

УДК 621.3.078

А.С. Зеленин, Д.А. Кабанов, А.Н. Кушнир, Й. Штефка

## Получение экспериментальных частотных характеристик автоматических регуляторов возбуждения в замкнутом контуре управления с использованием программно-аппаратного комплекса *Real Time Digital Simulator*

---

Предложена методика получения экспериментальных частотных характеристик автоматических регуляторов возбуждения при их функционировании в замкнутом контуре управления, который реализуется при помощи программно-аппаратного комплекса *Real Time Digital Simulator*. Показаны возможности комплекса для выполнения верификации математических моделей автоматических регуляторов возбуждения, разработки и оценки качества работы новых устройств и/или алгоритмов. Выполнена апробация методики и оценка точности получаемых экспериментальных частотных характеристик.

### **Ключевые слова:**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ, АРВ, ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЕРИФИКАЦИЯ, *REAL TIME DIGITAL SIMULATOR*, *RTDS*

### **I. Введение**

Обеспечение современных требований к надежности электроснабжения потребителей является важной задачей существования и развития электротехнической отрасли. Важную роль в вопросе повышения надежности электроснабжения потребителя играют исследования переходных электромеханических процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС). Основополагающими методами проведения таких исследований является применение физического и математического моделирования ЭЭС.

Математическое моделирование ЭЭС реализуется в программных пакетах, таких как *Eurostag* и *PSS/E*. Данные программные пакеты не позволяют вести расчет в «реальном времени». В последнее время появилась возможность создавать математические модели электроэнергетических систем, рассчитываемые в реальном времени, например на базе вычислительного комплекса *RTDS*.

Физическое моделирование является традиционным методом исследований процессов, происходящих в ЭЭС. В течение XX столетия было создано большое количество разнообразных электродинамических моделей (ЭДМ). Самыми известными ЭДМ в СССР были [1]:

1. ЭДМ Научно-исследовательского института постоянного тока (ЭДМ НИИПТ; современное название: цифро-аналого-физический комплекс ОАО «Научно-технический центр Единой энергетической системы» – ЦАФК ОАО «НТЦ ЕЭС»)<sup>1</sup>;
2. ЭДМ Московского энергетического института (МЭИ)<sup>2</sup>;
3. ЭДМ Института электромеханики Академии Наук СССР (ИЭМ АН СССР);
4. ЭДМ Водноэнергетического института АН Армянской ССР (ВЭНИ).

На сегодняшний день, специалистами ОАО «НТЦ ЕЭС» на ЦАФК накоплен большой экспериментально-исследовательский опыт, который используется как специалистами ОАО «НТЦ ЕЭС», так и специалистами других научных организаций.

В настоящий момент, одним из основных направлений работ, проводимых на ЦАФК, является испытание натуральных образцов регуляторов возбуждения, устанавливаемых на электрических станциях и исследование влияния их работы на характер протекания электромеханических переходных процессов в ЭЭС. Данные испытания проводятся в ОАО «НТЦ ЕЭС» с 2002 года (см. [2]). При этом можно выделить два основных направления работ:

1. Сертификационные испытания.
2. Выполнение работ по настройке автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) для конкретных схемно-режимных условий.

Первое направление включает в себя решение следующих задач:

1. непосредственно выполнение сертификационных испытаний АРВ (положительные выводы по итогам этих испытаний означают наличие экспериментально подтвержденной возможности АРВ адекватно функционировать в сложных и изменяющихся в широком диапазоне схемно-режимных условиях);
2. создание верифицированной математической модели АРВ. Создание математической модели и ее верификация производится на основе структурной схемы и частотных характеристик, предоставляемых разработчиком. В дальнейшем, модель может быть использована для выполнения расчетов в таких программных комплексах (ПК) как *Eurostag* (см. [3]).

Выполнение работ по второму направлению (настройка АРВ для конкретных схемно-режимных условий) начинается с выполнения расчетов переходных электромеханических процессов в программно-вычислительном комплексе *Eurostag*. Полученные при проведении расчетов результаты анализируются, и на их основе выбираются коэффициенты каналов

---

<sup>1</sup> Действует по настоящий момент и активно используется для выполнения исследований

<sup>2</sup> Действует по настоящий момент

регулирования АРВ. При расчетах используется математическая модель энергосистемы, которая включает в себя математические модели автоматических регуляторов возбуждения. Очевидно, что результат расчета зависит от адекватности моделирования элементов исследуемой энергосистемы, в частности, моделирования регуляторов возбуждения.

После проведения расчетов на математической модели, выбранные коэффициенты каналов регулирования АРВ проверяются на физической модели. Создание физической модели ЭЭС на основе эквивалентной математической модели зачастую требует реализации на одном или нескольких синхронных генераторах прилегающих станций различных законов управления возбуждением и/или мощностью, которые исходно не были предусмотрены при создании ЦАФК, и реализация которых с использованием аналоговой техники затруднительна. С целью преодоления указанной проблемы в ОАО «НТЦ ЕЭС» в 2012 году был разработан и в настоящий момент, активно используется программно-аппаратный комплекс формирования и реализации цифровых моделей регуляторов возбуждения и мощности энергоблоков (ПАК Регулятор, см. [4]). С целью подтверждения правильности заложенных в ПАК Регулятор программных принципов и математических методов, в этом же году, были проведены соответствующие исследования с использованием программно-аппаратного комплекса *RTDS* (см. [5]).

Из вышеизложенного следует, что вопрос верификации математических моделей АРВ, является крайне важной задачей. Данные модели необходимы при выполнении исследований как на математических моделях энергосистем (в ПК *EUROSTAG*, ПАК *RTDS*), так и при выполнении исследований на физических моделях ЭЭС (в составе ПАК Регулятор, на ЦАФК).

## **II. Постановка задачи**

Как было отмечено, на данный момент, верификация математических моделей автоматических регуляторов возбуждения производится на основе данных, предоставляемых разработчиками АРВ (частотные характеристики и структурная схема). ОАО «НТЦ ЕЭС» заинтересован в создании методики, позволяющей экспериментально проверять предоставляемые разработчиками данные. Оценка адекватности математической модели АРВ производится по результатам сравнения частотных характеристик (ЧХ) каналов регулирования натуральных образцов регуляторов, и соответствующих им математических моделей. Поэтому необходимо разработать метод получения ЧХ каналов регулирования АРВ.

Снятие ЧХ каналов регулирования натуральных образцов регуляторов возбуждения является сложной технической задачей, т.к.:

1. входные сигналы каналов регулирования по напряжению, частоте и мощности подаются в виде *мгновенных* значений токов и напряжений;

2. в большинстве моделей АРВ не предусмотрен автономный режим работы, т.е. режим работы с разомкнутым контуром регулирования;
3. в ряде моделей регуляторов, входные параметры каналов регулирования могут определяться косвенно, например ток возбуждения генератора не измеряется непосредственно, а вычисляется из измеренных токов питания тиристорного моста.

Для преодоления вышеописанных трудностей было предложено производить снятие ЧХ каналов регулирования АРВ в процессе его нормальной работы в замкнутой системе (режиме регулирования напряжения на шинах синхронного генератора). Принципиально реализовать указанную замкнутую систему можно как на ЦАФК, так и на *RTDS*. Предпочтение было отдано ПАК *RTDS*, т.к. только в условиях математической модели можно полностью избавиться от большого многообразия нелинейных физических свойств (насыщение генераторов, трансформаторов, неоднородность воздушного зазора и т.д.) и исключить инерционность ряда элементов.

