Научно-технический центр Единой энергетической системы

Испытания устройств синхронизированных векторных измерений и концентраторов синхронизированных векторных данных на *RTDS*

Старший научный сотрудник отдела электроэнергетических систем НИО-3, АО «НТЦ ЕЭС»

Зеленин А.С.

Система мониторинга переходных режимов в ЕЭС России

В настоящее время введен в действие стандарт АО «СО ЕЭС» «Релейная защита и автоматика. Система мониторинга переходных режимов. Нормы и требования» (СТО 59012820.29.020.001-2019), целью которого является развитие технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ).

В свою очередь основообразующим оборудованием технологии СВИ являются устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ, *PMU – Phasor Measurement Unit*) и концентраторы синхронизированных векторных данных (КСВД, *PDC – Phasor data concentrator*).

Оба типа устройств могут быть сертифицированы в системе добровольной сертификации «СО ЕЭС». Органом по добровольной сертификации устройств УСВИ и КСВД является АО «НТЦ ЕЭС».

На данный момент основные требования к УСВИ регламентируются стандартом СТО 59012820.29.020.011-2016, требования к КСВД – стандартом СТО 59012820.29.020.003-2018.

На основе перечисленных документов готовятся к выходу государственные стандарты.

RTDS в АО «НТЦ ЕЭС»

Основные количественные характеристики:

- *RTDS* предыдущего поколения – 2 стойки, включающие 7 расчетных плат *PB*5 и полностью настроенные на совместную работу;
- *RTDS* на платформе ***NOVACOR*** с шестью процессорами;
- устройства, обеспечивающие ***GPS*-синхронизацию**, реализацию протоколов ***SV*** (МЭК 61850-9-2), ***GOOSE*** (МЭК 61850-8-1), ***C*37.118.1**, ***IEC*-104** (МЭК-60870-5-104) и проверку устройств, работающих по этим протоколам;

RTDS лаборатории испытаний АО «НТЦ ЕЭС»

Подключение внешнего оборудования с помощью дискретных и аналоговых сигналов:

- 120 каналов по напряжению (вывод ± 10В);
- 36 каналов по напряжению (ввод ± 10В)
- 42 канала по напряжению (вывод 100В или более);
- 39 каналов по току (вывод 1/5 А);
- 96+48/96+48 дискретных сигнала (ввод/вывод);
- 32 сигналов типа «сухой контакт» (ввод/вывод).

Испытательный стенд для сертификации УСВИ и проверки УСВИ в части измерения параметров системы возбуждения

Условия проведения эксперимента (автоматизированная подготовка)

Запись осциллограммы *CSV* с СВИ (10 с – 1 мин.)

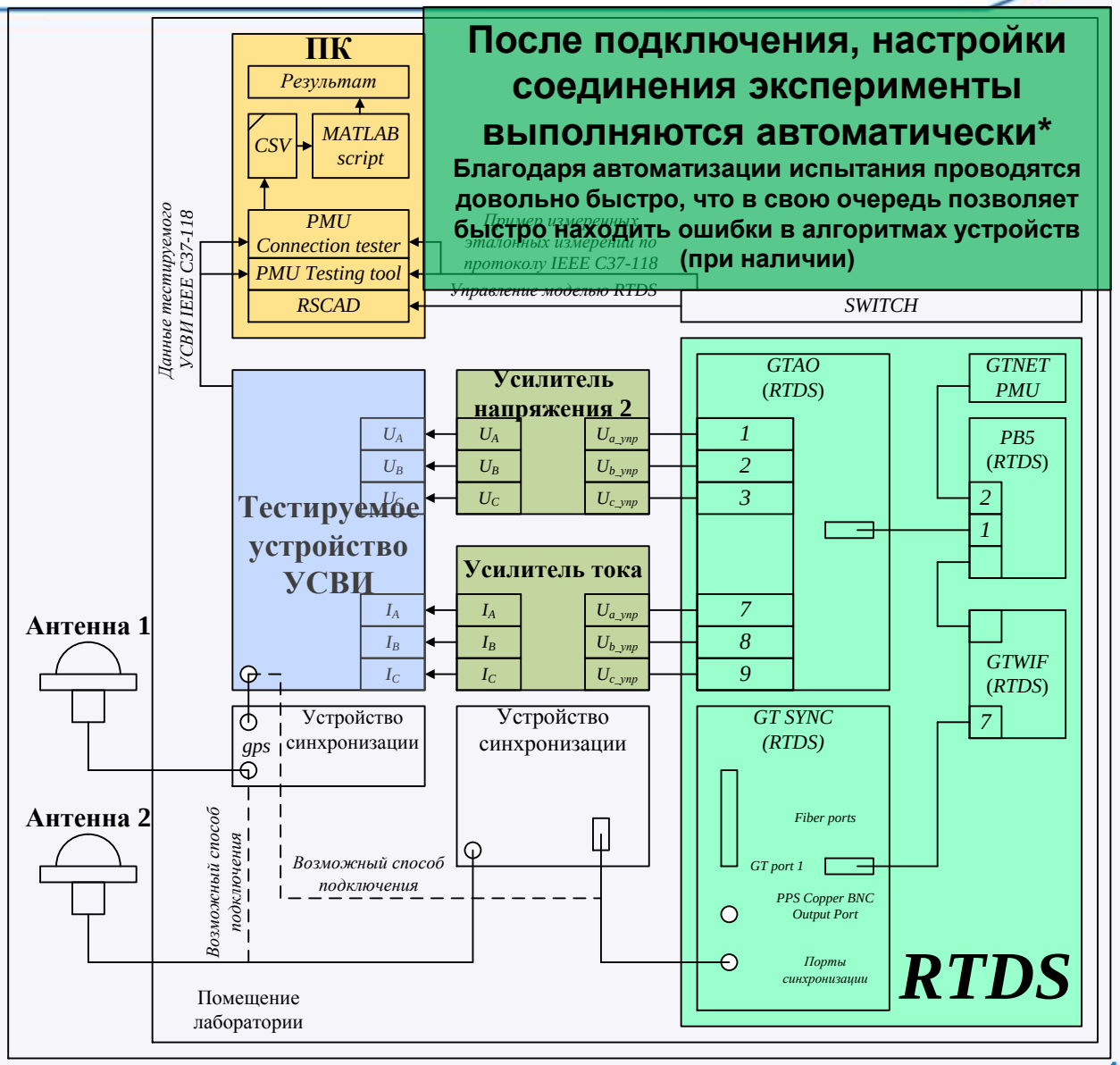
Обработка записанной осциллограммы ≈ (30 с)

Результаты выполнения эксперимента в графическом виде

Следующий эксперимент

После подключения, настройки соединения эксперименты выполняются автоматически*

Благодаря автоматизации испытания проводятся довольно быстро, что в свою очередь позволяет быстро находить ошибки в алгоритмах устройств (при наличии)



* Оператор может прервать автоматический процесс, повторить эксперимент (при необходимости)

Измерение переменных сигналов

Существующая в СТО 59012820.29.020.011-2016 (требования к УСВИ) методика испытаний повторяет все основные эксперименты, описанные в зарубежных стандартах *C*37.118.xxx.

Основные эксперименты программы испытаний:

«статические условия»:

- измерение сигналов с различным значением частоты;
- измерение сигналов с различным значением амплитуды (проверка измерительного диапазона);
- измерение сигналов, содержащих гармоники и интергармоники.

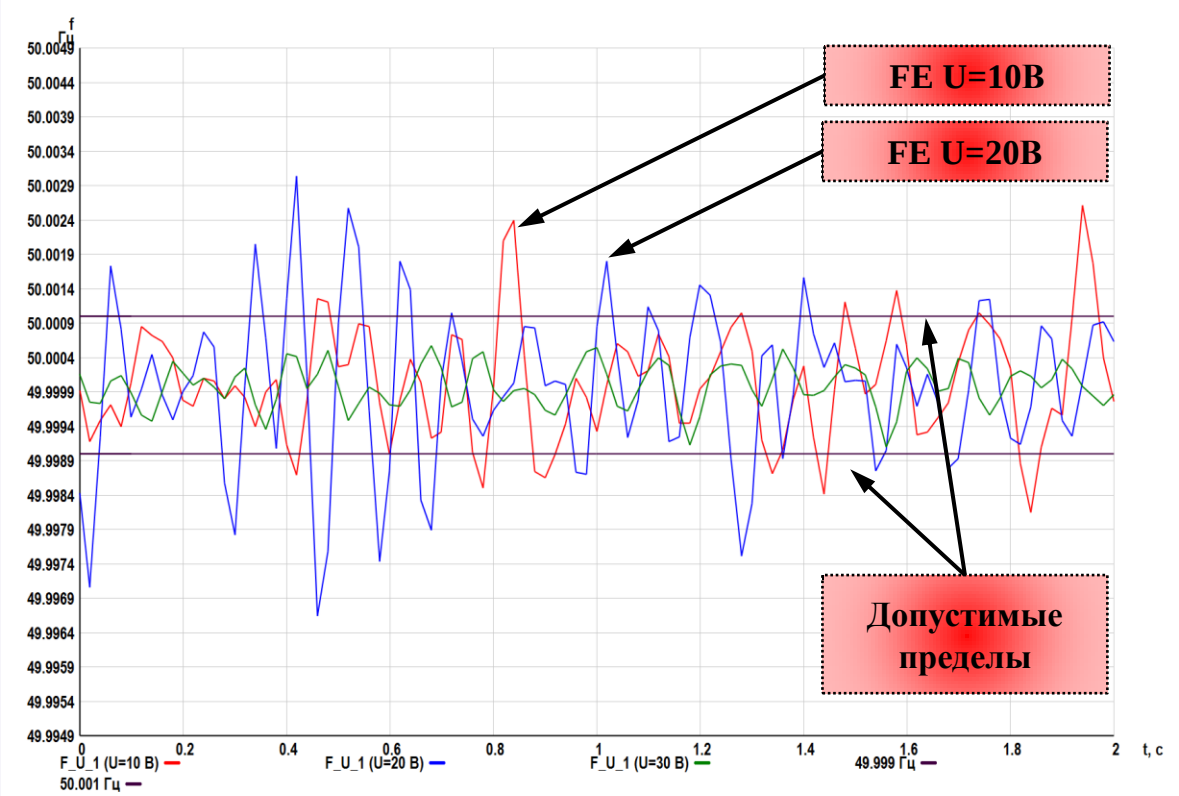
«динамические условия»:

- измерение сигналов с амплитудной модуляцией;
- измерение сигналов с фазной модуляцией;
- измерение сигналов с ступенчатым изменением амплитуды, ступенчатым изменением фазы;
- измерение сигналов с линейно изменяющейся частотой.

