RTDS Technologies

МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

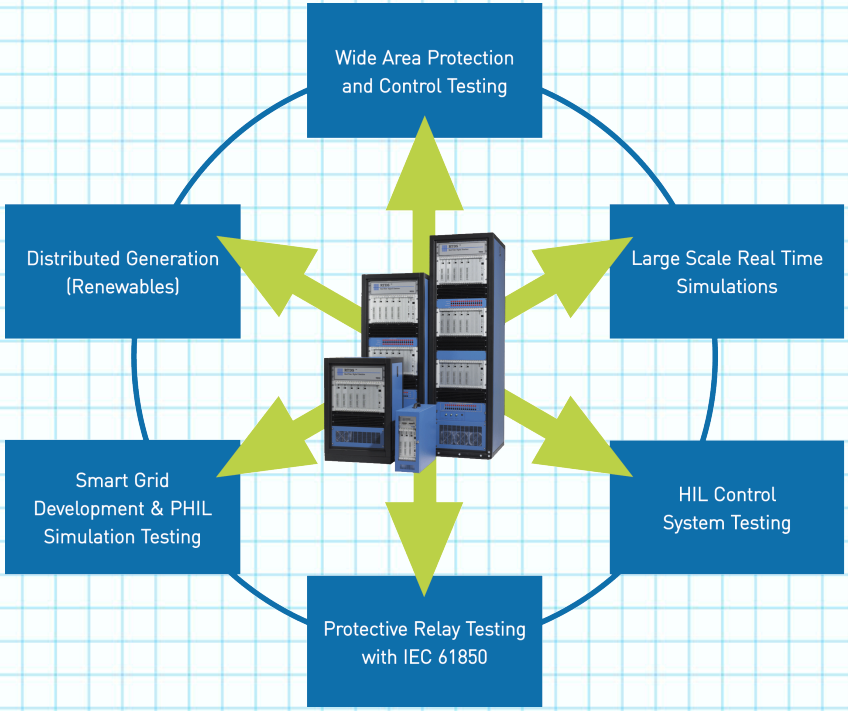
ВАША ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

27.05.2013

RTDS Technologies Inc.

План презентации:

- ❑ Введение
- ❑ Теоретические основы
- ❑ Аппаратная часть RTDS
- ❑ Программная часть RTDS
- ❑ Применение RTDS
- ❑ Ответы на вопросы



Для чего необходимо моделирование в реальном времени ?

- Постоянно возрастающие требования к надежности электроснабжения
- Возрастает сложность устройств и оборудования
- Внедряются новые виды генерации, передачи и распределения энергии
- Моделирование переходных процессов стало общепринятым инструментом для инженеров-энергетиков
- Моделирование в реальном времени стало, как никогда, доступным.

RTDS Technologies Inc.

История создания

- Проект создания RTDS начат в 1986
- Основное финансирование от Manitoba Hydro
- Первая в мире система моделирования HVDC создана 1989 г.
- Дальнейшее развитие и отладка для получения коммерческого продукта
- Первая промышленная установка 1993 г.
- RTDS Technologies основана в 1994 г

RTDS Technologies Inc.

Компания RTDS Technologies

- Расположена в Канаде г.Виннипег
- Количество сотрудников ~ 45 чел.

Деятельность компании

- Разработка аппаратной части
- Разработка программного обеспечения
- Маркетинг и продажи во всем мире.
- Обучение и поддержка пользователей

RTDS Technologies Inc.

- Более 250 поставок в Мире
  6 поставок в Россию
- Около 1000 единиц оборудования
  - 36 стран

Клиенты среди ведущих:

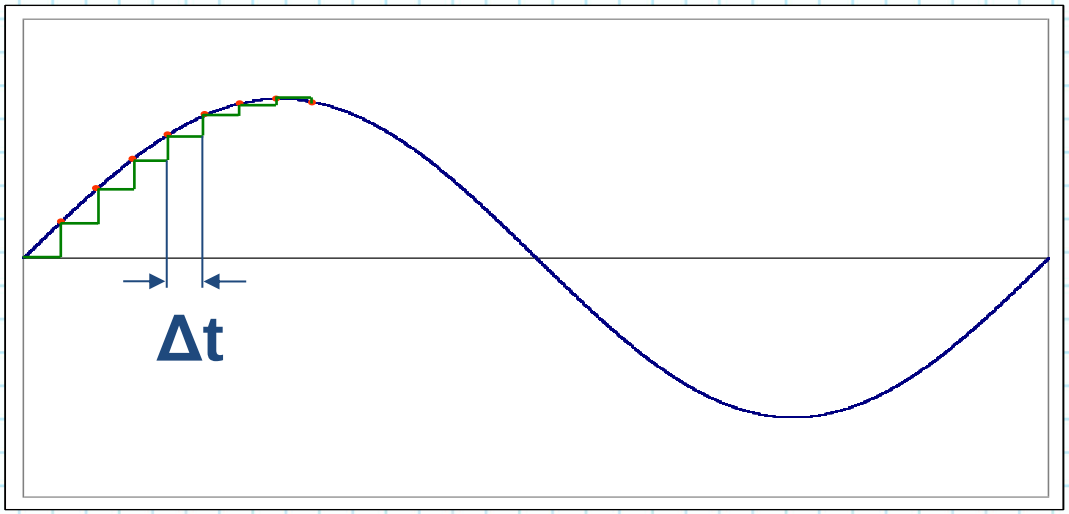
- Электротехнических
- Электроэнергетических
- Научно-исследовательских компаний и
- Учебных заведений

RTDS Technologies Inc.