Таким образом, авторами статьи, была разработана методика, включающая в себя использование ПАК *RTDS*, персонального компьютера с платой АЦП/ЦАП и программы «*FreqChar*».

### III. Описание методики

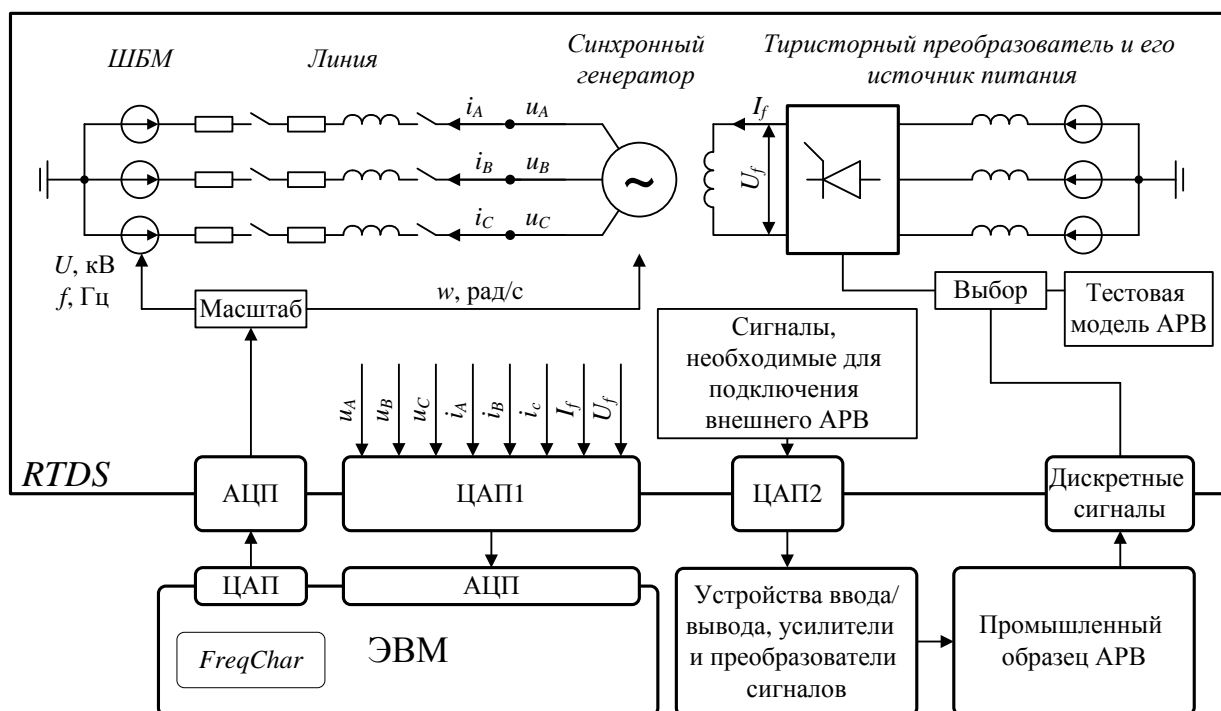
В ПАК *RTDS* реализована математическая модель простейшей ЭЭС «Машина-Линия-ШБМ», а также математическая модель тиристорной независимой системы возбуждения синхронного генератора. Схема данной модели изображена на рисунке 1. Реализованная в *RTDS* модель энергосистемы обладает следующими особенностями:

1. в модели синхронного генератора скорость и угол ротора являются независимым параметром, задаваемым пользователем. В такой модели мощность машины зависит от угла между внутренней ЭДС и напряжением статора;
2. используется модель синхронного генератора без насыщения;
3. шины бесконечной мощности моделируются трехфазным источником синусоидальной ЭДС с возможностью изменения амплитуды и частоты напряжения по заданному закону;
4. линия электропередач моделируется П-образной схемой замещения.

Необходимые для конкретной модели АРВ параметры моделируемой энергосистемы (мгновенные значения токов и напряжений) выводятся на плату ЦАП2 *RTDS*. Выходные сигналы ЦАП2 подаются на усилители тока и напряжения. Выходы усилителей тока и напряжения подключаются к испытываемому АРВ. Выходные дискретные сигналы регулятора возбуждения подается на плату цифрового ввода *RTDS* (*Дискретные сигналы*) (см. рисунок 1) . Также имеется возможность принимать от испытываемого АРВ аналоговый выходной сигнал. В этом случае используется плата аналогового ввода *RTDS* и математическая модель формирователя импульсов (СИФУ).

После подключения регулятора к ПАК *RTDS*, начинается расчет в математической модели энергосистемы. *RTDS* производит расчет всех параметров математической модели «в реальном времени», и соответствующие значения мгновенных токов и напряжений поступают на входы регулятора возбуждения, а сигнал выхода регулятора поступает на модель системы возбуждения генератора. Таким образом, осуществляется симуляция работы АРВ в реальной энергосистеме.

Последним этапом подготовки к снятию частотных характеристик регулятора возбуждения является настройка масштабов регулятора и выставление номинального режима синхронного генератора, моделируемого на *RTDS*.



**Рисунок 1 – Схема проведения экспериментов по получению экспериментальных частотных характеристик**

Снятие частотных характеристик каналов регулирования АРВ производится с помощью разработанной в ОАО «НТЦ ЕЭС» программы «*FreqChar*», установленной на персональный компьютер (см. рисунок 1). Программа «*FreqChar*», формирует синусоидальный сигнал заданной частоты  $f_m$  и подает его на ЦАП, установленный в ПК. С выхода ЦАП сигнал подается на плату АЦП *RTDS*. В *RTDS* сигнал масштабируется и может быть подан на любой из трех входов:

1. вход управления частотой напряжения ШБМ;
2. вход управления амплитудой напряжения ШБМ;
3. вход управления угловой скоростью вращения ротора синхронного генератора.

Таким образом, возможно осуществлять модуляцию по амплитуде напряжения, частоте напряжения и угловой скорости ротора. Следует

отметить, что при модуляции по частоте, сигнал подается одновременно на вход управления частотой напряжения ШБМ и на вход управления угловой скоростью генератора. Делается это для того, чтобы угол нагрузки генератора оставался неизменным.

Современные регуляторы возбуждения могут содержать следующие каналы регулирования:

1. Канал по отклонению напряжения;
2. Канал по производной напряжения;
3. Канал по отклонению частоты напряжения;
4. Канал по производной частоты напряжения;
5. Канал по производной тока ротора;
6. Канал по активной мощности генератора;
7. Канал по угловой скорости ротора генератора.

Для примера, рассмотрим получение ЧХ канала по отклонению напряжения. Все каналы регулирования АРВ, кроме исследуемого, отключаются. Затем, программа «*FreqChar*» подает модулирующий сигнал в течение заданного пользователем времени. При этом, в параметрах ЭС появляются колебания близкие к синусоидальным, с частотой модуляции  $f_m$ . Программа «*FreqChar*» записывает мгновенные значения следующих параметров:

1. Фазные напряжения статора ( $u_A, u_B, u_C$ );
2. Фазные токи статора ( $i_A, i_B, i_C$ );
3. Ток обмотки возбуждения ( $I_f$ );
4. Напряжение обмотки возбуждения ( $U_f$ );
5. Угловая скорость вращения ротора ( $\omega$ );

По прошествии заданного времени «*FreqChar*» заканчивает подачу модулирующего сигнала и запись значений параметров ЭС.