Измерение переменных сигналов. Эксперименты, для выполнения которых требовалась коррекция алгоритмов

По опыту проведения исследований коррекция измерительных алгоритмов требовалась в следующих экспериментах:

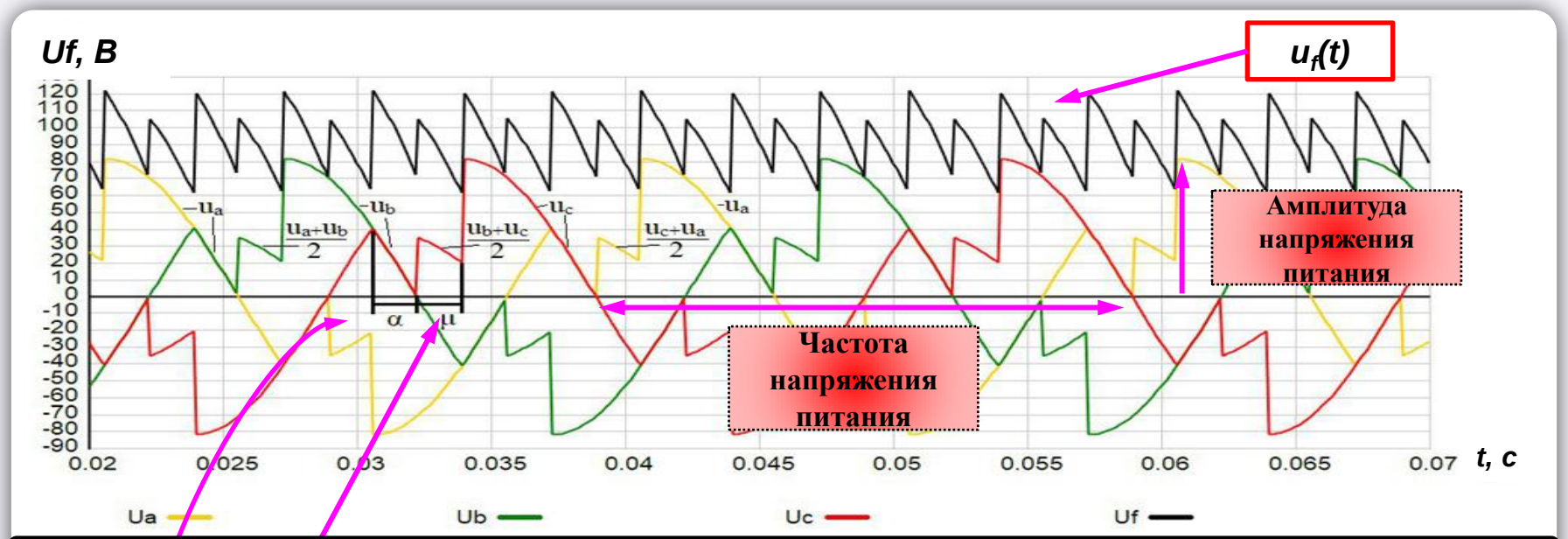
- измерение сигналов с различной амплитудой (при минимальных значениях амплитуды погрешность измерения частоты напряжения превышала допустимые пределы);
- измерение сигналов с гармониками (с номерами гармоник от 10-ой и выше).



Погрешности измерения частоты *FE* при различных значениях амплитуды входного сигнала

Измерение параметров системы возбуждения. Формирование сигнала напряжения тиристорного преобразователя – напряжения возбуждения

Для проверки измерений нужен полностью детерминированный сигнал. **Стандартные модели**, существующие в *RTDS* и реализующие моделирование преобразовательной техники, **не подходят** ввиду особенностей реализации в симуляторе расчета цепей с преобразовательной техникой.



Создано математическое описание, реализующее расчет параметров системы возбуждения

Угол погасания →
Угол зажигания →
Амплитуда →
Частота →

$u_a(t)$
$u_b(t)$
$u_c(t)$

→ **Переключение**
$\pm u_{ab}(t), \pm u_{bc}(t),$
$\pm u_{ab}(t),$
$\pm u_{abc}(t), \pm u_{bca}(t),$
$\pm \underline{u}_{cab}(t)$ *

→ $u_f(t)$

* $u_{abc}(t)=0.5(u_a(t) + u_b(t)) - u_c(t)$

Измерение постоянных сигналов

Основные эксперименты программы испытаний:

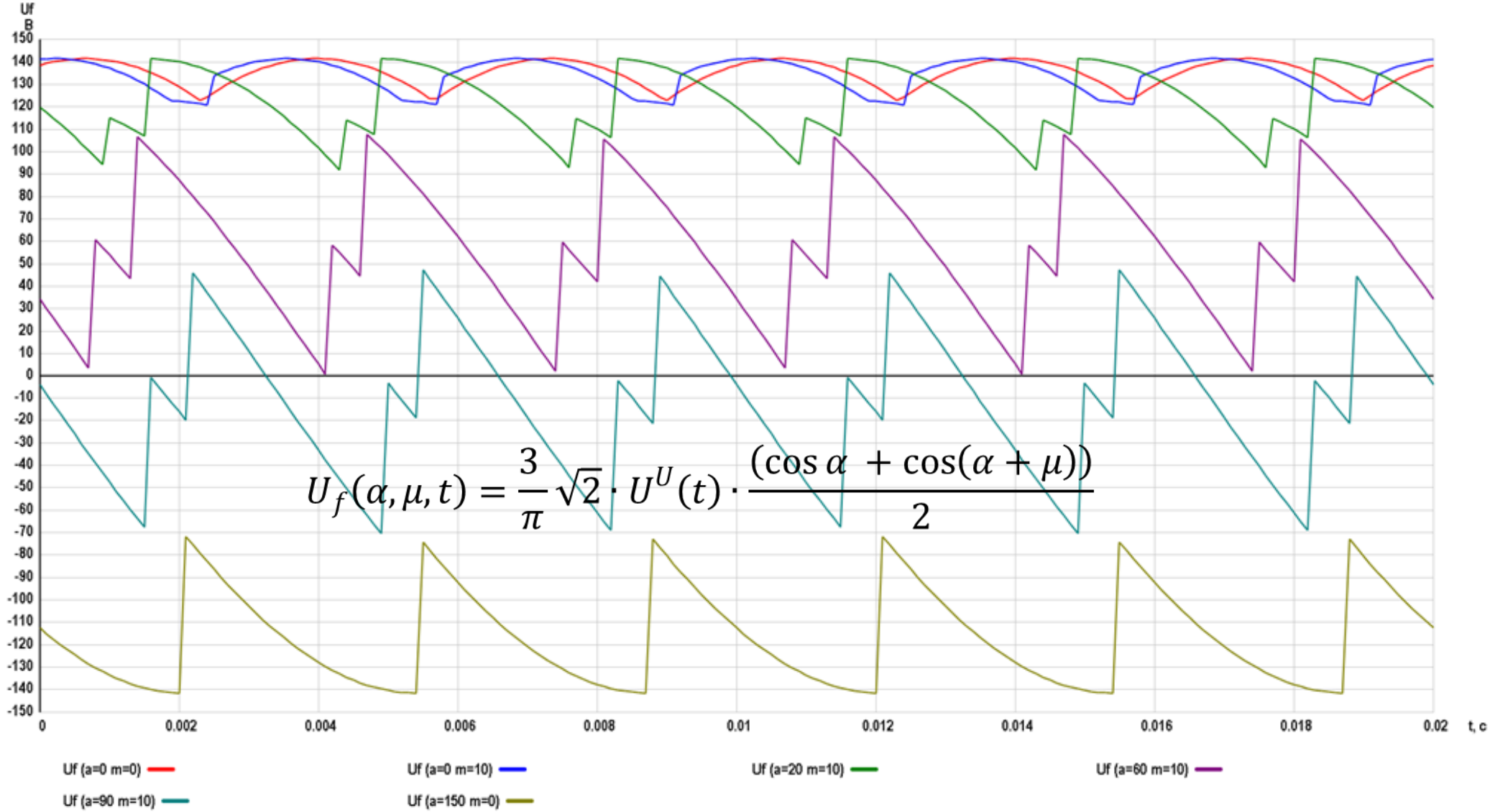
«статические условия»:

- измерение напряжения возбуждения при различных значениях угла зажигания и угла коммутации;
- измерение тока возбуждения (проверка диапазона измерений);
- измерение напряжения возбуждения при различной частоте напряжения электропитания тиристорного моста.