Моделирование в реальном времени

Расчет электромагнитных переходных процессов (EMTP)

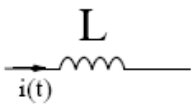
- Основано на алгоритме Г. Доммеля (H.Dommel)
- Интегрирование методом трапеций
- Равномерный шаг расчетов

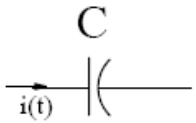


Алгоритм моделирования

Алгоритм Доммеля:

- *Преобразование дифференциальных уравнений в алгебраические уравнения по формуле трапеций.*





$$v(t) = L * \frac{d\,i(t)}{dt} \qquad i(t) = C * \frac{d\,v(t)}{dt}$$

$$i(t) = \frac{1}{L}\int v(t)\,dt \qquad v(t) = \frac{1}{C}\int i(t)\,dt$$

applying trapezoidal rule of integration

$$i(t) = \frac{\Delta t}{2L}\,v(t) + I_h(t-\Delta t) \qquad i(t) = \frac{2C}{\Delta t}\,v(t) - I_h(t-\Delta t)$$

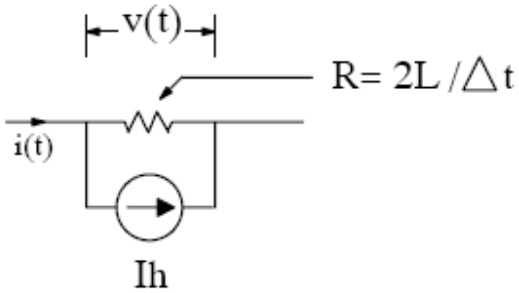
Алгоритм моделирования

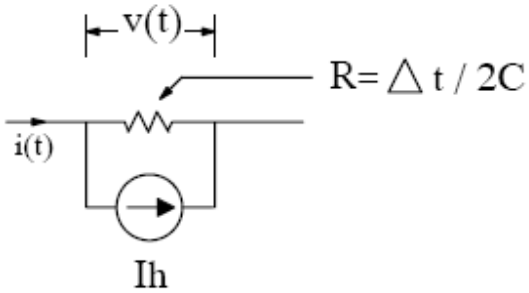
Алгоритм Доммеля:

- *Ih – это хронологически сложившийся ток за предыдущие шаги*

$$i(t) = \frac{\Delta t}{2L} v(t) + I_h(t - \Delta t)$$

$$i(t) = \frac{2C}{\Delta t} v(t) - I_h(t - \Delta t)$$

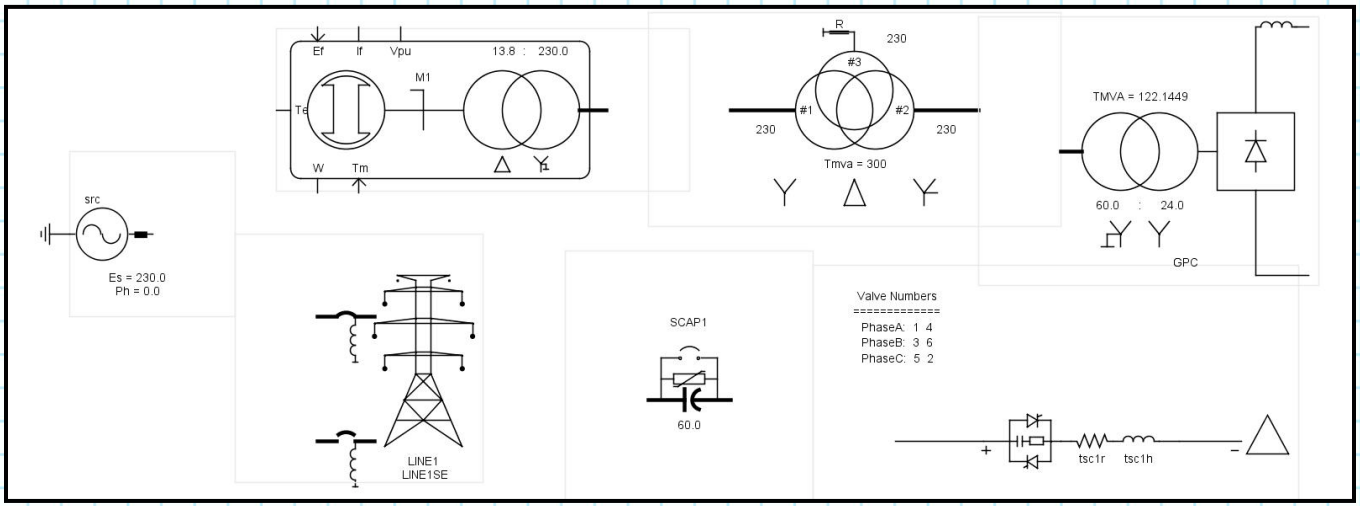




Алгоритм моделирования

Алгоритм Доммеля:

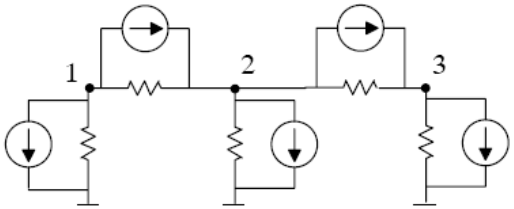
- Все компоненты электрической сети, такие как, источники напряжения, линии электропередачи, трансформаторы, генераторы и пр., представлены в виде эквивалентных источников тока и сопротивления.
- Расчет тока Ih для сложных компонентов энергосистемы может потребовать значительного количества вычислений.