Канал регулирования АРВ представляет собой линейное звено. По определению, амплитудно-частотная характеристика линейного звена – это зависимость отношения амплитуд выходного и входного синусоидальных сигналов от частоты входного сигнала. Фазово-частотная характеристика – это зависимость разности фаз входного и выходного синусоидальных сигналов от частоты входного сигнала. Программа «*FreqChar*» вычисляет из записанных мгновенных фазных напряжений статора действующее напряжение статора, выделяет в нем основную гармонику, относительно частоты модуляции  $f_m$ , разложением в ряд Фурье и записывает амплитуду и фазу данной гармоники. Точно также «*FreqChar*» определяет амплитуду и фазу основной гармоник, относительно частоты  $f_m$ , напряжения возбуждения генератора. Программа вычисляет отношение амплитуд и разность фаз определенных гармоник, таким образом, получая одну точку ЧХ канала отклонения напряжения АРВ. При этом мы вводим два допущения:

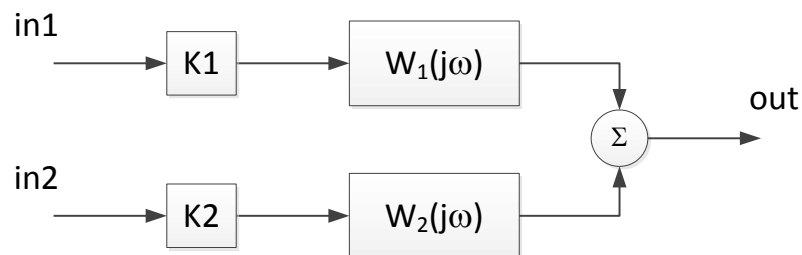
1. Мы считаем, что фаза выделенной основной гармоники напряжения возбуждения равна фазе сигнала выхода АРВ, а амплитуда выделенной основной гармоники напряжения

возбуждения равна амплитуде сигнала выхода АРВ умноженному на некоторый постоянный коэффициент.

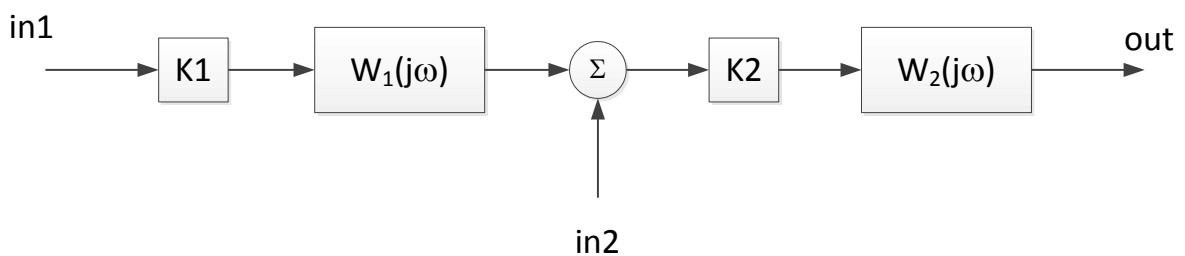
- Мы считаем, что программа «*FreqChar*» измеряет все параметры ЭС идеально.

Как показала апробация методики, данные допущения приемлемы для интересующего нас диапазона частот. Для получения остальных точек ЧХ необходимо повторить опыт с другой частотой модуляции. Аналогично снимаются ЧХ для других каналов АРВ.

В некоторых случаях один или несколько каналов АРВ отключить нельзя. Например, канал по отклонению напряжения должен всегда оставаться в работе. При этом возможны два варианта: параллельное соединение каналов и последовательное (см. рисунок 2 и рисунок 3).



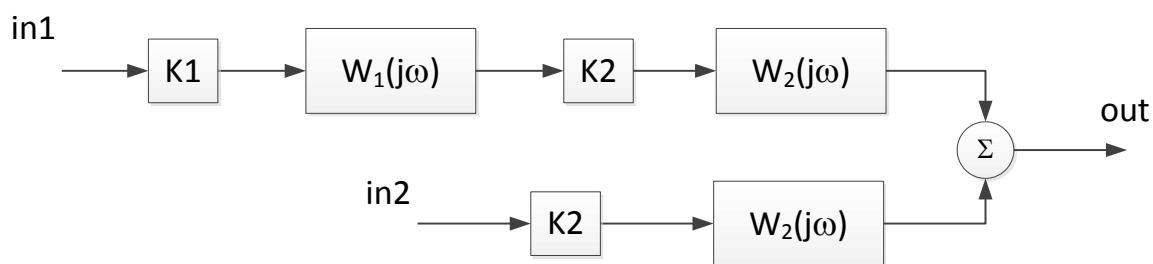
**Рисунок 2 – параллельное соединение каналов регулирования АРВ**



**Рисунок 3 – последовательное соединение каналов регулирования АРВ**

Чтобы получить ЧХ двух параллельно соединенных каналов, необходимо провести два опыта с различными коэффициентами усиления  $K1$  и  $K2$  (см. рисунок 2). Из полученных данных программа «*FreqChar*» вычисляет частотные характеристики обоих каналов, решая систему из двух уравнений с двумя неизвестными. Из теории автоматического управления известно, что схему изображенную на рисунке 3 можно преобразовать в виду схемы изображенной на рисунке 2. Таким образом, мы имеем два параллельно соединенных канала (см рисунок 4). ЧХ этих каналов мы можем получить с помощью способа описанного выше. Чтобы найти ЧХ звена  $K1*W1(j\omega)$ , необходимо поделить ЧХ первого канала, на ЧХ второго канала.

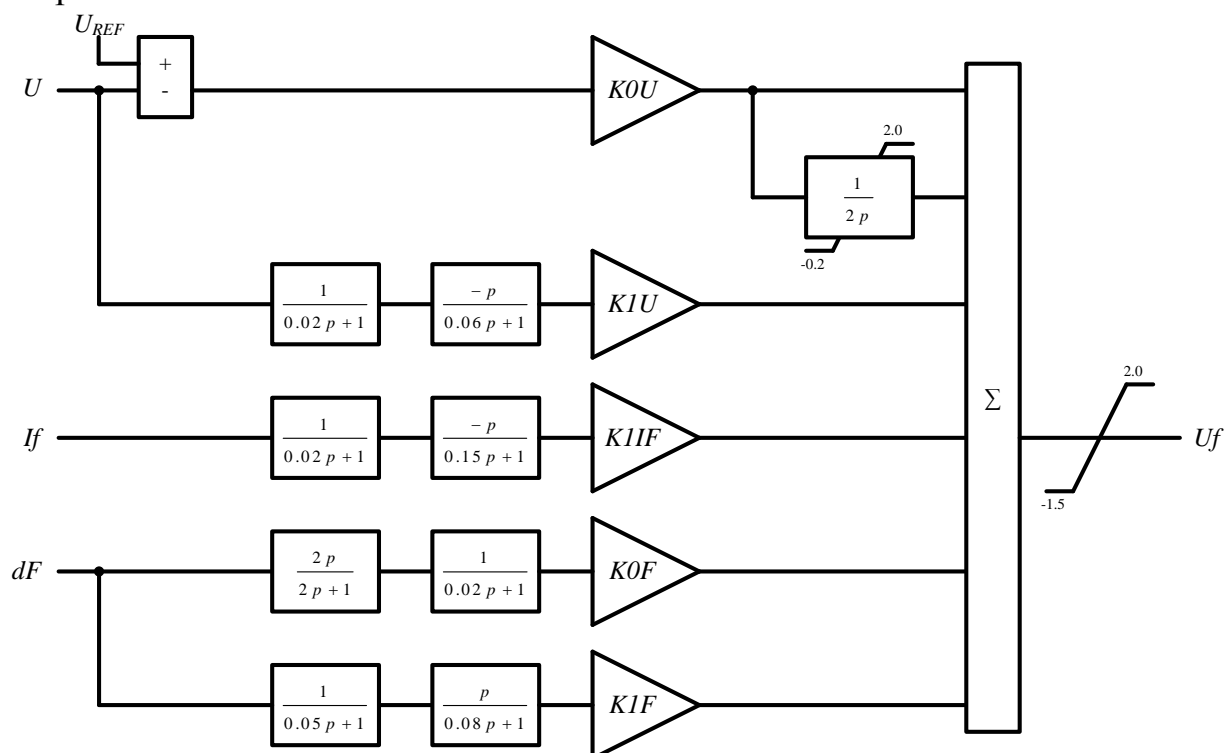
Если в АРВ включены три или более каналов регулирования, то их ЧХ находятся аналогично.