«динамические условия»:

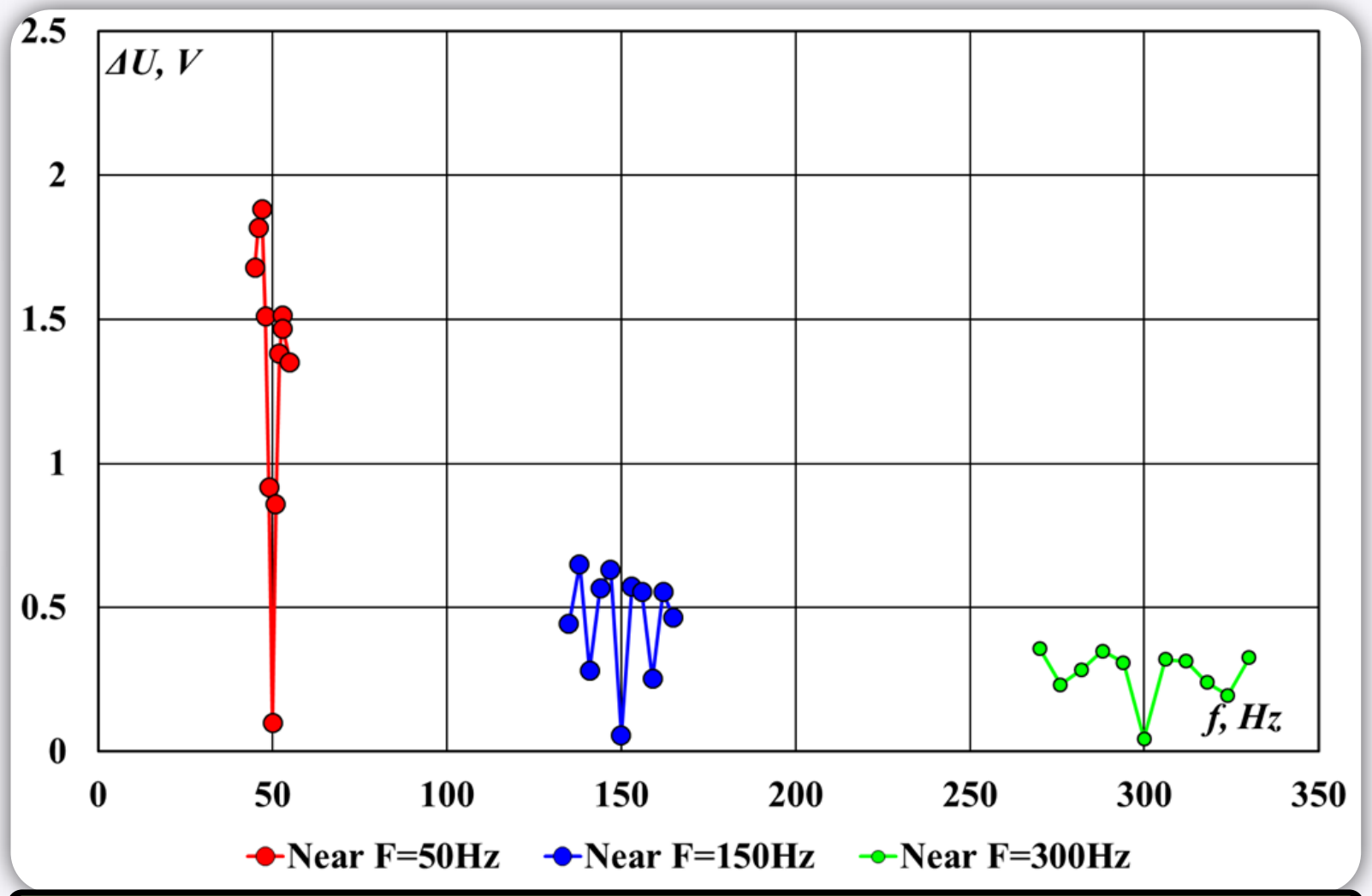
- ступенчатое изменение напряжения электропитания тиристорного моста, изменение с возвратом к исходному значению через ΔT;
- ступенчатое изменение угла зажигания, изменение с возвратом к исходному значению через ΔT;
- модуляция угла зажигания;
- модуляция напряжения электропитания;
- изменение тока возбуждения при имитации короткого замыкания (добавление наведенных составляющих);
- линейное изменение частоты напряжения электропитания.

Осциллограммы напряжения возбуждения при различных значениях угла зажигания и коммутации



$$U_f(\alpha,\mu,t) = \frac{3}{\pi}\sqrt{2}\cdot U^U(t)\cdot\frac{(\cos\alpha + \cos(\alpha+\mu))}{2}$$

Измерение напряжения возбуждения при различных значениях частоты электропитания тиристорного моста



Абсолютные значения погрешности измерения напряжения возбуждения при различных значениях частоты напряжения электропитания тиристорного моста

Измерение в статических условиях.

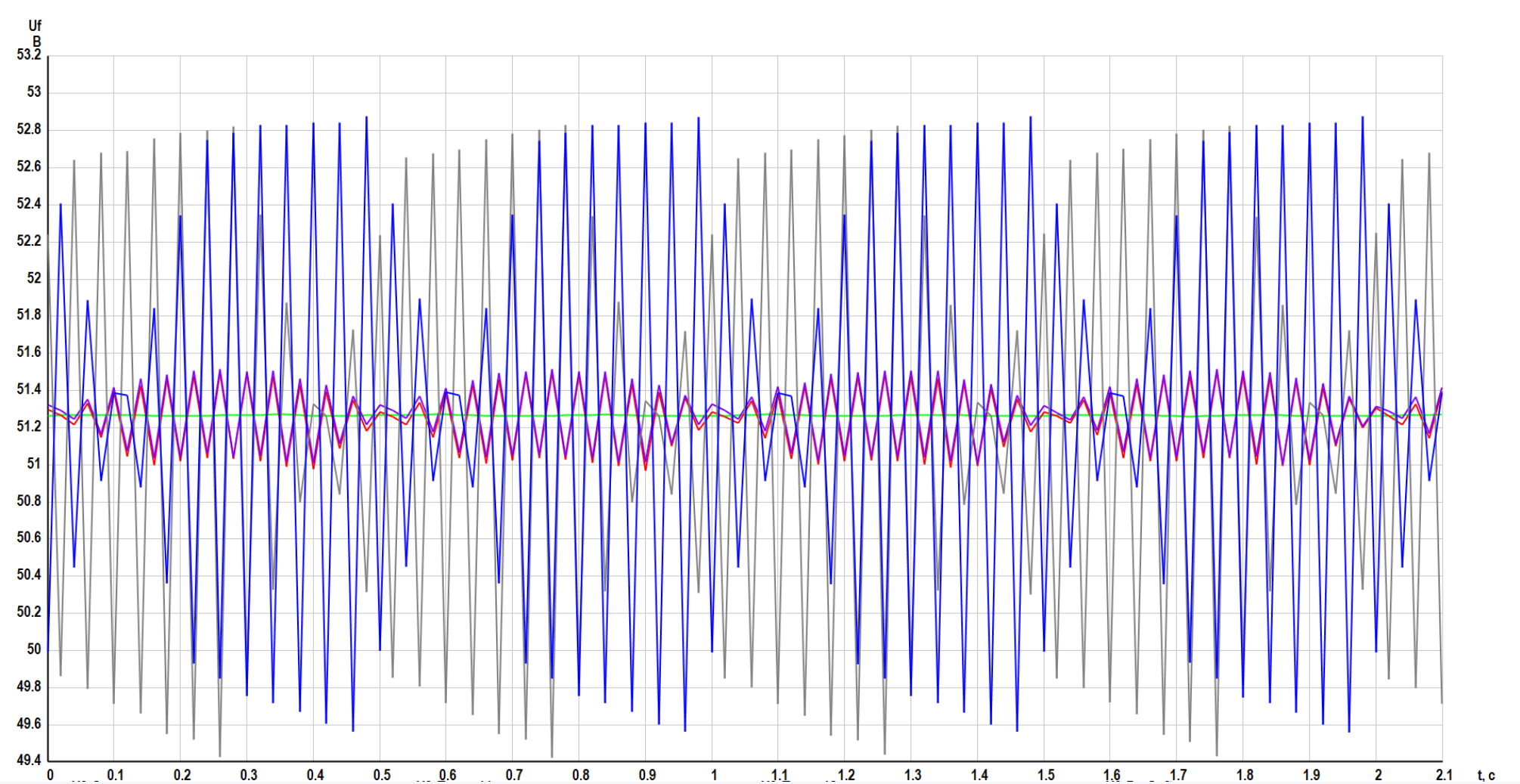
Задается различное значение частоты напряжения электропитания моста.

45-55 Гц

135-165 Гц

270-330 Гц

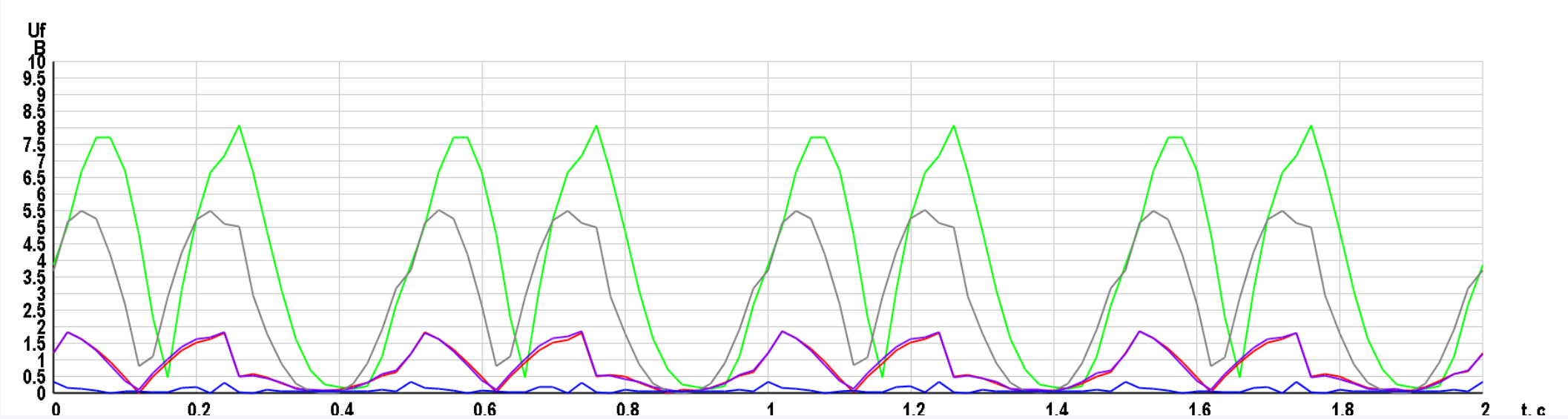
Измерение напряжения возбуждения при различных значениях частоты электропитания тиристорного моста



