

ЭНЕРГЕТИК · 1

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ ЖУРНАЛ

2014

Группа компаний "Интерэлектроинжиниринг"
И ИВЭЛЕКТРОНАЛАДКА 
 Вместе с энергией!



1974 Наладочный участок

2014 Многопрофильный холдинг

г. Иваново, ул. Ташкентская, д.90
 тел.: +7 (4932) 230-230
office@ien.ru www.ien.ru



Регион: от Калининграда до Камчатки

Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: получение и верификация моделей микропроцессорных АРВ

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
РАСПЩЕПЛЯЕВ А. И., магистр, ОАО «СО ЕЭС»



Я. Л. Арцишевский



Т. Г. Климова



А. В. Жуков



Е. И. Сацук



А. И. Расщепляев

Рассмотрены причины, вызывающие погрешности при микропроцессорной реализации алгоритмов автоматического регулирования, предложены способы верификации микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), основанные на аппроксимации экспериментальных частотных характеристик АРВ, и проверка результатов с использованием тестовых сигналов.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс RTDS, регулятор возбуждения сильного действия, способы экспериментального получения частотных характеристик, аппроксимация и верификация характеристик.

Появление различных цифровых средств моделирования сложных электроэнергетических систем в реальном времени позволяет проводить испытания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в различных схемно-режимных ситуациях, близких к реальным. В работах [1, 2] показано использование программно-аппаратного комплекса (Real-Time Digital Simulator — RTDS) для проверки функционирования АРВ на соответствие требованиям стандарта [3], рассматриваются возможности создания тестовых схем и оценки качества переходных процессов.

При предварительном расчёте режимов электрической сети необходимо иметь математическую модель микропроцессорного регулятора возбуждения, алгоритм работы которого описывается разностными уравнениями в дискретном времени. Для математической модели необходимо описание АРВ дифференциальными уравнениями в непре-

рывном времени. Цифровая реализация звеньев, входящих в состав регулятора, отличается от их аналогового представления, что вносит погрешность в математическую модель. Вследствие этого возникает необходимость получения тождественной математической модели микропроцессорных АРВ. Данная задача разделяется на три этапа:

- получение амплитудно-частотной характеристики — АЧХ (для линейной электрической цепи — зависимость отношения амплитуды гармонического сигнала на выходе цепи к амплитуде гармонического входного сигнала от частоты входного сигнала), фазо-частотной характеристики — ФЧХ (для линейной электрической цепи — зависимость сдвига по фазе между гармоническими колебаниями на выходе и входе этой цепи от частоты гармонических колебаний на входе), амплитудно-фазовой характеристики — АФХ (представление частотного отклика линейной стационарной динами-

ческой системы в виде графика в комплексных координатах, объединяющего на одной плоскости АЧХ и ФЧХ);

- аппроксимация экспериментальных характеристик, т. е. получение по частотным характеристикам передаточных функций каналов;

- проверка правильности (верификация) полученной математической модели при сравнении откликов на тестовые возмущения, возникающих в схемах с исследуемым АРВ или его моделью.

Технические возможности получения экспериментальных частотных характеристик для разных регуляторов имеют отличительные особенности. В статье приведены способы, учитывающие различные технические возможности регулятора, и использование указанных характеристик в целях формирования математических моделей, для которых проводится верификация.

Получение частотных характеристик

Исследования осуществляются при использовании АРВ типа АРВ-М. На рис. 1 представлена математическая модель алгоритма, реализованная в дискретном виде в АРВ [4], все звенья который описываются передаточными функциями непрерывного оператора s . При переходе к дискретному оператору z происходит искажение частотных характеристик, появляется основное свойство частотных характеристик цифровых элементов — периодичность.

Возможны разные способы получения дискретных алгоритмов, однако в любом случае возникают проблемы при создании алгоритмов дискретного дифференцирования. Если использовать для расчёта производных формулы дифференцирования с наилучшим среднеквадратичным приближением к результатам измерений, появляется запаздывание получения результатов. Последнее увеличивается при улучшении фильтрации высших гармоник.