**Рисунок 4 – преобразованная структурная схема**

#### **IV. Апробация предложенной методики**

Описанная методика была апробирована путем получения частотных характеристик заданной в ПАК *RTDS* математической модели АРВ (см. рисунок 4) и сравнения результатов экспериментальных ЧХ и ЧХ, рассчитанных в соответствии с передаточными функциями каналов регулирования. На рисунках 6-8, в качестве примера показаны экспериментальные ЧХ канала регулирования по напряжению (пропорционально-интегральный канал), канала регулирования по производной напряжения и канала регулирования по производной частоты напряжения и их теоритические ЧХ. Там же изображена относительная комплексная погрешность. Как видно из рисунков, погрешность определения не превышает 5 %.

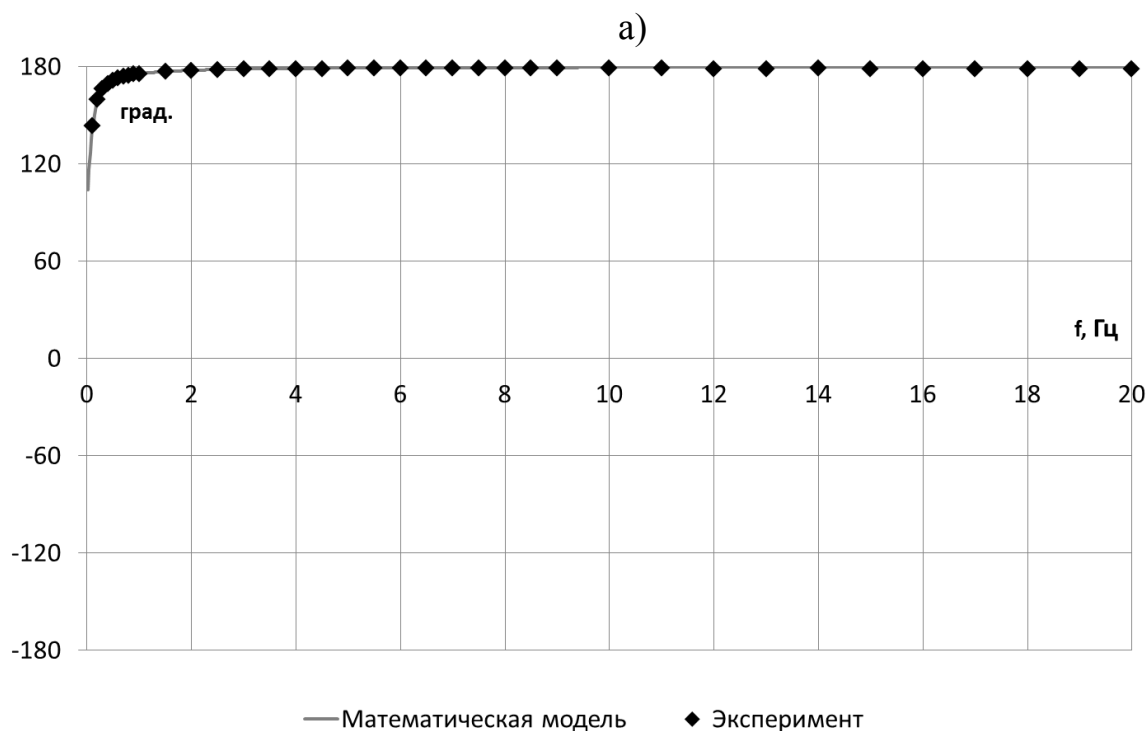
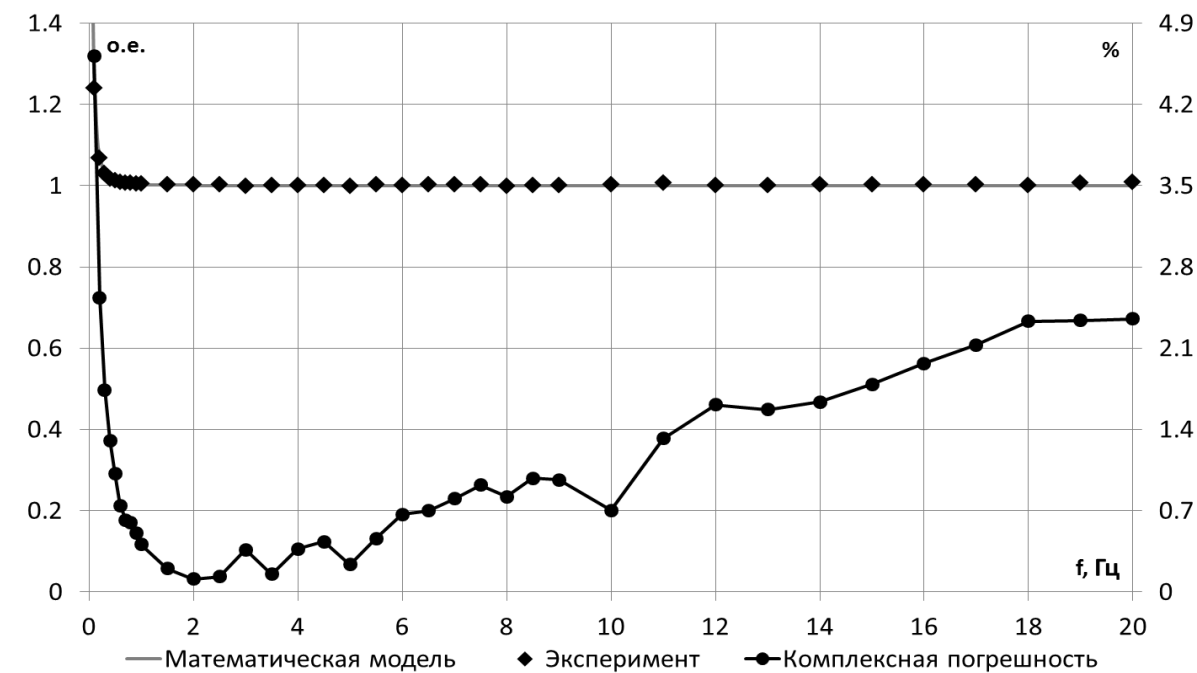


**Рисунок 5 – Математическая модель АРВ, созданная для апробации методики и программы получения экспериментальных частотных характеристик**

*Примечание:  $p$  – оператор Лапласа;  $dF$  – отклонение частоты статора генератора;  $K0U$  – коэффициент усиления по отклонению напряжения*

