процесс имеет спектральное представление 1. В этом случае канал тока возбуждения существенно подавляет доминирующую частоту переходного процесса с небольшим уменьшением частоты. В то время как канал производной напряжения влияет существенно меньше с небольшим увеличением частоты доминирующего колебания.

На рис. 9 показано действие различных каналов стабилизации при внешнем возмущении ΔP_1 , а также структуре и режиме работы электросети, вызывающими в сигнале $\Delta f_r(t)$ на шинах генератора Γ_1 два явно выраженных колебания с частотами f_1 и f_2 . Спектраль-

ное представление 1 (рис. 9, а) соответствует работе АРВ при отключённых каналах стабилизации. На изменение коэффициентов K_0_f и K_1_f реагирует мощность первого колебания при практически постоянном значении его частоты f_1 . У второго колебания изменяются и мощность колебания и его частота f_2 аналогично действию этих коэффициентов в схеме, представленной на рис. 2, а.

На рис. 9, б коэффициенты K_1_U и $K_1_{I_s}$ практически не меняют составляющую спектра f_1 , а на составляющую f_2 они действуют аналогично ситуации, представленной на рис. 7. Канал тока возбуждения существенно подавляет данную частоту переходного процесса с небольшим её уменьшением, а канал производной напряжения увеличивает спектральную составляющую с небольшим повышением значения частоты колебания.

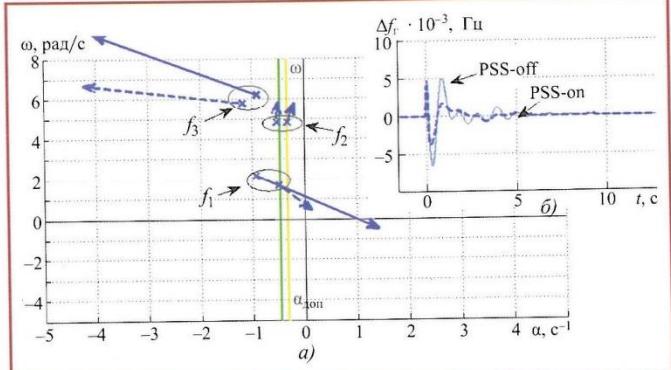


Рис. 13. Векторное (а) и временное (б) представление переходного процесса $\Delta f_r(t)$ при возмущении ΔP_1 , а также отключённых (сплошная линия) и включённых (пунктирная) каналах стабилизации

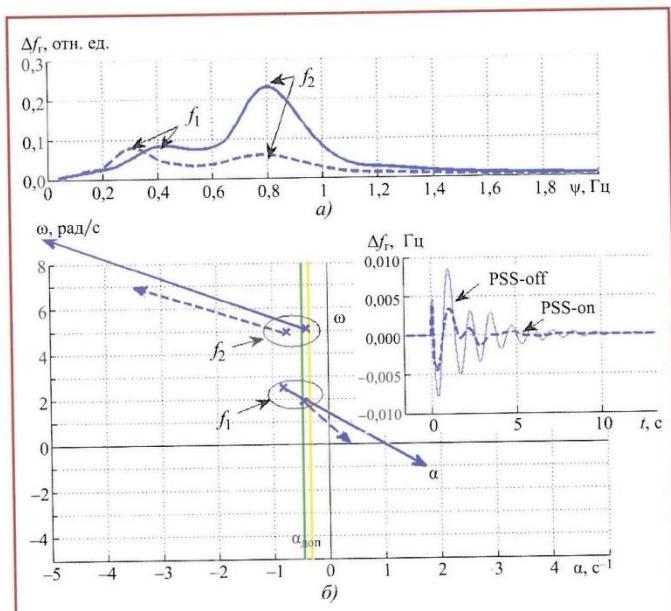


Рис. 14. Спектральный состав переходного процесса $\Delta f_r(t)$ при возмущении ΔP_1 (а) и его векторное представление (б) при отключённых (сплошная линия) и включённых (пунктирная) каналах стабилизации

С ростом мощности внешнего возмущения изменяется соотношение спектральных составляющих. Так, при ΔP_2 в спектральном представлении $\Delta f_r(t)$ остаётся только одна составляющая f_2 , мощность которой реагирует на изменения коэффициентов K_0_f , K_1_f и практически остаётся неизменной при $K_1_{I_s} = K_1_U = \text{var}$ (рис. 10).

Спектральное представление переходного процесса позволяет определить число колебательных составляющих (мод или форм [4]) в нём, а также оценить их частоту и мощность (рис. 11). Максимальное значение составляющей в спектральном представлении определяется амплитудой и длительностью колебания независимо от момента его возникновения. Длительность колебания каждой частоты зависит от степени его демпфирования. Эти данные в спектральном представлении не различаются. Возможно суще-

ствование кратковременной составляющей с большой амплитудой.

Более информативный способ — использование волновых спектров, например, Морле, когда можно определить не только число колебаний и их мощность, но также длительность каждого колебания, момент появления и оценивать изменения частот мод. На рис. 12 показаны линии максимумов колебаний в действительной части спектра Морле. При этом число колебаний, их длительность и мощность отображается интенсивностью цвета каждой линии.