Из рис. 1 видно, что в микропроцессорной реализации используются два алгоритма расчёта производной: с запаздыванием $T1U = T1f = 0,02$ с (каналы производной напряжения и тока возбуждения) и $T1F = 0,05$ с (канал производной частоты напряжения). Эти алгоритмы имеют разное искажение частотных характеристик при дискретной реализации, что заметно уже в требуемом [3] диапазоне частот 0,1–3 Гц. Рис. 2 иллюстрирует большее искажение АЧХ канала производной частоты, чем канала производной напряжения.

Необходимые для определения математической модели АРВ частотные характеристики можно получить также разными способами. Для представления всех способов определения частотных характеристик выбраны каналы напряжения, а также каналы производных напряжения и частоты напряжения, имеющие разные алгоритмы получения дискретной производной. Искажения частотных характеристик канала тока возбуждения

Рис. 1.
1, 2 —

точно
водной
наибол

По с
АЧХ п
входно
проход
При эт
ФЧХ э
способ
частот
каждог
ный сиг
0,1 – 3
ограниц
схемы и
жения и

Расс
для кан
скольку
бом см
ливает э
порогов
каждой
сигнала
ходного

Чтобы
напы, не
характер
мировует
и частот
амплитуд
ствуют н
преобраз
подается
 $u(t) =$
 $+ 0,5 \sin$
функция
 $= 0,5 \sin$
частоты,

и компонентного
частотных
характеристик
имеют статьи
различных
характеристик
моторов

тических
при ис-
ри рис. 1
модель
ретном
оны не-
реходе
исходит
так, по-
стотных
тов —

лучения
любом
при со-
диффе-
некада-
льтатан-
ние по-
увели-
ции вы-
сии

процес-
два ал-
запаз-
каналы
изобуж-
производ-
оритмы
ных ха-
рактери-
зации,
[1] дина-
постри-
канала
в проек-

ния ма-
ные ха-
кже
ставления
частотных
апре-
их напри-
неющие
окреп-
ных ха-
уджения

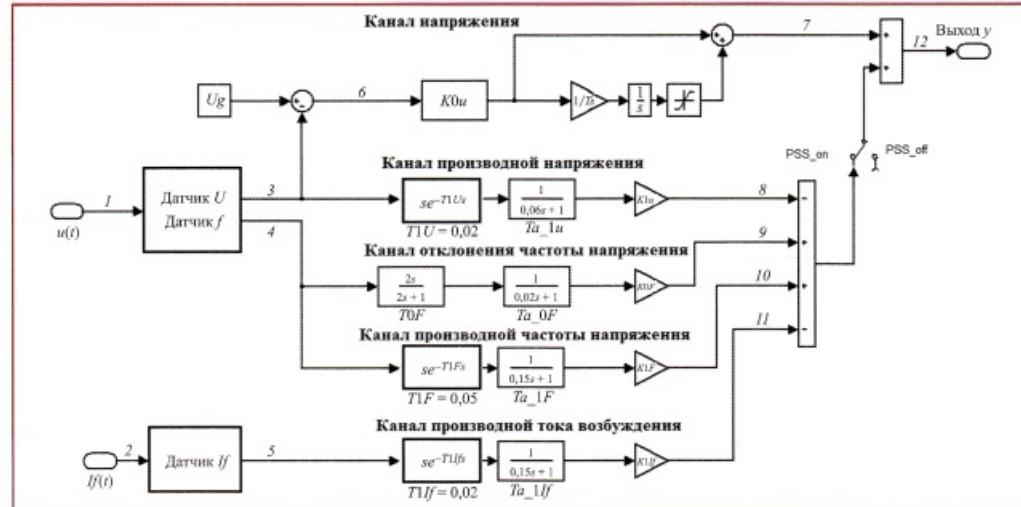


Рис. 1. Математическая модель APB типа APB-M:

1, 2 — входные сигналы APB; 3 — 5 — выходные сигналы датчиков напряжения, частоты и тока возбуждения; 6 — сигнал отклонения амплитуды напряжения от заданного значения; 7 — 11 — выходные сигналы рабочего канала и каналов стабилизации; 12 — выходной сигнал APB

точно повторяют ситуацию канала производной напряжения, а канал отклонения наилучшей простотой для исследования.