Примеры сигналов на выходе различных УСВИ различных производителей при частоте напряжения электропитания 46 Гц

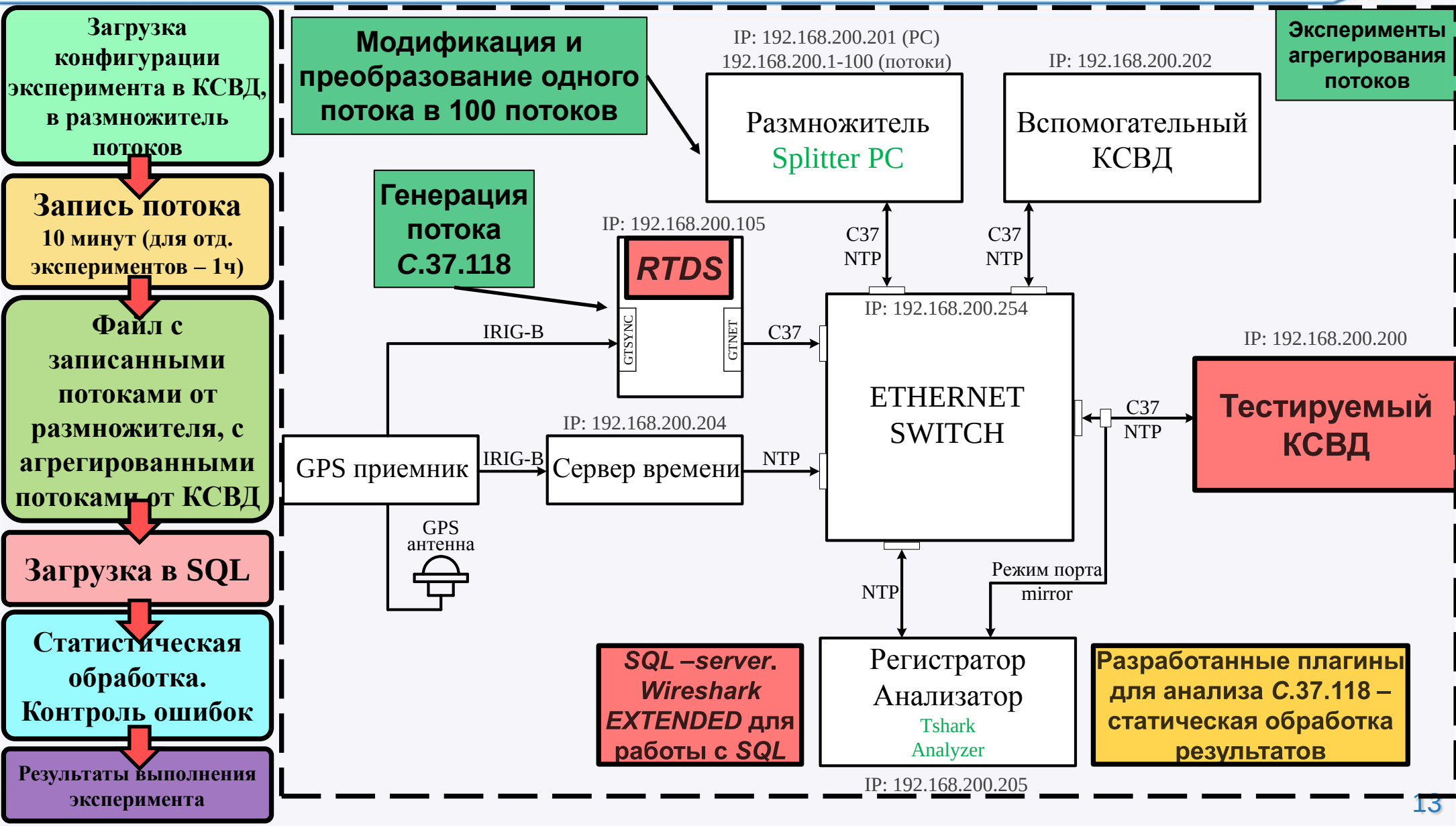
Измерение постоянных сигналов. Эксперименты, в которых наблюдалась некорректная работа измерительных алгоритмов

- измерение напряжения возбуждения при различной частоте напряжения электропитания тиристорного моста (частота 45, 46 Гц);
- эксперименты со ступенчатым изменением напряжения электропитания или угла зажигания с последующим возвратом к исходному значению (при ширине импульса 40 мс – излишняя фильтрация измерений);
- эксперименты с модуляцией угла зажигания, угла коммутации (за счет наличия фазового запаздывания).



Пример погрешностей устройств различных производителей при измерении сигнала с модуляцией

Испытательный стенд для сертификации КСВД



Технические задачи, успешно решенные при разработке испытательного стенда КСВД

Необходима генерация 100 потоков УСВИ, существующая конфигурация *RTDS* в лаборатории не позволяла генерировать заданное количество потоков. Отсутствие возможности простыми программными средствами реализации задержки пакетов для передачи. **Разработано специализированное ПО – размножитель потоков**, **обеспечивающее требуемое количество потоков пользователем и задержку отправки данных.**

Встроенная модель УСВИ в *RTDS* не позволяет передавать 8 аналоговых сигналов. **Изменение структуры пакета данных производится размножителем потока при его приеме**.

Отсутствие быстрых способов обработки записанных программой *WireShark pcap*-файлов с потоками данных. **Разработан специализированный плагин, позволяющий загружать обработанные результаты расчетов (значения фазоров, аналоговых величин, дискретных сигналов) на этапе загрузки *pcap*-файла в базу данных *SQL***.

Выявленная некорректная работа устройств

- при тестировании выявлено, что выгружаемые файлы осциллограмм в формате ***COMTRADE*** (*С*37.111-2013) могут не полностью соответствовать стандарту (например, некорректная ширина полей);
- при тестировании выявлено, что у КСВД, работающих под управлением операционных систем (ОС), не являющихся операционными системами реального времени, возможно появление дополнительной задержки на получение пакетов потоков СВИ и, как следствие, исключение этих пакетов данных из агрегирования;
- при выгрузке длительных по времени осциллограмм ***COMTRADE*** выявлено, что в отдельных случаях подходы к программированию этой процедуры не учитывают возможный большой объем выгружаемых данных (что требует объема оперативной памяти, превышающий установленный объем). Это в свою очередь приводит к необходимости дробления выгружаемых данных, что в отдельных случаях может быть недопустимым или приводить к сбою в совместной работе различного программного обеспечения.

Сертификация и испытания устройств на ПАК *RTDS* в АО «НТЦ ЕЭС»

АРПМ
Автоматика разгрузки при перегрузке по мощности
СТО 59012820.29.020.002-2017

АОПЧ
Автоматика ограничения повышения частоты
СТО 59012820.29.020.003-2017

АРКЗ
Автоматика разгрузки при коротких замыканиях
СТО 59012820.29.020.008-2016

АЛАР
Автоматика ликвидации асинхронного режима
СТО 59012820.29.020.008-2015

АОПО
Автоматика ограничения перегрузки оборудования
СТО 59012820.29.020.002-2018

Устройства фиксации
(ФТКЗ, ФОЛ, ФОТ, ФОБ, ФОСШ, ФОВ)
СТО 59012820.29.020.008-2016
СТО 59012820.29.020.008-2018

АРВ
Автоматические регуляторы возбуждения
СТО 59012820.29.160.20.004-2019

АЧР
Автоматика частотной разгрузки
СТО 59012820.29.020.003-2016

УСВИ
Устройства синхронизированных векторных измерений
СТО 59012820.29.020.011-2016

АРВ
Получение **экспериментальных частотных характеристик**. **Синтез** и **верификация** подробной математической модели каналов регулирования (испытания)

КСВД
Концентраторы синхронизированных векторных данных
СТО 59012820.29.020.003-2018

УСВИ
с функцией измерения **параметров системы возбуждения** (испытания)

Выводы

В АО «НТЦ ЕЭС» программно-аппаратный комплекс моделирования энергосистем в режиме реального времени *Real Time Digital Simulator* (*RTDS*) используется для сертификации широкого спектра устройств управления, регулирования и защиты, устройств системы мониторинга переходных режимов (устройств синхронизированных векторных измерений – УСВИ, концентраторов синхронизированных векторных данных – КСВД).

Проводятся испытания с целью приведения устройств всех сертифицируемых типов к требованиям стандартов.