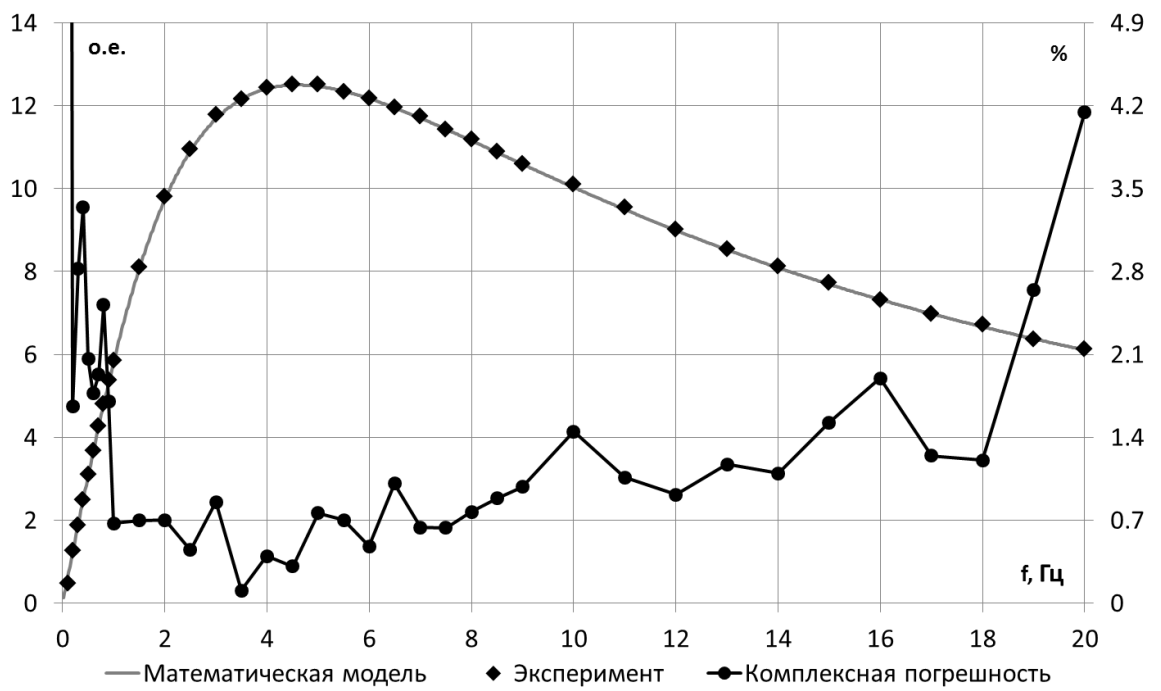


статора;  $KIU$  – коэффициент усиления по производной напряжения статора;  $KIIF$  – коэффициент усиления по производной тока ротора;  $KOF$  – коэффициент усиления по отклонению частоты напряжения статора;  $KIF$  – коэффициент усиления по производной частоты напряжения статора;

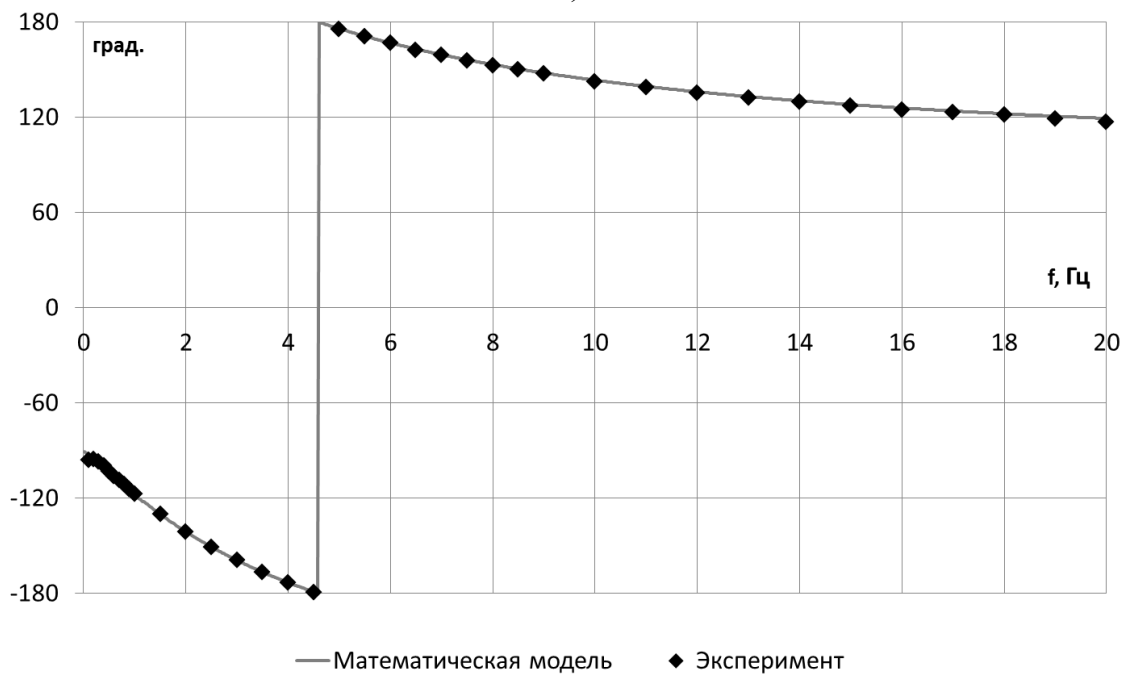


б)

**Рисунок 6 – АЧХ и ФЧХ пропорционально-интегрального канала регулирования АРВ**

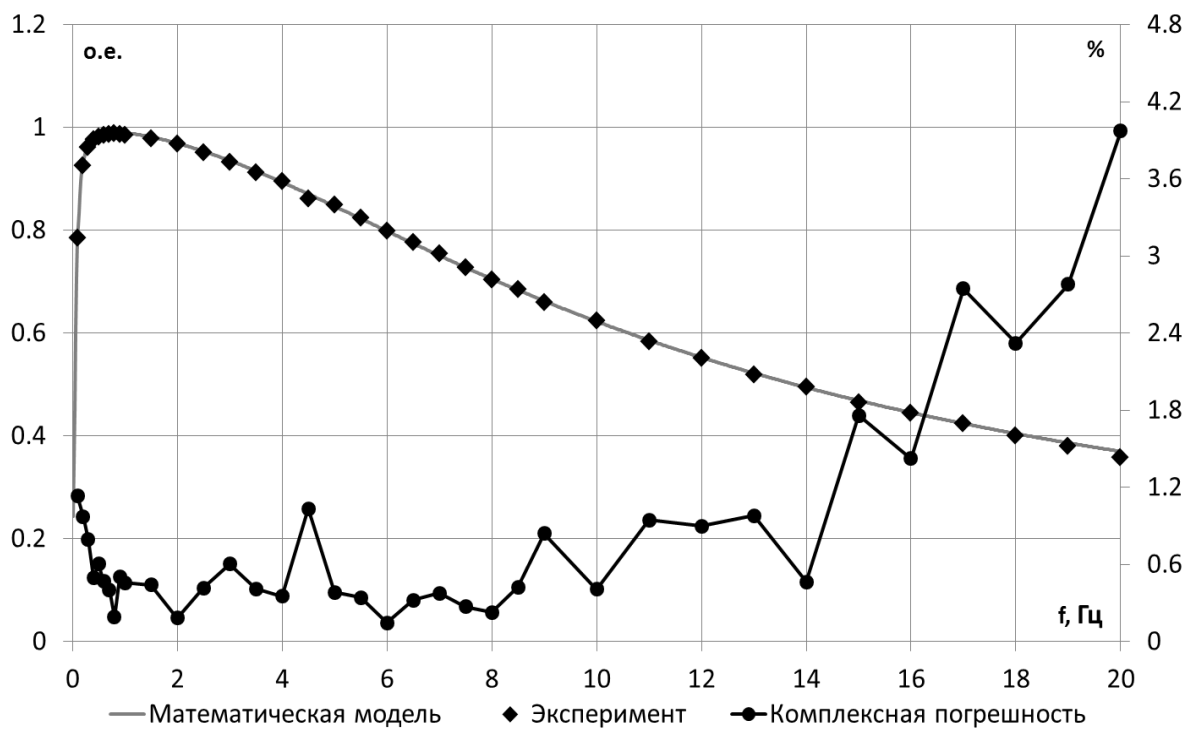


а)