По определению для линейных систем АЧХ показывает изменение амплитуды входного синусоидального сигнала при прохождении через исследуемое звено. При этом изменение фазы определяет ФЧХ звена. Отсюда следует **первый способ** экспериментального получения частотных характеристик [3, 5]. На вход каждого канала подается синусоидальный сигнал с изменяющейся в диапазоне 0,1 – 3 Гц частотой, амплитуда сигнала ограничивается требованием работы схемы APB и преобразователей напряжения и частоты в линейном режиме.

Рассматриваемый способ не подходит для канала напряжения (см. рис. 1), поскольку интегрирующее звено при любом смещении входного сигнала накапливает это смещение и быстро достигает порогов ограничения в канале. Далее на каждой частоте амплитуда выходного сигнала делится на амплитуду входного сигнала (АЧХ), и находится разность выходного и входного сигналов (ФЧХ).

Чтобы получить синусоидальные сигналы, необходимые для снятия частотных характеристик каждого канала, формируется модулированный по амплитуде и частоте сигнал напряжения, основная амплитуда и частота которого соответствуютnominalным значениям. На вход преобразователей напряжения и частоты подается сигнал (см. рис. 1, точка 1) $u(t) = U_{\text{ном}}[1 + S_{\text{мн}}(f)] \sin[2\pi(50 + 0,5 \sin(\Omega t))]$, где $S_{\text{мн}}(f) = 0,05 \sin(\Omega f)$ — функция модуляции напряжения; $S_{\text{мн}}(f) = 0,5 \sin(\Omega f)$ — функция модуляции частоты.

Преобразователи напряжения и частоты формируют в точках 3 и 4 соответствующие входные сигналы: модулиро-

ванную амплитуду $U(f) = U_{\text{ном}}[1 + 0,05 \sin(\Omega f)]$ для канала производной напряжения и модулированную разность

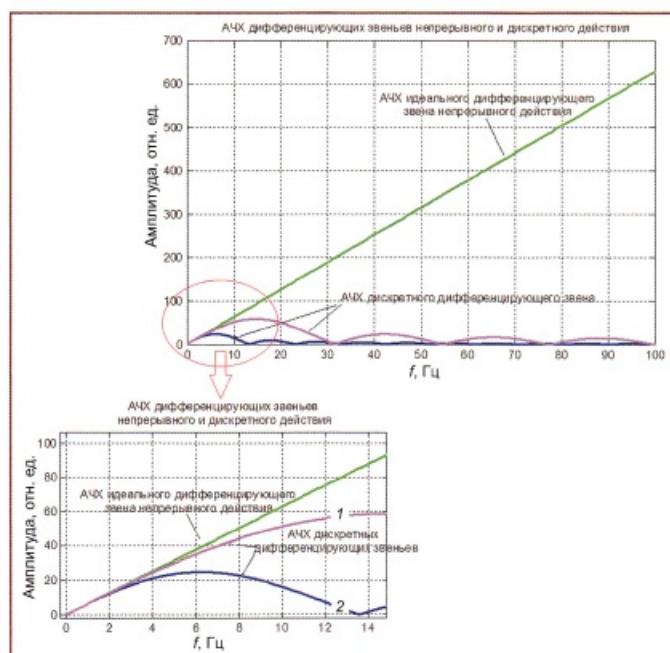


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика идеального дифференцирующего звена непрерывного действия и звеньев дифференцирования дискретного действия:
1 — дифференцирование в каналах производной напряжения и тока возбуждения; 2 — дифференцирование в канале производной частоты напряжения