RTDS
RTDS АО "НТЦ ЕЭС"

АО «НТЦ ЕЭС» на выставке «Электрические сети 2019»

Павильон **A74**

https://www.ntcees.ru/

https://www.ntcees.ru/departments/sections/rtds.php

Спасибо за внимание!

https://www.ntcees.ru/

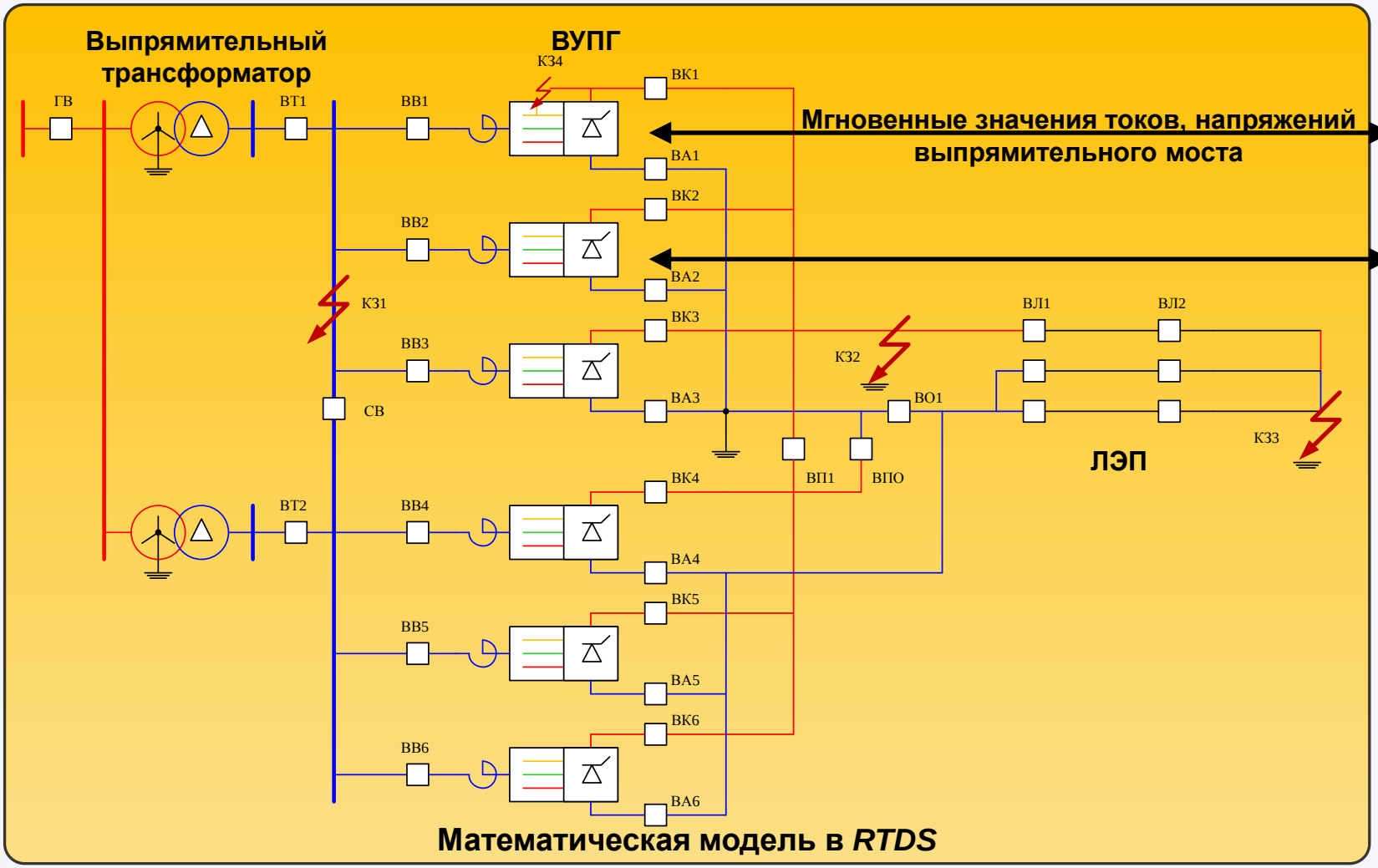
Спасибо за внимание!

https://www.ntcees.ru/

https://www.ntcees.ru/departments/sections/rtds.php

Тестирование системы управления, регулирования и защиты СУРЗА для управляемых выпрямителей плавки гололеда ВУПГ: оценка работы алгоритмов СУРЗА при различных технологических нарушениях на основном оборудовании плавки

Задача: проверка и коррекция (при необходимости) алгоритмов новой СУРЗА на соответствие требованиям заказчика



Математическая модель в *RTDS*

Интерфейсные блоки: вывод аналоговых сигналов, прием дискретных сигналов управления (импульсов зажигания тиристоров)

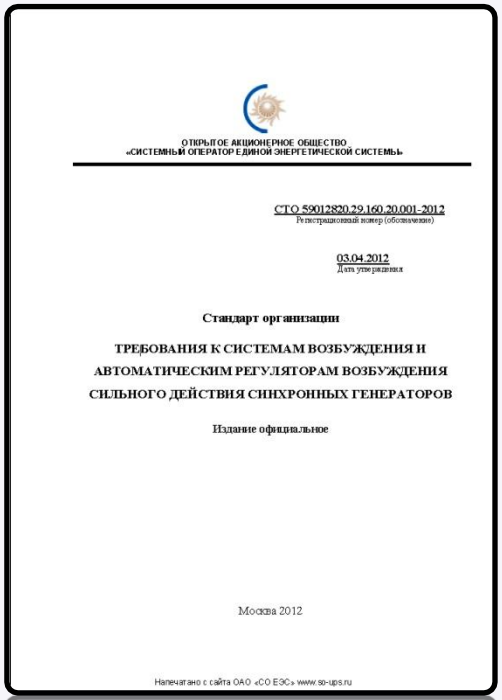
СУРЗА

Натурный (промышленный) образец шкафа СУРЗА. Управление каждым из шести выпрямительных мостов

Результаты работы: выявлены несоответствия работы исходных алгоритмов СУРЗА предъявленным требованиям; после внесения корректировок – соответствующие требованиям заказчика алгоритмы СУРЗА, проверка которых выполнена экспериментально.

Проверка АРВ сильного действия, работающих в составе статических и/или бесщеточных систем возбуждения, на соответствие требованиям Стандарта Системного Оператора
СТО 59012820.29.160.20.001-2012 (изм. по приказу № 225 от 14.07.2015)

Задача: проверка АРВ сильного действия на соответствие требованиям Стандарта



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

СТО 59012820.29.160.20.001-2012
Регистрационный номер (обозначение)

03.04.2012
Дата утверждения

Стандарт организации

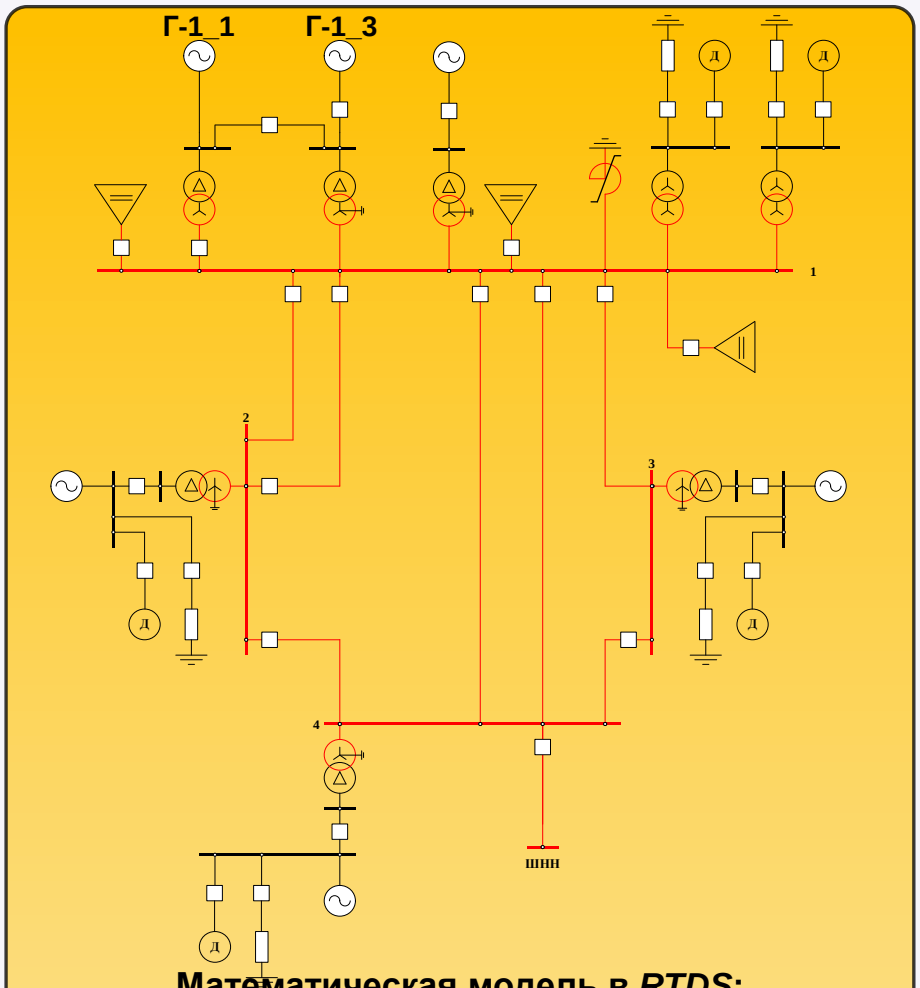
ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ВОЗБУЖДЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРАМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Издание официальное

Москва 2012

Напечатано с сайта ОАО «СО ЕЭС» www.so-ups.ru

Требования к функционированию АРВ + описание процедуры сертификации



Математическая модель в *RTDS*: Модель энергосистемы, используемая для сертификации АРВ по СТО

Интерфейсные блоки

Мгновенные значения токов статора СГ, напряжений статора СГ, тока возбуждения, напряжения возбуждения пр. сигналы. Выходной сигнал АРВ (импульсы зажигания тиристоров) управляют возбуждением СГ

АРВ-1 (Г-1_1)

АРВ-2 (Г-1_3)

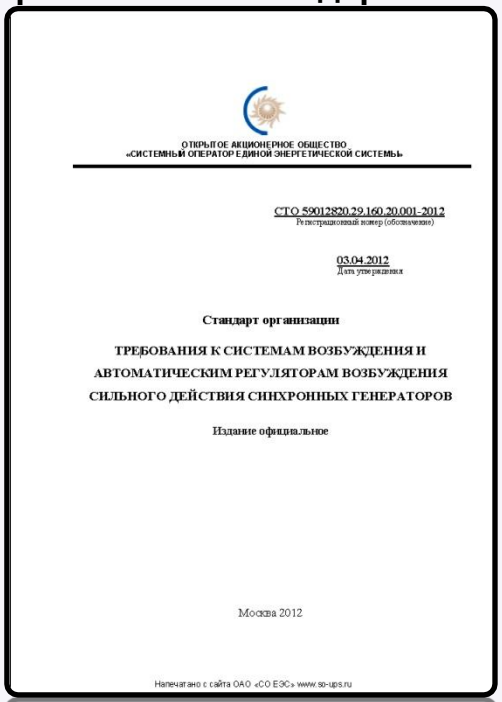
Натурные (промышленные) образцы сертифицируемых автоматических регуляторов возбуждения