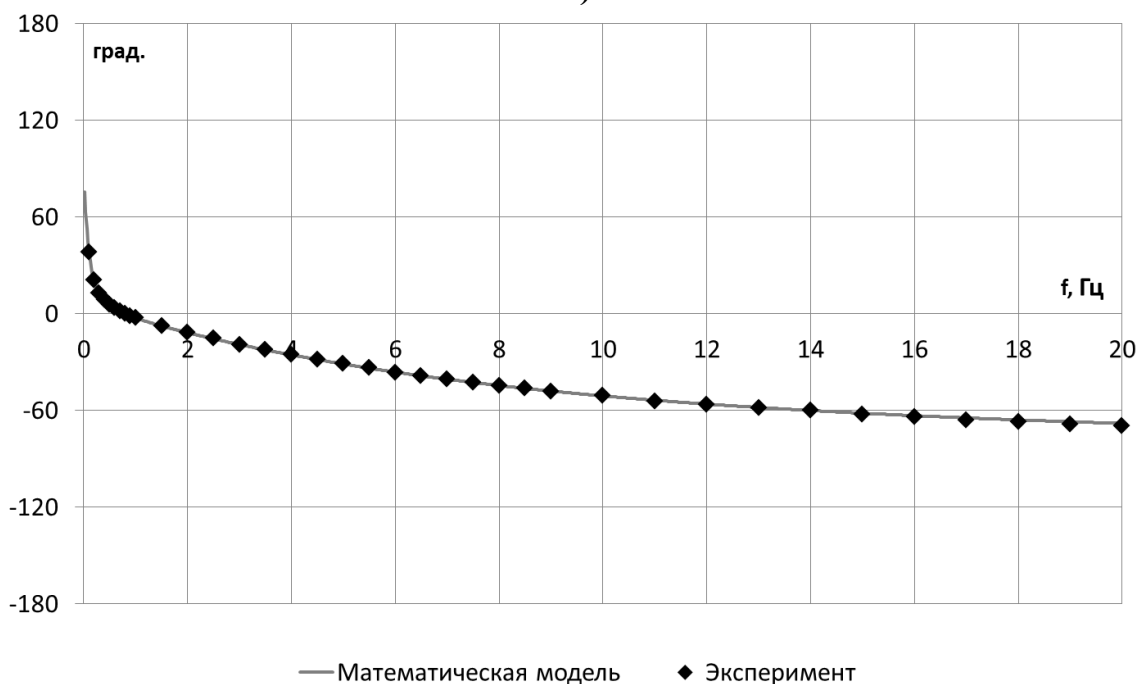


б)

**Рисунок 7 – АЧХ и ФЧХ канала регулирования по производной напряжения АРВ**



а)



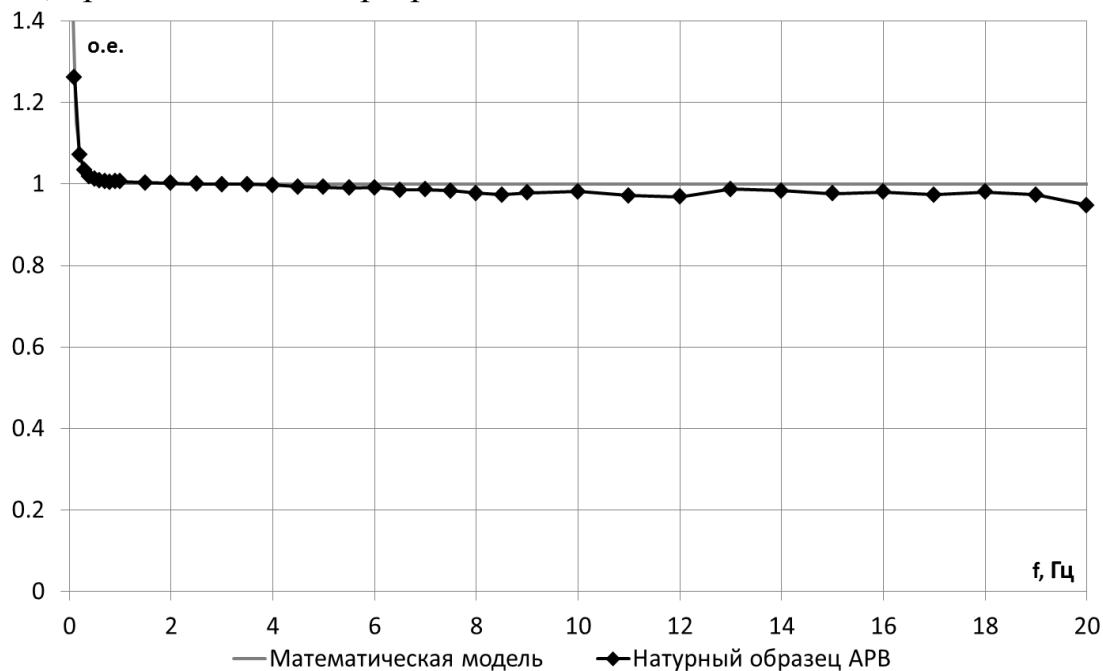
б)

**Рисунок 8 – АЧХ и ФЧХ канала регулирования по отклонению частоты напряжения АРВ**

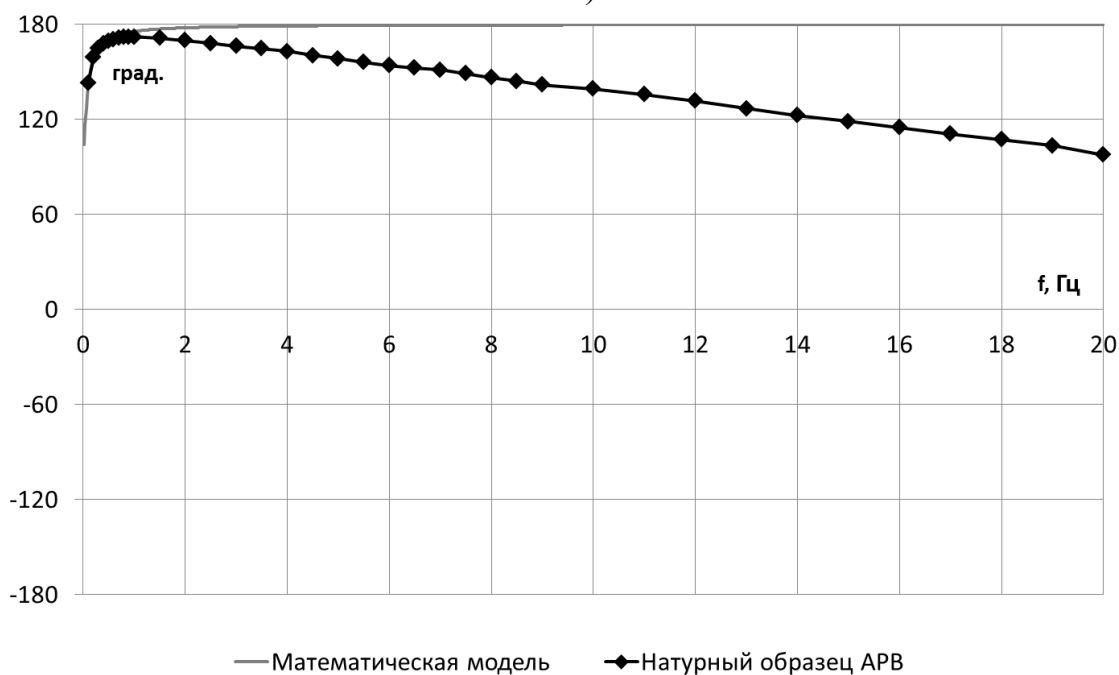
## V. Некоторые результаты и их анализ

С помощью разработанной методики в ОАО «НТЦ ЕЭС» были получены ЧХ каналов регулирования нескольких регуляторов возбуждения.