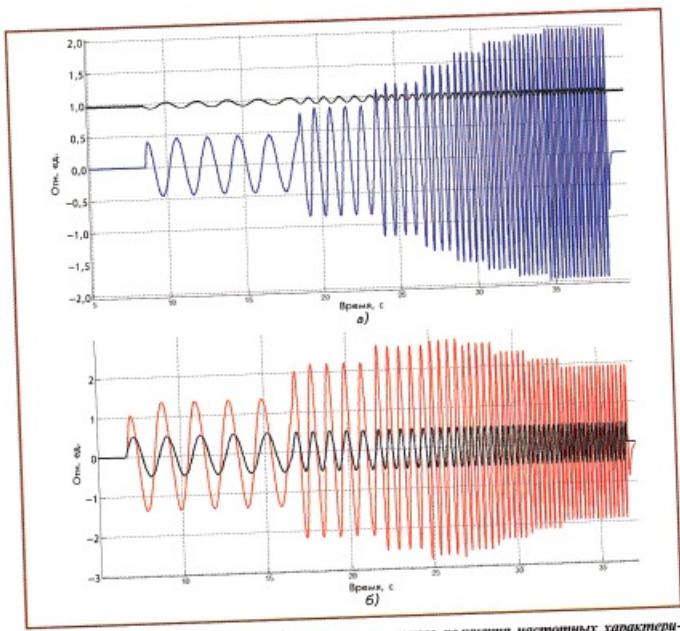


Рис. 3. Иллюстрация первого способа экспериментального получения частотных характеристик каналов стабилизации:
а — производной напряжения; б — производной частоты напряжения

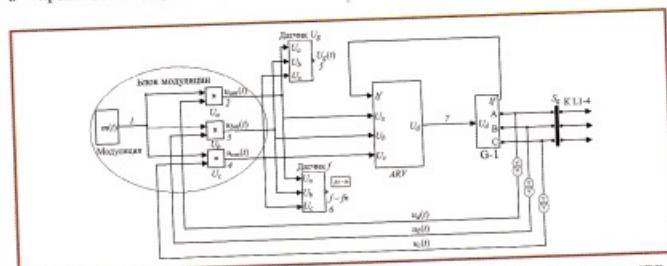


Рис. 4. Структурная схема замкнутой АСР для определения частотных характеристик АРВ:
1 — выход блока формирования сигналов АРВ — автоматическая регулировка возбуждения; 2 — 4 — выходы блоков модуляции амплитуд фазных напряжений; 5 — 6 — выходы модуляции; 7 — выход АРВ для датчиков напряжения и частоты; 8 — выход АРВ

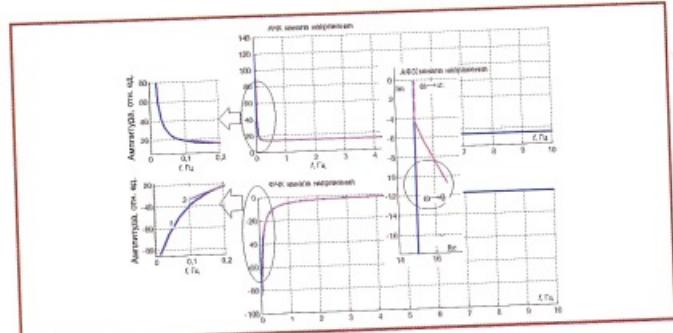


Рис. 5. Теоретические (сплошные линии или 1) и экспериментальные (3 — получена вторым способом) АЧХ, ФЧХ, АФХ канала напряжения в линейном масштабе

частот $f(t) - f_{\text{ном}} = 0.5 \sin(\Omega t)$ для канала отклонения и производной частоты напряжения (частота модуляции Ω меняется в диапазоне 0,1 – 3 Гц).

Применение комплекса RTDS позволяет сформировать непрерывную последовательность входных модулированных сигналов, что существенно ускоряет проведение эксперимента. Эти сигналы изображены на рис. 3 чёрным цветом. Длительность диапазона существования каждой частоты модуляции выбрана с условием достижения установленного режима после смены частоты модуляции. При этом регулятор работает автономно. Его правильное функционирование обеспечивается необходимым набором управляющих сигналов. Выходной сигнал канала производной напряжения (см. рис. 1, точка 8) показан на рис. 3, а синим цветом, а выходной сигнал канала производной частоты (см. рис. 1, точка 10) на рис. 3, б — красным.