Алгоритм моделирования

Процесс расчета электрической системы:

1. *Преобразование заданных пользователем параметров системы в эквивалентную сеть, состоящую только из источников тока и сопротивлений.*
2. *Заполнение матрицы проводимостей эквивалентной сети*



$$\begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G11 & G12 & G13 \\ G21 & G22 & G23 \\ G31 & G32 & G33 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \end{bmatrix}$$

3. *Вычисление новые значений токов I , по результатам расчета на предыдущем шаге (для первого шага - по начальным условиям)*
4. *Расчет напряжений U по рассчитанным значениям тока I*
5. *Расчет токов в ветвях по U и I*
6. *Повторять с п.3*

Что такое «Реальное время»

«Нереальное время»:

- Обычно используется один вычислительный процессор
- Продолжительность расчетов на каждом шаге значительно больше заданного шага, например, при шаге расчета 50 мкс, вычисления могут длиться 500 мкс и более.

«Реальное время»:

- Используются параллельные вычисления.
- Связь с текущим временем задается высокостабильным тактовым генератором.
- На моделирование поведения системы в течение 1 секунды требуется **ровно** 1 с.
- Все расчеты, необходимые для определения состояния энергосистемы и обработки портов ввода/вывода, завершаются строго за время шага расчета.

Разговор: <1 с

ВРЕМЯ РЕАКЦИИ

Видеоигры: <10 мс

RTDS: 2 мкс ~ 50 мкс

RTDS Technologies

Оборудование для моделирования

Аппаратная часть RTDS

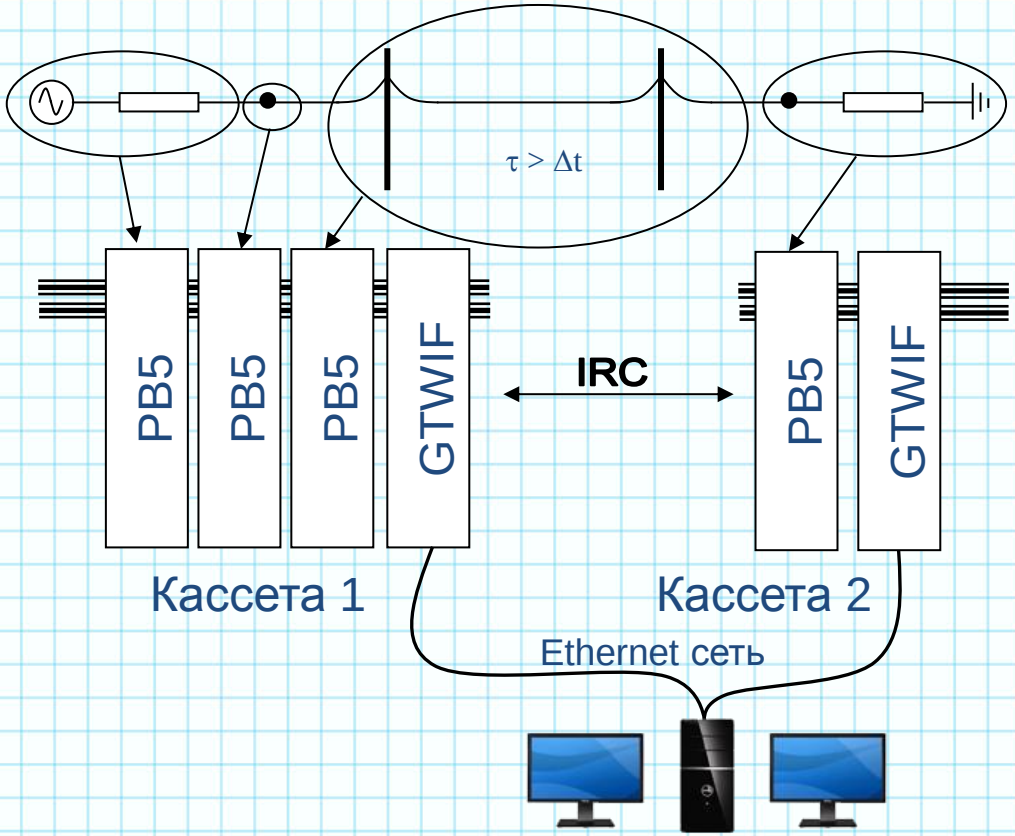
- Специально разработанный базовый процессорный модуль параллельных вычислений
- Модульная конструкция на базе кассет, каждая из которых содержит:
  - от 1 до 6 вычислительных модулей с RISC процессорами (PB5) для параллельных вычислений
  - 1 модуль интерфейса рабочей станции (GTWIF)
  - программируемые модули сетевых интерфейсов (GTNET)
- Различные модули ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов: GTFPI, GTDI, GTDO, GTAI, GTAO для сопряжения с физическими устройствами.
- Управление RTDS осуществляется через удобный графический интерфейс.