На рисунках 9-11 изображены ЧХ каналов регулирования натурального образца АРВ и его математической модели, созданной на основе технического описания, предоставленного разработчиком

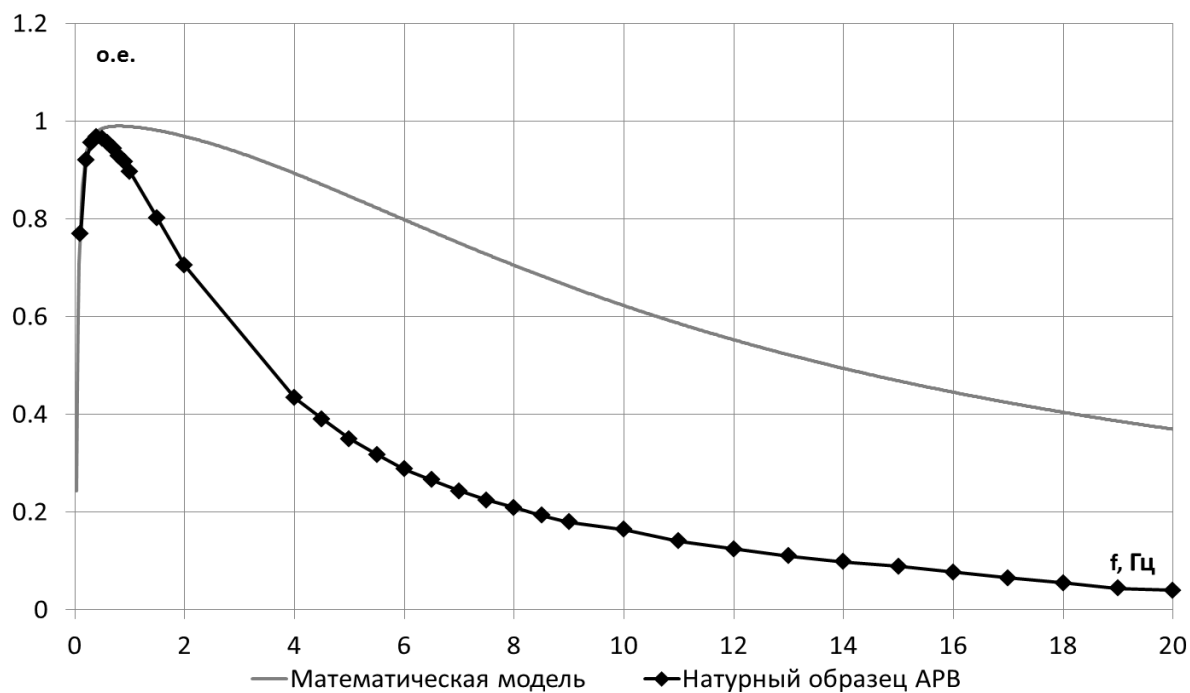


а)

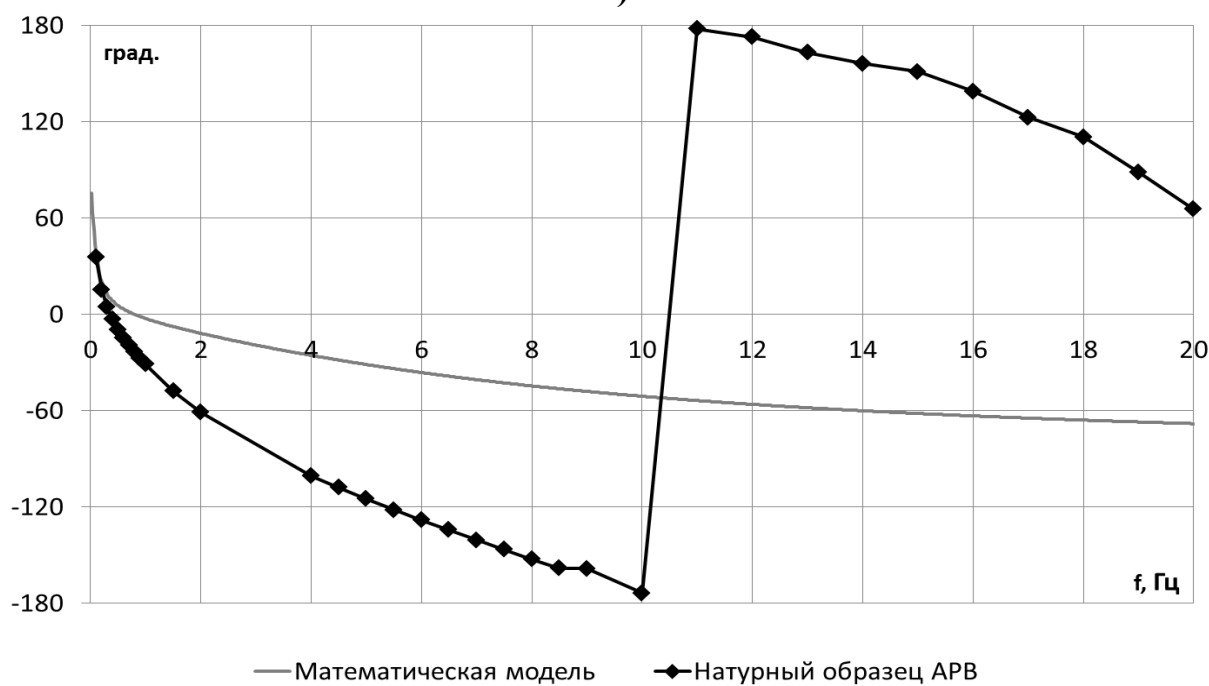


б)