Результат работы: заключение о соответствии/несоответствии АРВ сильного действия требованиям Стандарта

Получение экспериментальных частотных характеристик каждого из каналов регулирования АРВ сильного действия и системного стабилизатора. Верификация и уточнение (при необходимости) математических моделей АРВ по экспериментальным частотным характеристикам

Задачи:

получение экспериментальных частотных характеристик (ЭЧХ) АРВ сильного действия и системного стабилизатора;
проверка и корректировка (при необходимости) предоставленной математической модели АРВ на соответствие требованиям Стандарта



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

СТО 59012820.29.160.20.001-2012
Регистрационный номер (обозначение)

03.04.2012
Дата утверждения

Стандарт организации

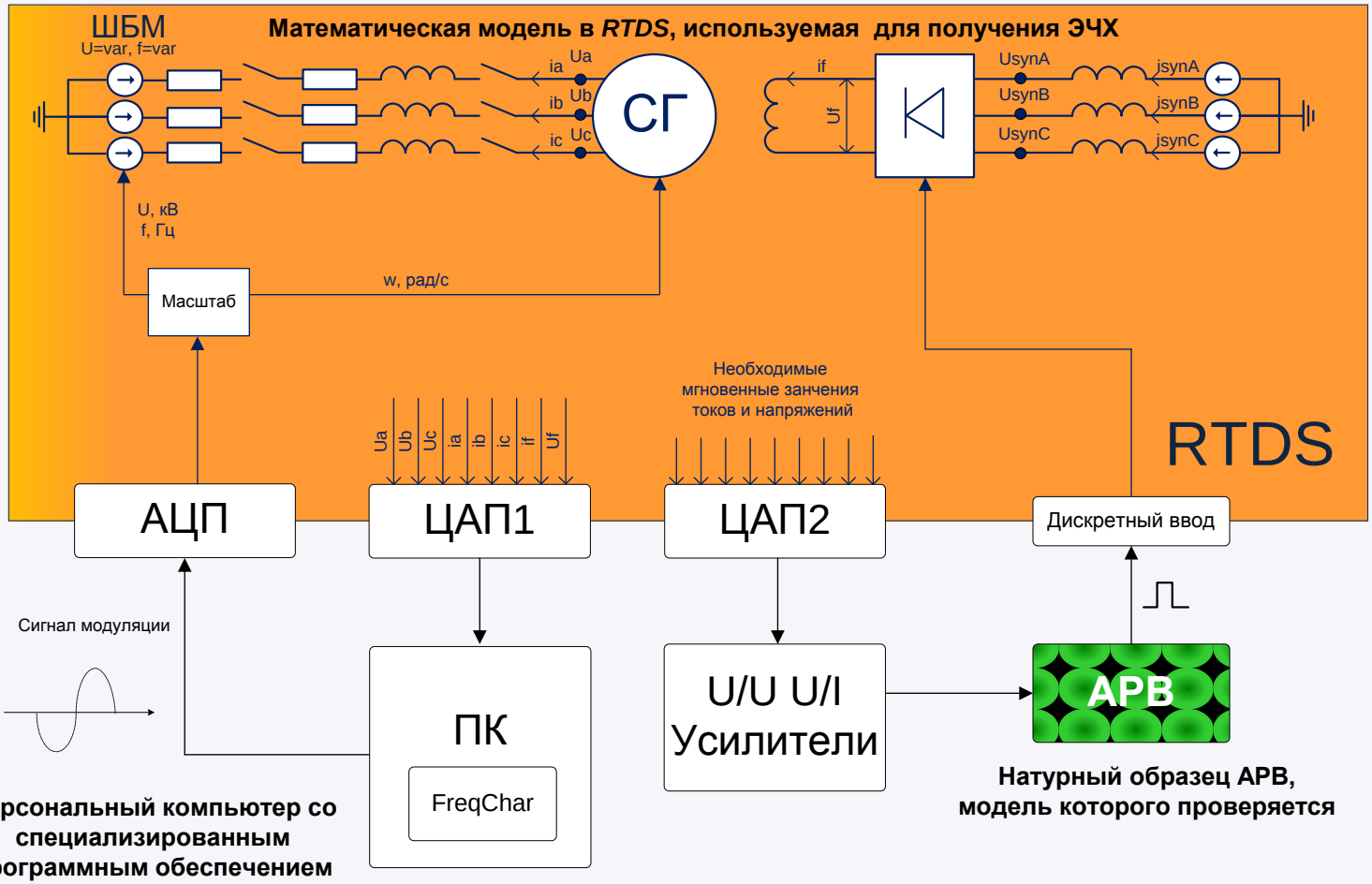
ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ВОЗБУЖДЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРАМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Издание официальное

Москва 2012

Напечатано с сайта ОАО «СО ЕЭС» www.so-ups.ru

Требования к точности математических моделей АРВ, к экспериментальным данным по проверке моделей



Результат работы: ЭЧХ АРВ сильного действия, заключение о соответствии математической модели требованиям СТО, скорректированная (совместно с разработчиком) математическая модель АРВ и системного стабилизатора

Проверка устройств автоматики ликвидации асинхронного режима на соответствие требованиям Стандарта Системного Оператора СТО 59012820.29.020.008-2015

Задачи:

проверка на соответствие устройства АЛАР на соответствие требованиям Стандарта, помощь разработчику в корректировке (при необходимости) алгоритмов АЛАР для приведения в соответствие требованиям Стандарта

Приложение 1 к приказу
ОАО «СО ЕЭС» от 24.12.2015
№ 418

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

СТО 59012820.29.020.008-2015
Регистрационный номер (обозначение)

24.12.2015
Дата утверждения

Стандарт организации

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПРОТИВОАВАРИЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ЭНЕРГОСИСТЕМ.

АВТОМАТИКА ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА.

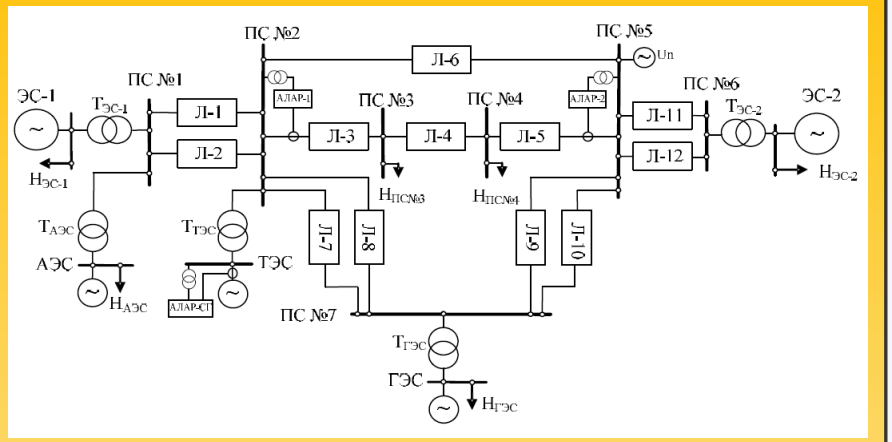
НОРМЫ И ТРЕБОВАНИЯ

Издание официальное

Москва 2015

Напечатано с сайта АО «СО ЕЭС» www.so-ups.ru

Требования к работе устройств АЛАР, требования к процедуре сертификации



Математическая модель в *RTDS*: Модель энергосистемы, используемая для сертификации АЛАР по СТО

Интерфейсные блоки

АЛАР-2

АЛАР-1

Результат работы: заключение о соответствии/несоответствии требованиям СТО; скорректированные алгоритмы функционирования АЛАР, соответствующие требованиям СТО

Проверка устройств автоматической частотной разгрузки Стандарта Системного Оператора СТО 59012820.29.020.003-2016

Задачи:

проверка на соответствие устройств АЧР на соответствие требованиям Стандарта,
помощь разработчику в корректировке (при необходимости) алгоритмов АЛАР для приведения в соответствие требованиям Стандарта

Приложение 1
к приказу АО «СО ЕЭС»
от _____ № _____

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

СТО 59012820.29.020.003-2016
(обозначение)
16.08.2016
(дата введения)