Вычислять характеристики в каждой точке довольно сложно. Использование комплекса RTDS позволяет применить более удобный второй способ получения частотных характеристик, основанный на спектральном методе анализа линейных систем [6]. По определению [6] спектральная плотность выходного сигнала вычисляется как произведение спектральной плотности входного сигнала на комплексную частотную характеристику звена. Отсюда для получения комплексной частотной характеристики достаточно разделить спектральные плотности сигналов выходного на входной.

Нахождение спектральной плотности предполагает интегрирование сигнала при преобразовании Фурье в бесконечных пределах по времени. При конечном времени наблюдения формируется оценка спектра. Для максимального приближения оценки спектральной плотности к её истинному значению необходимо выбрать ограниченный во времени сигнал. Для модуляции амплитуды и частоты напряжения $u(t)$ используются сигналы $S_m(t)$ и $S_f(t)$, конечно интегрируемые на рассматриваемом временном интервале.

Первые два способа получения частотных характеристик предполагают работу АРВ вне контура регулирования при использовании управляющих сигналов для его функционирования. Далее рассматриваются два способа получения частотных характеристик при работе АРВ в замкнутой системе регулирования (рис. 4). В замкнутой автоматической системе регулирования (АСР) для модуляции доступна только амплитуда напряжения, входной сигнал АРВ умножается в блоке модуляции на функцию модуляции.

Третий способ получения частотных характеристик также основан на спектральном методе анализа и доступности к наблюдению внутренних точек сигналов 3 и 4 (выход датчиков напряжения и частоты) в АРВ (см. рис. 1) и то-

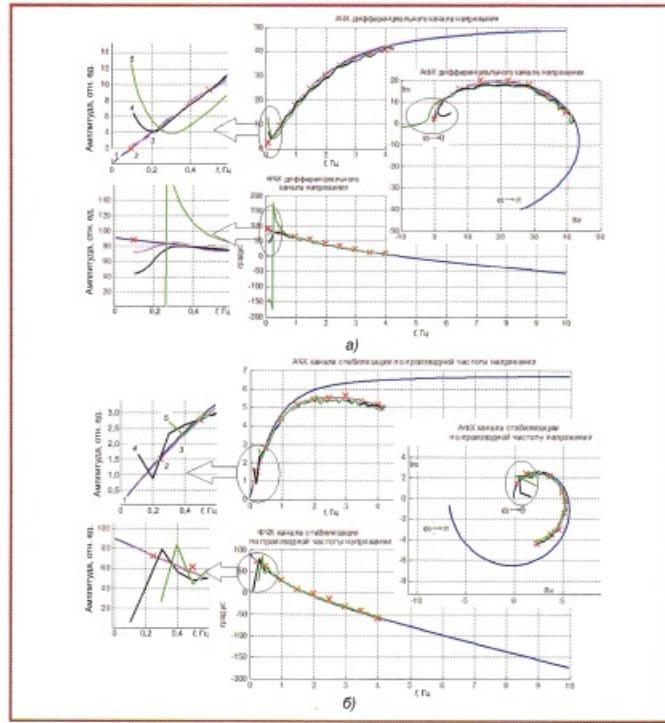


Рис. 6. Теоретические (синие линии) и экспериментальные АЧХ, ФЧХ, АФХ канала стабилизации по производной в линейном масштабе:
а — напряжение; б — частоты напряжения; 1 — кривые, построенные по формулам закона регулирования; 2 — 5 — экспериментальные характеристики, полученные способами из первого по четвёртый соответственно

чек 8, 10 (выход исследуемых каналов стабилизации).

При отсутствии технической возможности измерения внутренних сигналов АРВ (см. рис. 4, внутренние точки АРВ недоступны) целесообразно воспользоваться **четвёртым способом** определения частотных характеристик, в котором используются входные (точки 2 — 4) и выходной (точка 7) сигналы АРВ. Здесь получение частотных характеристик также основано на спектральном методе анализа линейных систем [6]. Определение частотных характеристик каналов стабилизации происходит в два этапа. Сначала для основного канала напряжения, далее поочерёдно для каналов стабилизации.