RTDS Technologies

The World Standard fo66r Real Time Digital Power System Simulation

Процесс моделирования

Параллельная обработка – распределение вычислений



Компоненты сети распределены между вычислительными модулями PB5

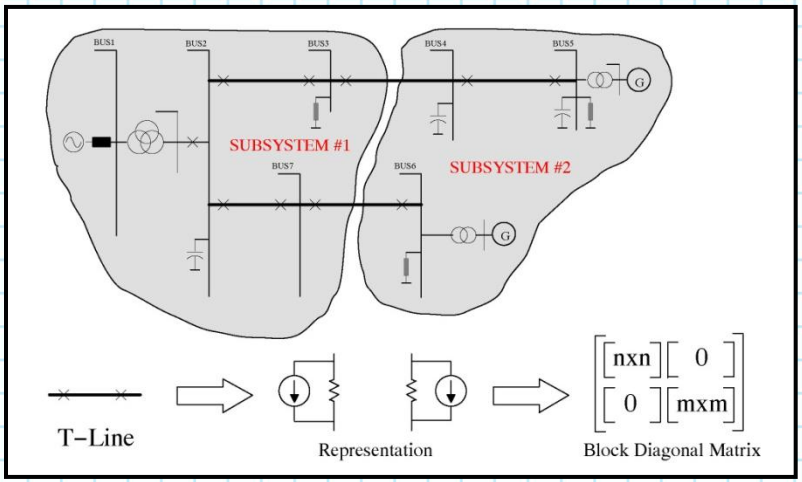
Суммирование мощности процессоров ускоряет решение

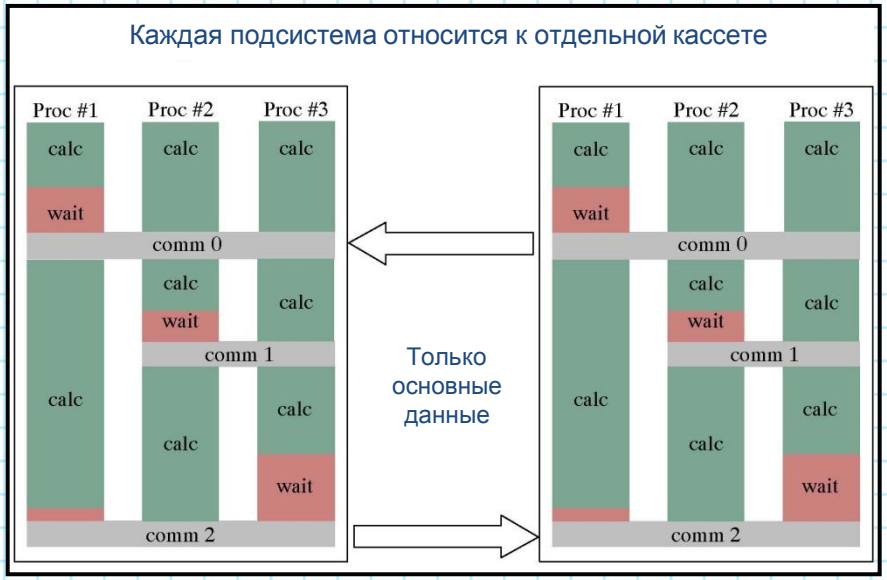
Связи между процессорами, позволяет использовать всю мощность системы

Метод вычислений RTDS

Разбиение модели на подсистемы

Чем больше модель сети, тем больший размер имеет матрица проводимостей (один элемент матрицы на каждый узел сети).