Следует отметить, что линии максимумов не горизонтальны, что связано с изменяющимися во времени частотами колебаний, виды длительность каждого колебания и момент их возникновения. Использование мнимой части спектров Морле добавит информацию о фазе мод. Следовательно, качественно показываются все характеристики мод низкочастотных колебаний: амплитуда, постоянная затухания, частота и фаза.

Количественно точно и компактно эту информацию можно представить на гиперплоскости — с двумя системами координат [5]. Переходной процесс при любом возмущении представляется совокупностью четырёхмерных гипервекторов, начала которых определяются значениями действительной и мнимой частей соответствующих корней характеристического уравнения, т. е. значениями частоты и показателя затухания низкочастотного колебания. При этом длины векторов пропорциональны амплитудам колебаний, а наклон к горизонтальной оси характеризует их фазы.

Соответствующие (см. рис. 12) векторы трёх мод колебаний показаны на рис. 13. Вертикальной жёлтой линией отмечено значение коэффициента затухания, при котором амплитуда колебания за 5 с уменьшается вдвое, а зелёной — когда в 5 раз (такое затухание считается удовлетворительным [4]). Амплитуда вектора частоты f_2 при отключённых каналах стабилизации принимается как базовая и используется для нормирования амплитуд всех остальных векторов. Для иллюстрации векторов

используются усреднённые за время существования переходного процесса параметры колебаний.

На рис. 13, а имеется вектор частоты f_3 с максимальной амплитудой, но соответствующее колебание практически полностью затухает в течение 3 с. Практически также быстро исчезает и колебание с частотой f_1 . Наиболее длительное в данном переходном процессе — колебание с частотой f_2 и минимальными амплитудой и показателем затухания. Векторы частот f_1 и f_3 направлены противофазно, что сглаживает их проявление во временном представлении (см. рис. 13, б).

При включении каналов стабилизации заметно изменение всех характеристик колебаний — в первую очередь показателя затухания и амплитуды, незначительно меняются частота и фаза. Следует отметить отрицательное влияние каналов стабилизации на показатель затухания колебания с частотой f_1 : степень его затухания уменьшилась, хотя остальные параметры изменились в нужном направлении.

На рис. 14, б показано векторное представление аналогичного переходного процесса, возникшего при возмущении ΔP_1 . И в этом случае наблюдается влияние каналов стабилизации на параметры колебательных составляющих переходного процесса, в том числе и отрицательное влияние на показатель затухания низкочастотной составляющей на частоте f_1 . Следовательно, гипервекторное представление переходных процессов наглядно показывает действие АРВ и позволяет количественно контролировать влияние каналов стабилизации на колебательные моды.

Выходы

1. При внутренних и внешних для рассматриваемой системы регулирования возмущениях в режимных характеристиках присутствует несколько колебательных мод, в том числе и доминирующая колебательная составляющая с частотой, близкой к частоте свободных колебаний генератора. Включение каналов стабилизации по-

зволяет управлять параметрами колебательных мод переходных процессов при различных возмущениях, а гипервекторное представление состава переходного процесса на плоскости — контролировать действие алгоритмов АРВ.

2. Для верификации реализованных на основе комплекса RTDS схем энергосистем необходимо сопоставление спектрального состава режимных характеристик модели и реальной схемы при одинаковых возмущениях. Наглядное сопоставление возможно при сравнении векторов колебательных составляющих соответствующих переходных процессов.

3. Все использованные в статье способы сравнения действия каждого из каналов стабилизации АРВ для разных схем и возмущающих воздействий свидетельствуют об однотипности действия этих каналов для любой рассмотренной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: оценка качества переходного процесса / Я. Л. Арцишевский, Т. Г. Климова, А. В. Жуков и др. // Энергетик. 2013. № 10.

2. Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: получение и верификация моделей микропроцессорных АРВ / Я. Л. Арцишевский, Т. Г. Климова, А. В. Жуков и др. // Энергетик. 2014. № 1.

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

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

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

ПОПРАВКА

В статье Петрова Ю. В., Саломасова Ю. М., Грузного А. В., Галускина В. Б., Серанта Ф. А., Квривишвили А. Р., опубликованной в журнале «Энергетик» № 5 за 2014 г. на с. 55 – 62, следует читать:

на с. 55:

Опыт Подольского машиностроительного завода (ЗиО) по глубокой модернизации котельного оборудования сверхкритического давления на энергоблоках мощностью 300 и 500 МВт

ПЕТРОВ Ю. В., САЛОМАСОВ Ю. М., ГРУЗНОВ А. В., ГАЛУСКИН В. Б., инженеры, ОАО «Подольский машиностроительный завод» (ОАО «ЗиО»), 142115, г. Подольск, ул. Машиностроителей, д. 23
info@podolskmash.ru

СЕРАНТ Ф. А., доктор техн. наук, КВРИВИШВИЛИ А. Р., канд. техн. наук, ЗАО «ЗиО-КОТЭС», 630049, г. Новосибирск, ул. Кропоткина, д. 96/1;
на с. 55, 1-й столбец, 2-й абзац снизу, 1-я строка:

За последние годы в ОАО «ЗиО» совместно с ЗАО «ЗиО-КОТЭС»...;

на с. 55, 3-й столбец, 2-й абзац сверху:

ОАО «Подольский машиностроительный завод» (ОАО «ЗиО») разработал проект...