Результат определения АЧХ и ФЧХ первым методом и построенного по этим характеристикам АФХ для обеих каналов стабилизации отмечен красным маркером на рис. 5. Результаты вычисления комплексных частотных преобразований из точки 6 в 7 (см. рис. 1, канал напряжения), из точки 3 в 8 (см. рис. 1, канал производной напряжения) и из точки 4 в 10 (см. рис. 1, канал производной частоты напряжения) представлены на рис. 5 и рис. 6, а, б соответственно.

следующего регулятора АРВ-М. Видно, что преобразователь напряжения вносит только запаздывание при определении амплитуды входного сигнала, время которого вычисляется по ФЧХ, время запаздывания $T_s = 0,0238$ с. Преобразователь частоты также даёт только запаздывание $T_s = 0,0275$ с.

Анализ результатов определения частотных характеристик

На рис. 6 показаны частотные характеристики основного канала регулирования, содержащего интегрирующее звено, полученные вторым способом при использовании конечно-интегрируемого входного сигнала во время работы АРВ в замкнутой АСР.

Здесь выделены области неточного определения частотных характеристик, что связано с ограниченным временем наблюдения сигнала и заменой спектральной плотности сигнала её оценкой. Однако диапазон частот достоверных измерений достаточен для аппроксимации полученных кривых формулами. Видно, что используемый в регуляторе АРВ-М алгоритм дискретного интегрирования не вносит искажения частотных характеристик.

Результаты определения частотных характеристик дифференциальных каналов напряжения и частоты напряжения представлены на рис. 6, а, б соответственно. Эти каналы имеют разную реализацию дискретной производной. Для обоих каналов выделена область неточного определения характеристик, которая также связана с ограниченностью времени наблюдения.

Диапазон недостоверных измерений зависит от способа получения характеристик. При использовании сигналов в замкнутых АСР погрешность измерения характеристик при сверхнизких частотах увеличивается также за счёт эффекта регулирования, обеспечивающего уменьшение выходного сигнала, вследствие чего начинают проявляться вычислительные погрешности (эффект при делении малых чисел).

В области достоверных измерений все методы получения частотных характеристик дают близкие результаты и любая из кривых может быть использована для

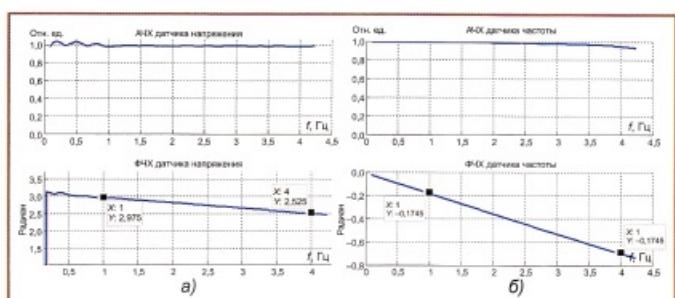


Рис. 7. Частотные характеристики преобразователей напряжения (а) и частоты (б)



Сопо
ми ра
нарно
мере
движ
образ
Также
ной с
Отме
ных р
саши

Клю
нейш
уа си
вети

Б
С
дельн
назна
камер
ских
Моде
и по
разли
ческих
мичес

В с
татов
получ
поста
саций

Рис.
1 — с
устано
жарое

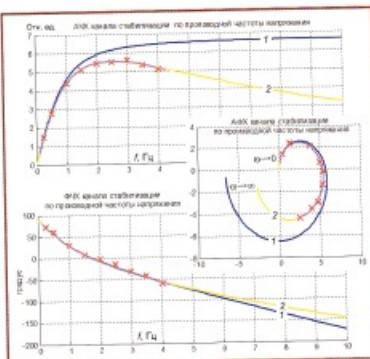


Рис. 8. Теоретические 1, экспериментальные и аппроксимированные 2 АЧХ, ФУХ и АФХ каналов стабилизации по производной частоты напряжения в линейном масштабе

определения передаточных функций каналов стабилизации цифровой модели АРВ. Методы аппроксимации экспериментальных данных [7] позволяют получить передаточные функции канала напряжения и каналов стабилизации по производным напряжения и частоты напряжения (см. рис. 1), дающие аппроксимированные частотные характеристики, практически совпадающие с аналогичными экспериментальными. Пример такого совпадения показан на рис. 8.