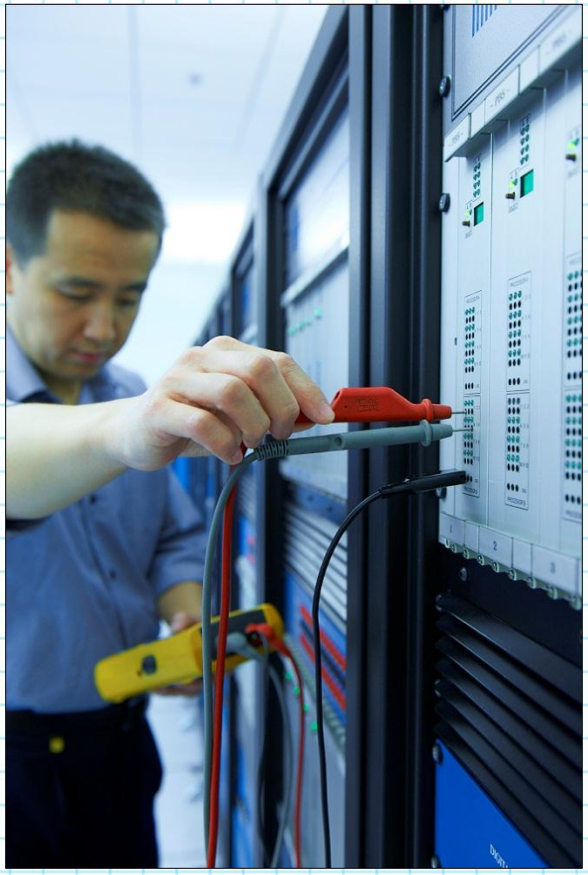




Оборудование для моделирования

Аппаратная часть RTDS

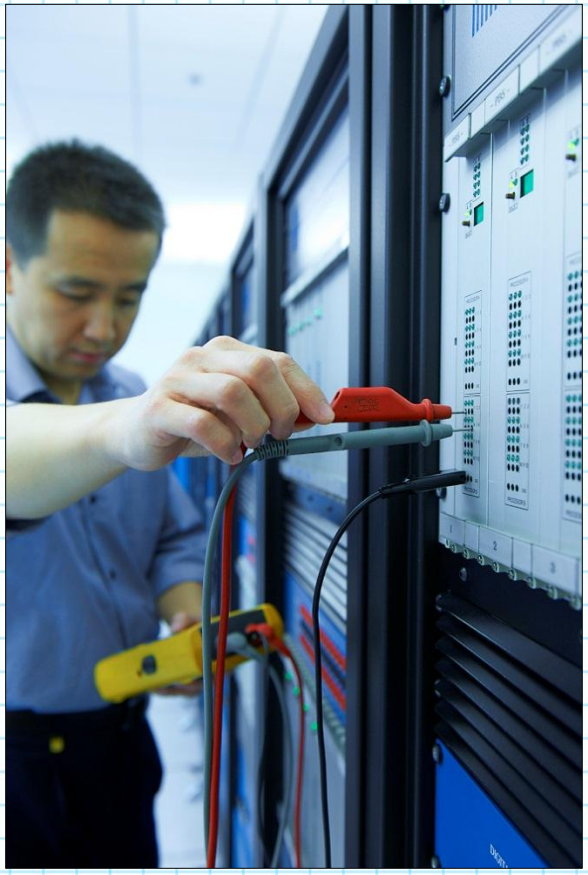
- Простота расширения комплекса
- *Процессорный модуль параллельных вычислений*
- *Модульная конструкция позволяет пользователю увеличить вычислительную мощность по мере необходимости*
- *Управление посредством дружелюбного программного интерфейса.*
- *Удобные средства ввода и вывода для подключения к физическим устройствам.*



Оборудование для моделирования

Модульная конструкция

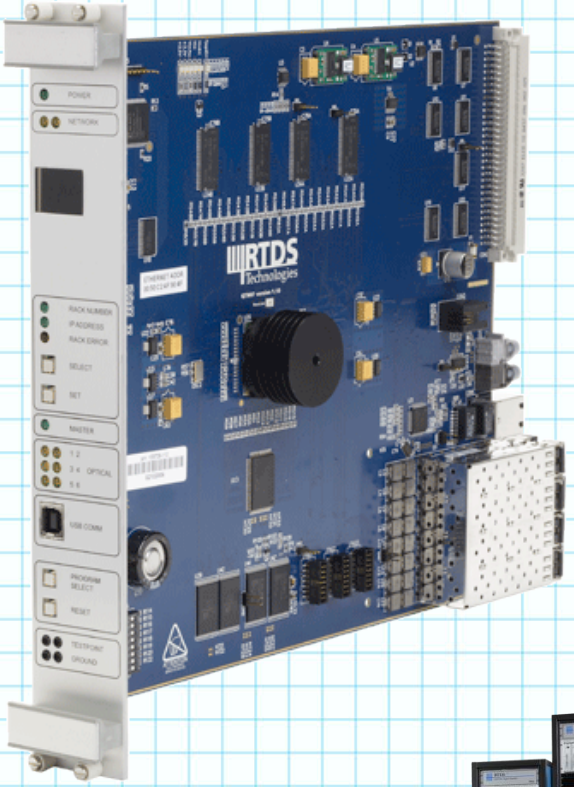
- Простота расширения
- Максимальная готовность
- Простота обслуживания
- Совместимость поколений аппаратных решений



Оборудование для моделирования

Модуль интерфейса рабочей станции - GTWIF

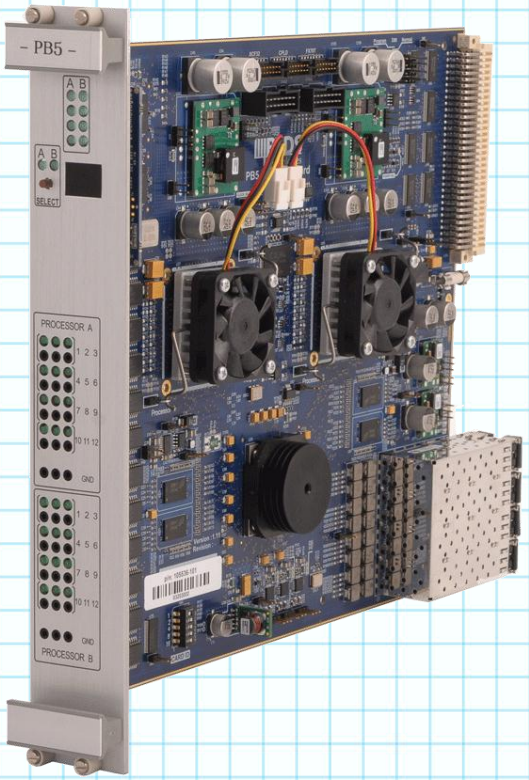
- *Подключение к управляющему ПК посредством стандартной Ethernet сети*
- *Обеспечивает связь для загрузки модели, её пуска и остановки*
- *Обеспечивает взаимодействие пользователя с моделью*
- *Обеспечивает обмен данными, их координацию и регистрацию*
- *Коммуникации между кассетами*
  - Высокоскоростная коммуникация
  - Подключение по оптоволоконному кабелю
  - Прямое подключение к 6 кассетам.