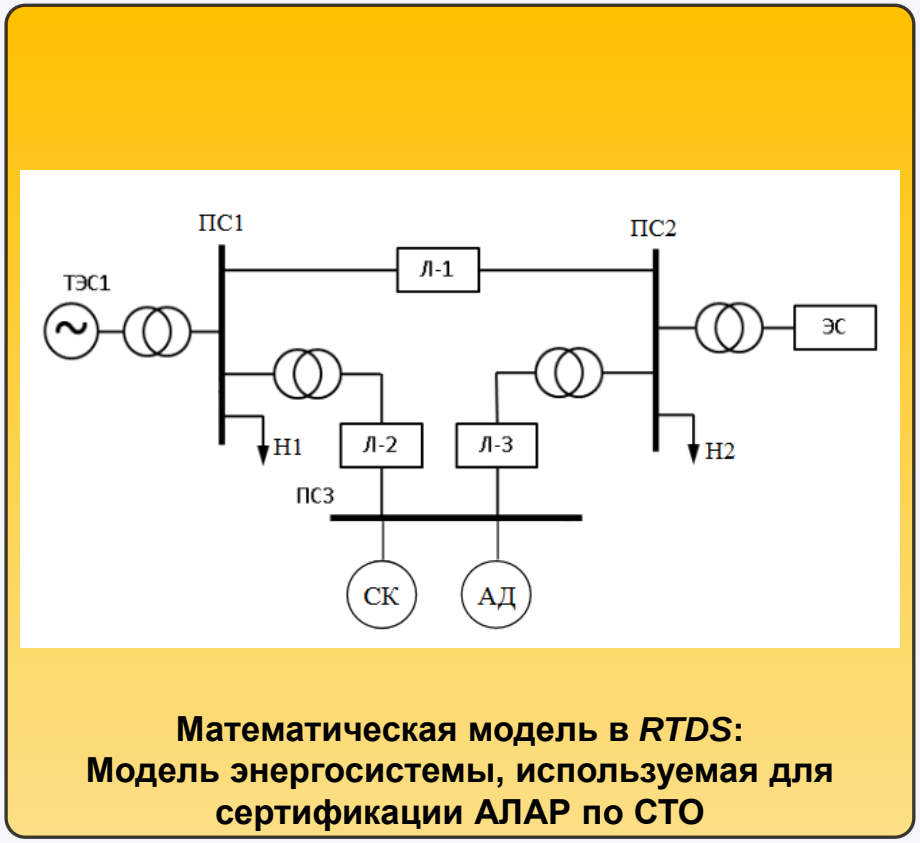
СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Микропроцессорные устройства автоматической частотной разгрузки. Нормы и требования

Издание официальное

Москва
2016

Требования к работе устройств АЛАР, требования к процедуре сертификации



Математическая модель в *RTDS*: Модель энергосистемы, используемая для сертификации АЛАР по СТО

Интерфейсные блоки

АЛАР-2

АЛАР-1

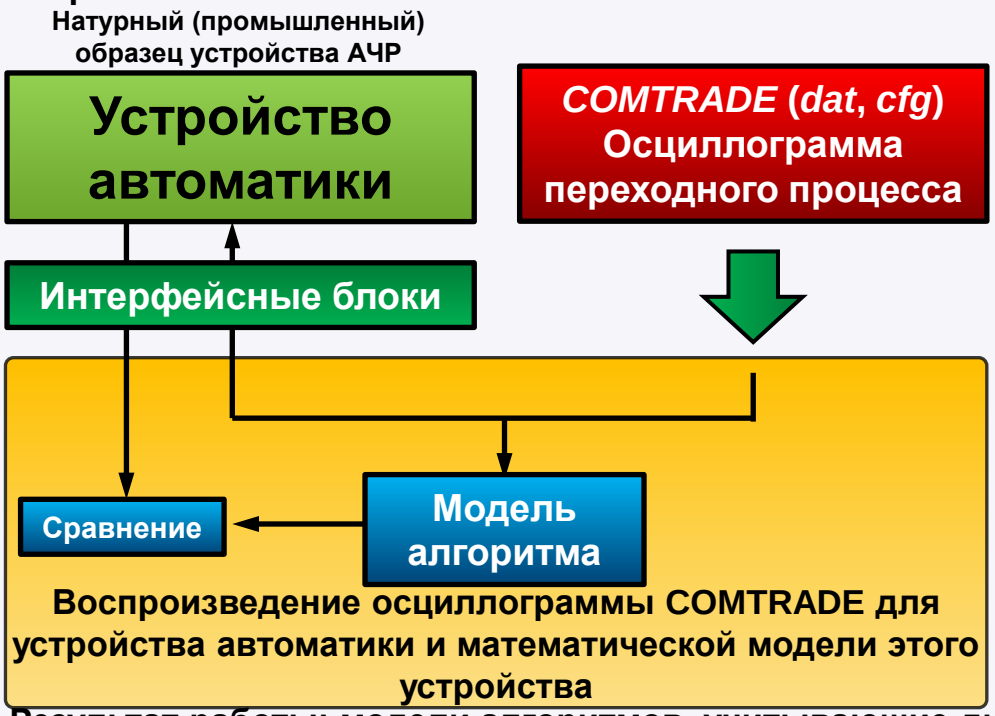
Результат работы: заключение о соответствии/несоответствии требованиям СТО; скорректированные алгоритмы функционирования АЛАР, соответствующие требованиям СТО

Анализ работы автоматики ограничения снижения частоты (АОСЧ) в энергосистеме

Задачи: анализ уставок АЧР энергосистемы при отделении энергосистемы на изолированную от ЕЭС России работу, анализ влияния на характер и максимальную величину снижения частоты энергосистемы при пуске АЧР по скорости изменения частоты

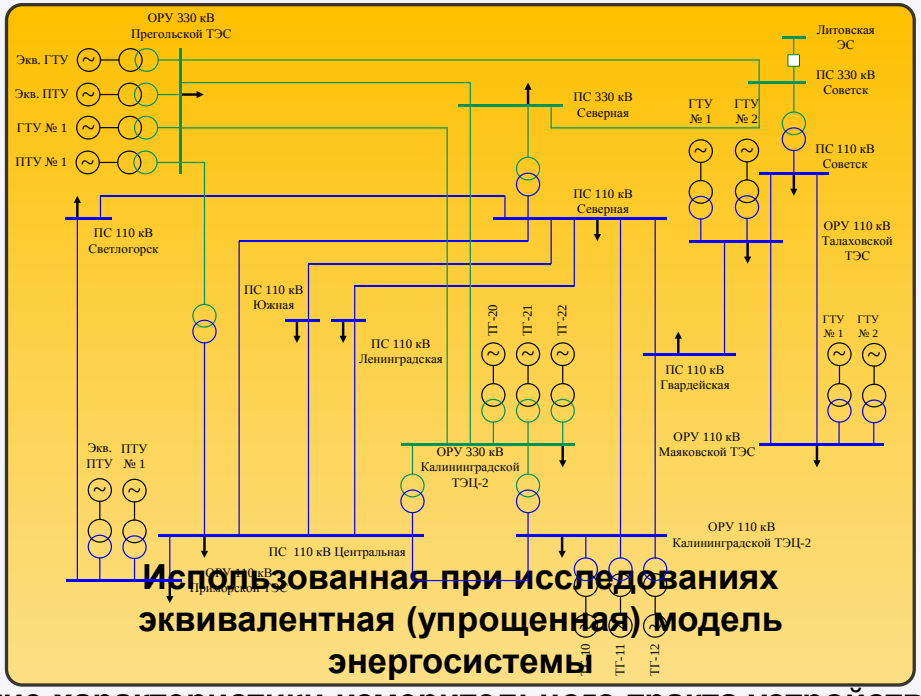
Этап 1

Воспроизведение динамических характеристик пускового органа АЧР по частоте на примере одного из устройств, реализующих такой орган. Создание моделей устройств АЧР для эквивалентной энергосистемы с учетом особенностей по созданию математических моделей и эквивалентных энергосистем



Этап 2

Создание модели энергосистемы, оснащенной проверенными моделями устройств АЧР, проведение исследований

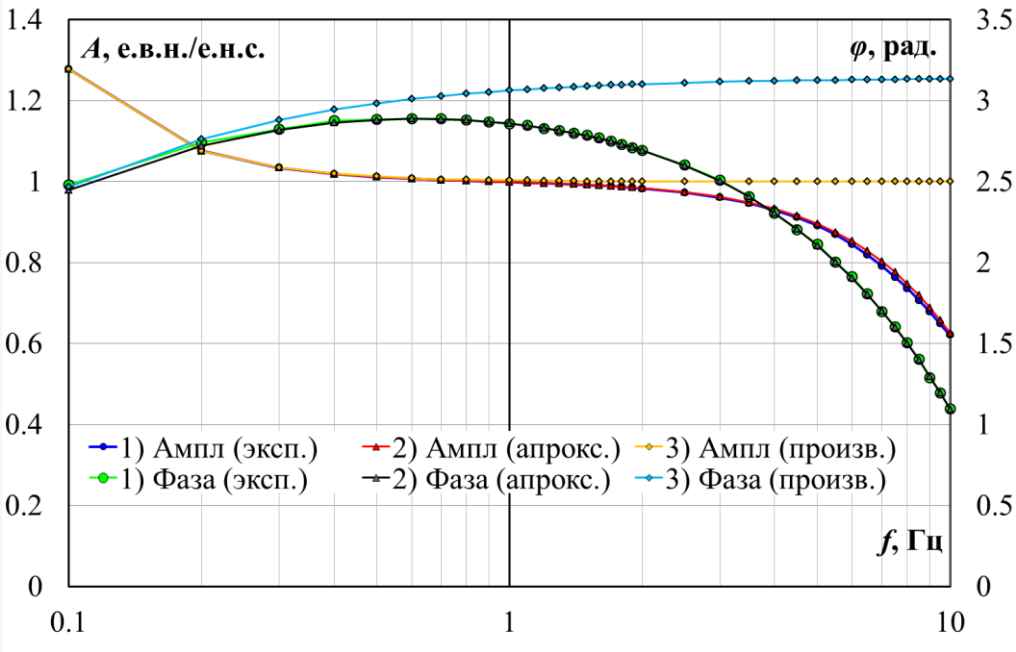


Результат работы: модели алгоритмов, учитывающие динамические характеристики измерительного тракта устройства АЧР (могут использоваться в дальнейших исследованиях); заключение о корректности выбранных уставок АЧР

Дополнительные материалы (1)

Получение экспериментальных частотных характеристик АРВ

- D.A. Kabanov, A.N. Kushnir, A.S. Zelenin, Obtaining the frequency responses of AVR in closed-loop system using the RTDS Simulator» // Корпоративный журнал RTDS News. – march 2015;
- Гуриков О.В. Зеленин А.С., Штефка Й. Методика построения математических моделей микропроцессорных АРВ по экспериментально снятым частотным характеристикам // Известия НТЦ ЕЭС. — СПб, 2016. — 75. — С. 178-181.