Верификация полученных математических моделей

Сопоставление работы АРВ и его математической модели проводится в замкнутой АСР при использовании тестового дуплексного сигнала V . Точное совпадение переходных процессов генерируемой мощности Р-Г1 и перетока мощности по линии Р-Л1-4 (см. рис. 6) возможно только в случае учёта влияния тиристорного преобразователя (ТП). При

отключённых каналах стабилизации это показано на рис. 9. Здесь кривые 1 характеризуют работу с учётом параметров ТП: синяя показывает переходные процессы при использовании АРВ, зелёная — при подключении математической модели АРВ. Кривая 2 соответствует работе модели без учёта влияния ТП.

Верификация полученной математической модели проводится в процессе сравнения сигналов на выходе каналов стабилизации по производным напряжения (см. рис. 1, точка 8) и частоты напряжения (точка 10) при использовании АРВ и его математической модели с применением тестового сигнала V (рис. 10). Наблюдается практически полное совпадение кривых.

Выводы

1. Для предварительного расчёта режимов сети необходимо иметь математическую модель микропроцессорного регулятора возбуждения. Получение ма-

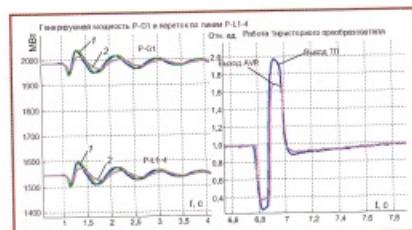


Рис. 9. Сравнение режимных параметров при использовании АРВ и его математической модели (каналы стабилизации отключены, тестовый сигнал V)

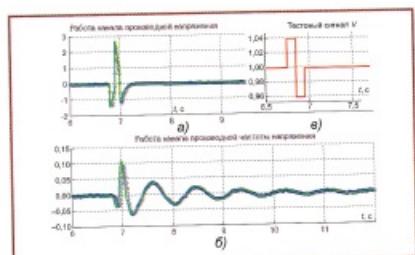


Рис. 10. Сравнение сигналов на выходе каналов стабилизации по производным напряжения (а) и частоты напряжения (б) при использовании АРВ (синие кривые) и его математической модели (зелёные кривые), тестовый сигнал V (красный)

тематических моделей АРВ должно проводиться в три этапа:

- экспериментальное определение частотных характеристик АРВ. Способ определения зависит от технических возможностей АРВ;

- определение по частотным характеристикам передаточных функций каналов. Различные методы аппроксимации позволяют получить по экспериментальным данным математическое описание кривых;

- верификация математической модели АРВ. Сравнение откликов режимных параметров на тестовые возмущения при использовании АРВ и его математической модели указывает на необходимость учёта всех элементов системы регулирования.

2. Программно-аппаратный комплекс RTDS позволяет исследовать различные способы экспериментального определения частотных характеристик необходимых элементов сетей и схем.

В статье рассмотрены четыре способа получения частотных характеристик АРВ, соответствующие различным условиям нашей работы, в том числе и без демонтажа. Во временной области модель АРВ, передаточные функции которой получены по экспериментальным частотным характеристикам, и микропроцессорный АРВ проявляют себя практически одинаково.

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. 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.
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. Логинов А. Г., Фадеев А. В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электросила» // Электротехника. 2001. № 9.
5. Бакалов В. П., Журавлева О. Б., Крук Б. И. Основы анализа цепей: Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия-Телеком, Радио и связь. 2007. — 591 с.
6. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Высшая школа. 2000. — 462 с.
7. Голубинский А. Н. Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей // Вестник Воронежского института МВД России. 2007. № 2.