Оборудование для моделирования

Вычислительный модуль PB5 – Плата процессорная

- *Новейшие технологии вычислений*
- *Увеличена мощность за счет двух Power PC RISC процессоров с тактовой частотой 1.7 GHz*
- *Дополнительные коммуникационные порты для прямого обмена данными между процессорами.*
- *Увеличился размер моделируемой сети и сложность компонентов*
- *Программно назначаемые функции*



Оборудование для моделирования

Вычислительный модуль PB5 в сравнении с модулем предыдущего поколения GPC

Типа модуля	PB5	GPC
Начало производства	2011	2005
Типа процессора	Freescale MC7448 RISC	IBM 750GX RISC
Тактовая частота	1.7 ГГЦ	1.0 ГГц
Количество процессоров	2	2
Количество задач на процессор	12	10
Количество узлов сети	72 x 2 = 144 *	66
Оптических портов	2	2
Коммуникационных портов	6	2
Аналоговые выходы (12 битные ЦАП)	24	24

Оборудование для моделирования

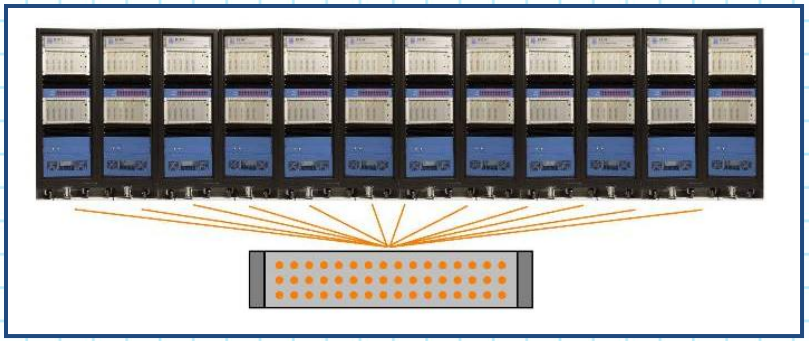
Высокоскоростной коммутатор типа “Hub” GBH

- *Передает единые метки времени для всех кассет*
- *Ведущий модуль GTWIF задает метки времени для всех остальных*
- *Максимум 60 кассет, могут управляться от единого источника меток времени*

Оборудование для моделирования

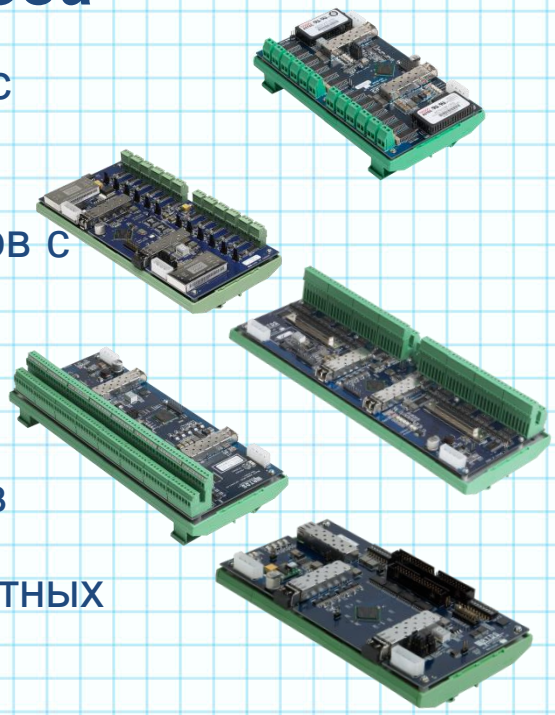
Коммутатор типа “Switch” IRC

- *Обеспечивает прямую связь до 60 кассет*



Оборудование для моделирования

Модули расширения портов ввода/вывода



- GTAI - 12 изолированных каналов аналоговых входов с дискретностью 16 бит
- GTAO - 12 изолированных каналов аналоговых выходов с дискретностью 16 бит
- GTDI - 64 изолированных канала дискретных входов
- GTDO - 64 изолированных канала дискретных выходов
- GTFPI – модуль входов и выходов для панелей дискретных сигналов

Семейство модулей ввода/вывода GT может подключаться последовательно между собой и управляться с одного оптического порта модуля PB5.

Оборудование для моделирования

GTNET – модуль сетевых интерфейсов

- Устанавливается в кассету
- GTNET обеспечивает механизм для связи с внешними устройствами по сети Ethernet
- Изначально разработан для поддержки протоколов МЭК 61850
- По запросам клиентов разработана поддержка других коммуникационных протоколов
- До 4 различных опционных протокола могут быть установлены на каждый модуль
- Одновременно может работать только по одному из установленных протоколов.