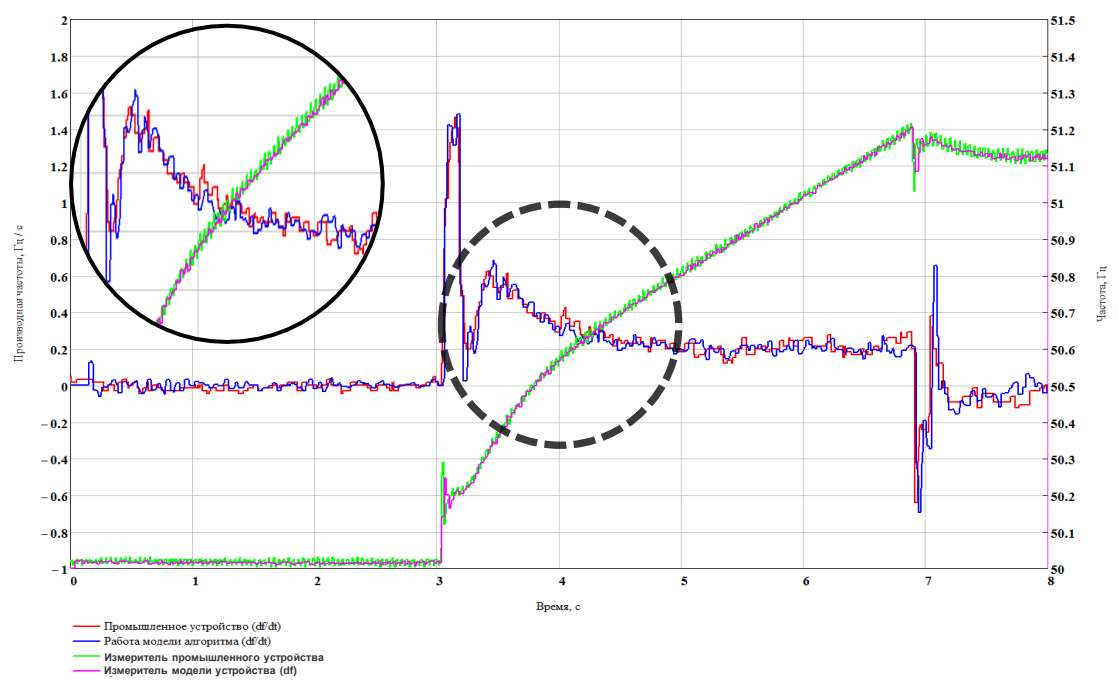
Сравнение частотных характеристик одного из каналов регулирования промышленного образца АРВ:

- Экспериментальная ЧХ (эксп.);
- Аналитически полученная с помощью методики построения моделей и аппроксимации экспериментальных ЧХ (апрокс.);
- ЧХ, построенная для исходной математической модели канала регулирования, предоставленной производителем (произв.).

Дополнительные материалы (2)

Анализ качества математической модели устройства АЧР с пусковыми органами по скорости изменения частоты в энергосистеме:

Презентация «Способы моделирования микропроцессорных устройств противоаварийного управления с использованием RTDS на примере реализации алгоритмов автоматики ограничения частоты» (Зеленин А.С.), круглый стол «Задачи и технологии моделирования РЗА» (Международная выставка производителей релейного оборудования 2016 год, Москва)



Сравнение сигналов по производной частоты напряжения, вычисленных в микропроцессорном устройстве и при помощи его модели.

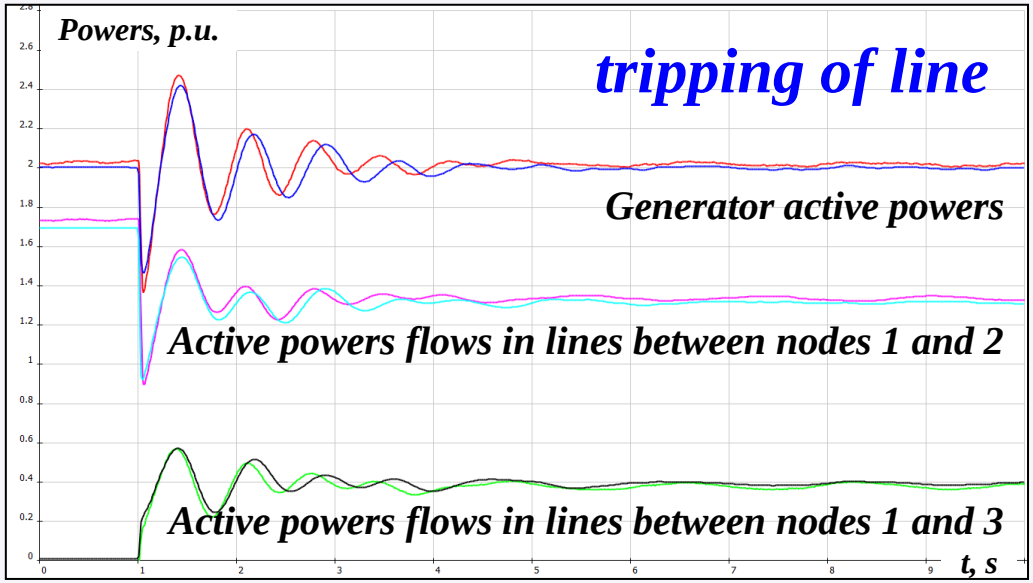
Эксперимент – повышение частоты напряжения в модели энергосистемы

Дополнительные материалы (3)

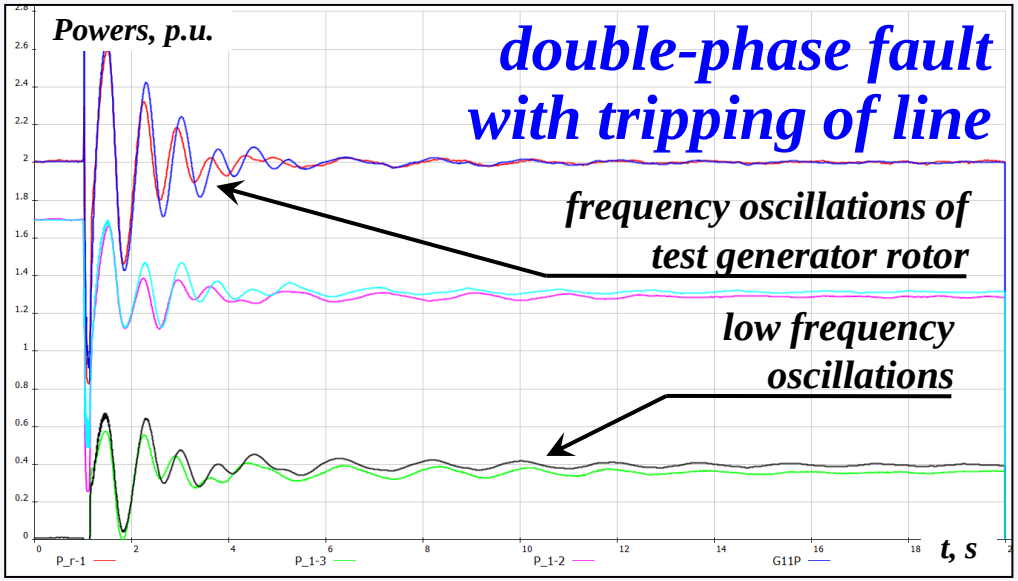
Разработка и верификация моделей энергосистем, созданных в ПАК РВ (*RTDS*)

Презентация «*Accuracy estimation of power system mathematical model and its individual elements in the RTDS Simulator using a Laboratory of Electric Power Systems Physical Modeling equipment*» (Зеленин А.С.) (европейская встреча пользователей *RTDS* 2014 год, Копенгаген)

Сравнение переходных процессов, полученных на «оригинале» (физическая модель, тестовая схема энергосистем, используемая для сертификации АРВ) и создаваемой схеме в *RTDS* :



Отключение ЛЭП



Двухфазное КЗ с отключением ЛЭП

Дополнительные материалы (4)

Разработка на ПАК РВ (*RTDS*) модели энергосистемы, используемой для сертификации АЛАР

Презентация «Подготовка расчетной модели на RTDS для проведения сертификационных испытаний устройств АЛАР» (Богданов А. Николаев А.В. Чаплюк С.В.) (https://www.ntcees.ru/departments/sections/test_ALAR.pdf)

Тестирование РЗА на ПАК РВ (RTDS) с использованием IEC-61850

Relay and Automation Testing with IEC 61850-9-2 LE (by the example of generator-transformer unit of Nizhny Novgorod HPP)
A.V. Bogdanov, P.V. Kabanov, O.V. Kirienko, M.I. Maltsev (европейская встреча пользователей *RTDS* 2014 год, Копенгаген)

(https://www.ntcees.ru/departments/sections/RTDS%20meeting%20Copenhagen%20presentation_nio-5.pdf)

Дополнительные материалы (5)

Стандарты:

«Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем…»:

- Устройства автоматики разгрузки при перегрузке по мощности (СТО 59012820.29.020.002-2017);
- Устройства автоматики ограничения повышения частоты (СТО 59012820.29.020.003-2017);
- Устройства автоматики разгрузки при коротких замыканиях. Устройства фиксации тяжести короткого замыкания (СТО 59012820.29.020.008-2016);
- Автоматика ликвидации асинхронного режима (СТО 59012820.29.020.008-2015);
- Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования (СТО 59012820.29.020.002-2018);
- Устройства фиксации отключения и фиксации состояния линий электропередачи, электросетевого и генерирующего оборудования (СТО 59012820.29.020.008-2018);
- Микропроцессорные устройства частотной разгрузки (СТО 59012820.29.020.003-2016);

- Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов (СТО 59012820.29.160.20.004-2019);
- Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений (СТО 59012820.29.020.011-2016);
- Релейная защита и автоматика. Концентраторы синхронизированных векторных данных (СТО 59012820.29.020.003-2018)