**Рисунок 9 – АЧХ и ФЧХ канала регулирования по отклонению напряжения натурального образца АРВ**

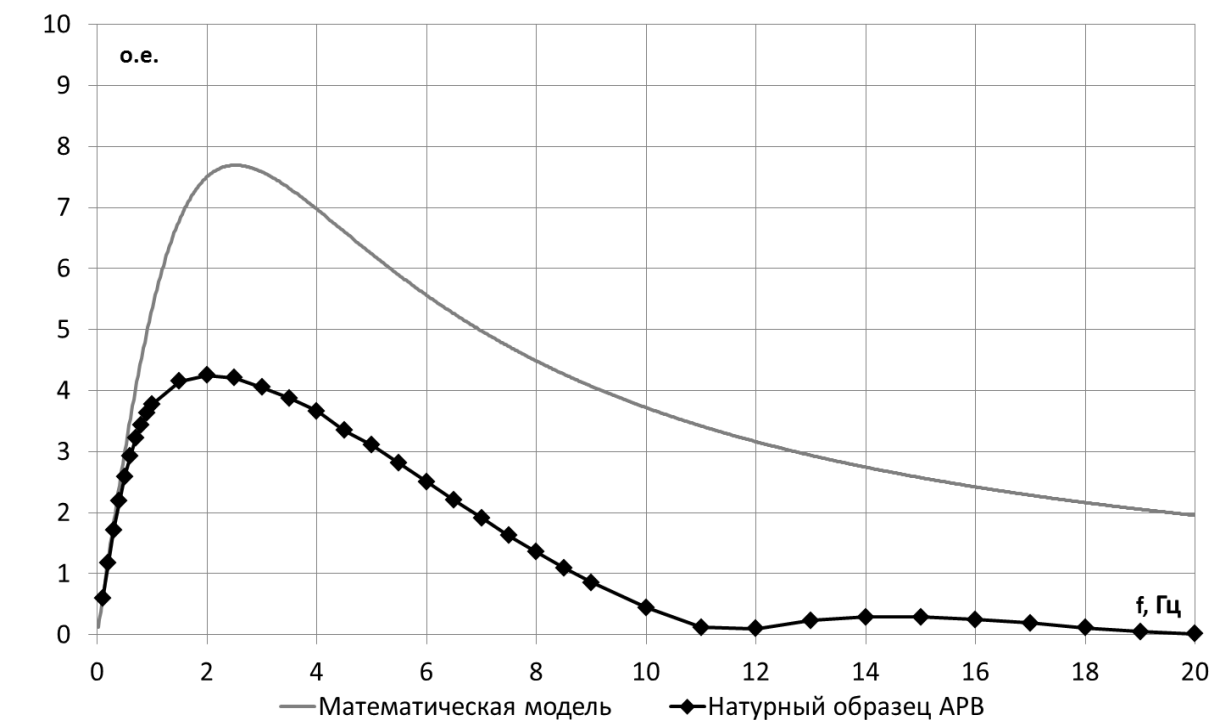


а)

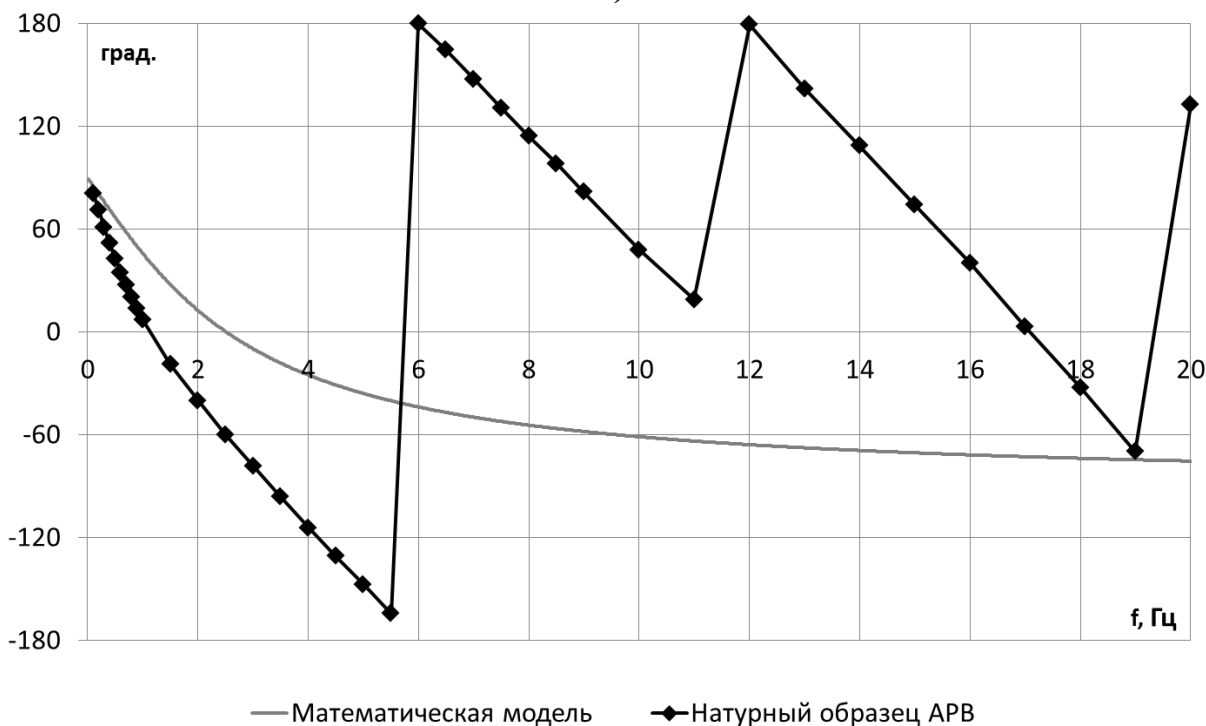


б)

**Рисунок 10 – АЧХ и ФЧХ канала регулирования по отклонению частоты напряжения натурального образца АРВ**



а)



б)

**Рисунок 11 – АЧХ и ФЧХ канала регулирования по производной частоты напряжения натурального образца АРВ**

Как видно из приведенных рисунков, ЧХ каналов регулирования натурального образца АРВ и математической модели могут сильно различаться даже в диапазоне частот 0-3 Гц. Данные различия обычно связаны с тем, что в техническом описании не всегда корректно учитываются динамические характеристики цифровой обработки сигналов.

Настоящая методика может в дальнейшем использоваться для совершенствования и проверки существующих математических моделей АРВ, применимых для расчетов электромеханических переходных процессов.

## **VI. Выводы:**

1. Экспериментальные частотные характеристики АРВ могут быть получены по предложенной авторами методике.
2. ПАК *RTDS* может быть использован для получения частотных характеристик АРВ и верификации математических моделей АРВ.
3. Описанная методика и комплекс *RTDS* могут быть использована для создания уточненных математических моделей АРВ.

### **Список использованных источников:**

1. Электродинамическое моделирование энергетических систем / под ред. Костенко М.П. – Москва-Ленинград: издательство Академии Наук, 1959. – 408 с.
2. Гущина Т.А., Зеккель А.С., Кирьенко Г.В., Логинов А.Г., Пинчук Н.Д., Фадеев А.В., Левандовский А.В., Перельман И.Ф. Комплексные испытания микропроцессорных регуляторов возбуждения типа АРВ-М для гидрогенераторов Саяно-Шушенской ГЭС в схеме ОЭС Сибири на физической модели НИИПТ. Сб. докладов открытой Всероссийской научно-технической конференции «Управление режимами Единой энергосистемы России». М.: ЭНАС, 2002.
3. Герасимов А.С., Есипович А.Х., Смирнов А.Н., Сорокин Д.В., Штефка Й. Разработка цифровых моделей отечественных и зарубежных АРВ и методика из верификации. Известия НИИ Постоянного тока. Научный сборник № 63. Санкт-Петербург – 2008 год.
4. Зеленин А.С., Шескин Е.Б., Штефка Й., Программно-технический комплекс для формирования и реализации цифровых моделей регуляторов возбуждения и мощности энергоблоков // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФу, 2012 – С. 238 – 243.
5. Руководство пользователя [Текст]: отчет по инновационному проекту «Разработка программного комплекса формирования и реализации цифровых моделей энергоблоков и регуляторов возбуждения и мощности энергоблоков» / «НТЦ ЕЭС»; рук. Штефка Й., исполн.: Зеленин А.С. [и др.] – СПб, 2013. – 129 с., Инв. № 773-КТ.