Оборудование для моделирования

GTNET - коммуникационные протоколы

МЭК 61850

- GTNET – GSE. Поддержка дискретных сообщений (GOOSE) по МЭК 61850-8-1
- GTNET – SV. Поддержка потока измеренных значений (SV) по МЭК 61850-9-2

COMTRADE плейер

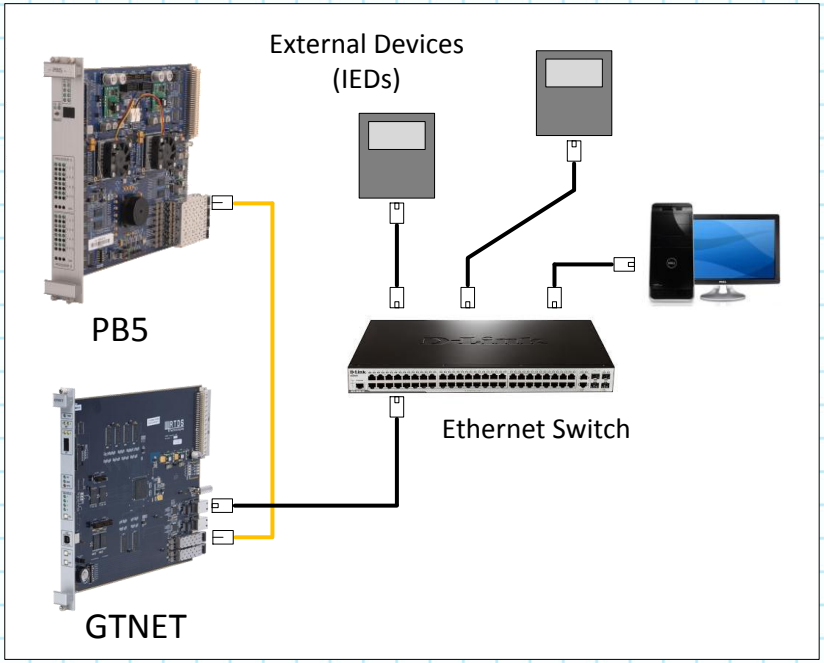
- GTNET – PB. Для воспроизведения продолжительных файлов

Distributed Network Protocol (DNP)

- GTNET – DNP. Поддержка протокола DNP для SCADA систем

Phasor Measurement Unit (PMU)

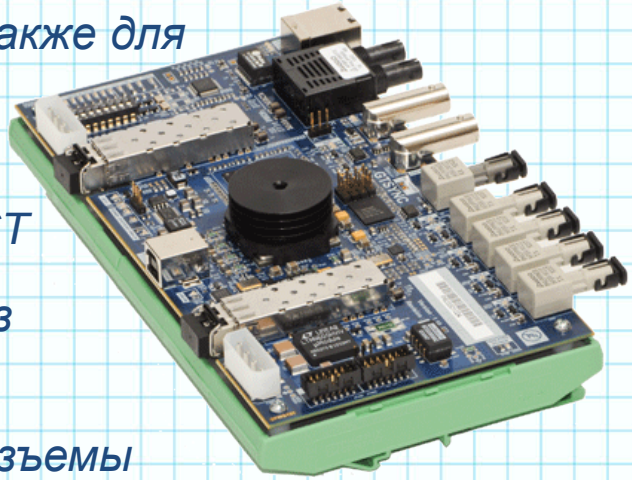
- GTNET – PMU. Поддержка потока измеренных значений по IEEE C37.118



Оборудование для моделирования

GTSYNC – модуль синхронизации по сигналам точного времени

- *Модуль GTSYNC предназначен для синхронизации процесса моделирования на RTDS по сигналам точного времени от внешних источников, например приемника GPS, а также для синхронизации устройств, подключенных к RTDS.*
- *Ежесекундный сигнал (1PPS) подключается через коаксиальный разъем BNC или оптический разъем ST*
- *Сигнал по протоколу IEEE 1588 подключается через разъемы RJ45 или ST.*
- *Сигнал по протоколу IRIG-B подключается через разъемы BNC*
- *Синхронизация процесса моделирования с внешними устройствами необходима при проверке устройств PMU и для устройств с выходом IEC 61850-9-2 SV*



Программное обеспечение

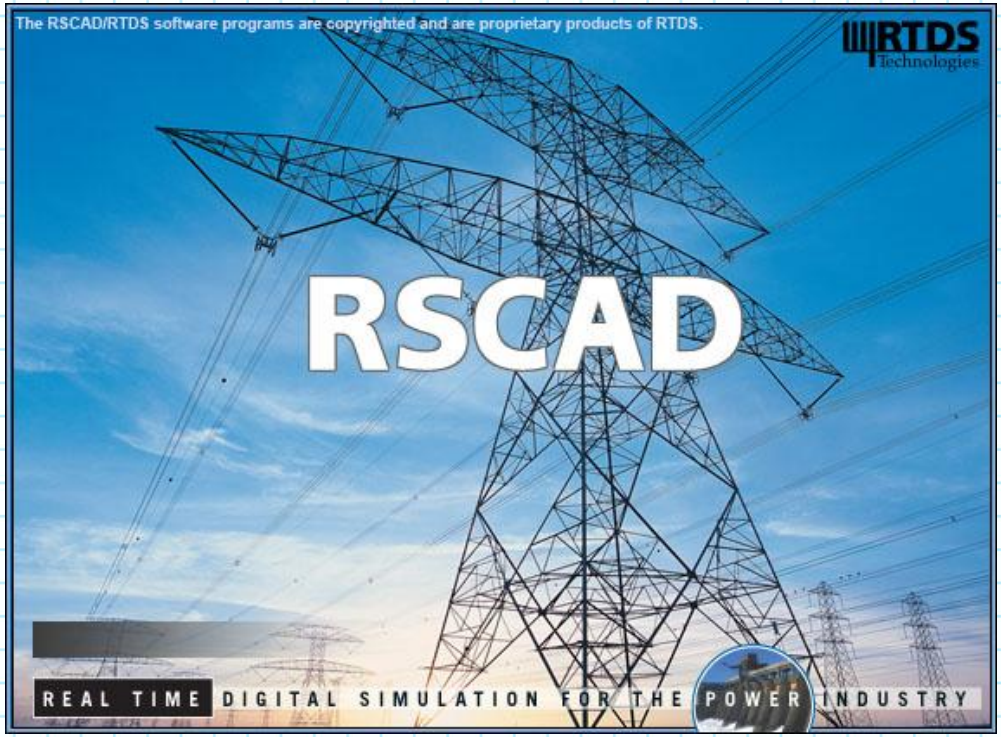
Программа RTDS

Графический пользовательский интерфейс

- *RSCAD*

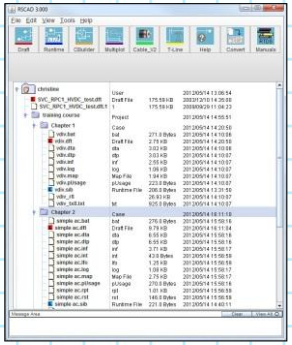
Программа управления и моделирования

- *Библиотека моделей компонентов и компилятор*

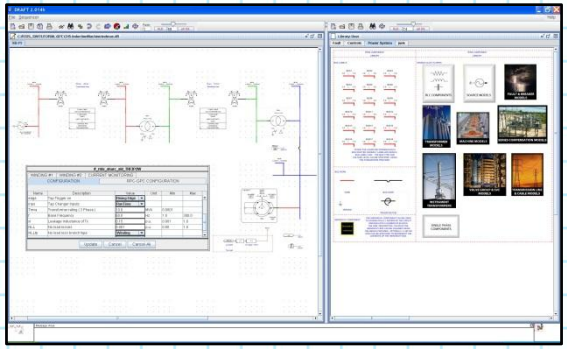


Программное обеспечение

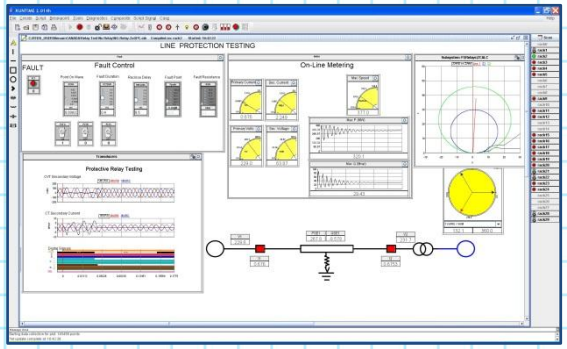
RSCAD – ПО с графическим пользовательским интерфейсом



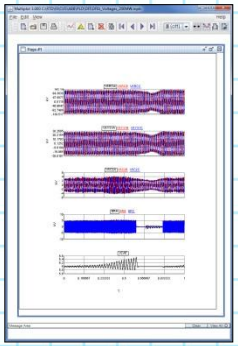
Проводник



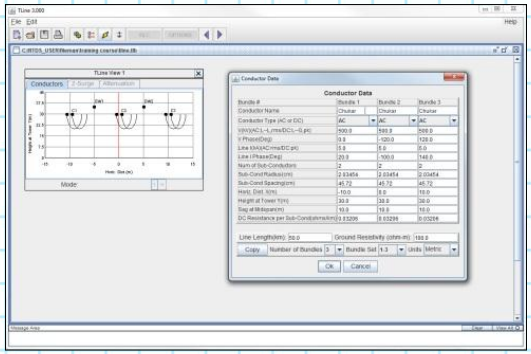
Редактор модели



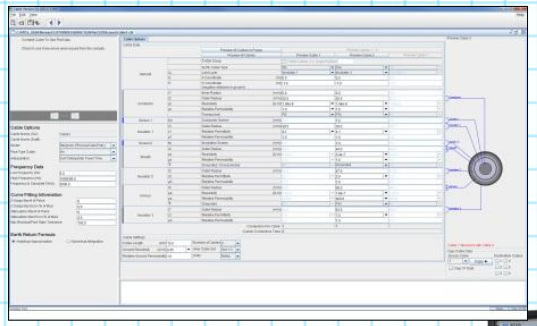
Управление моделированием



Построение графиков



Пример линии

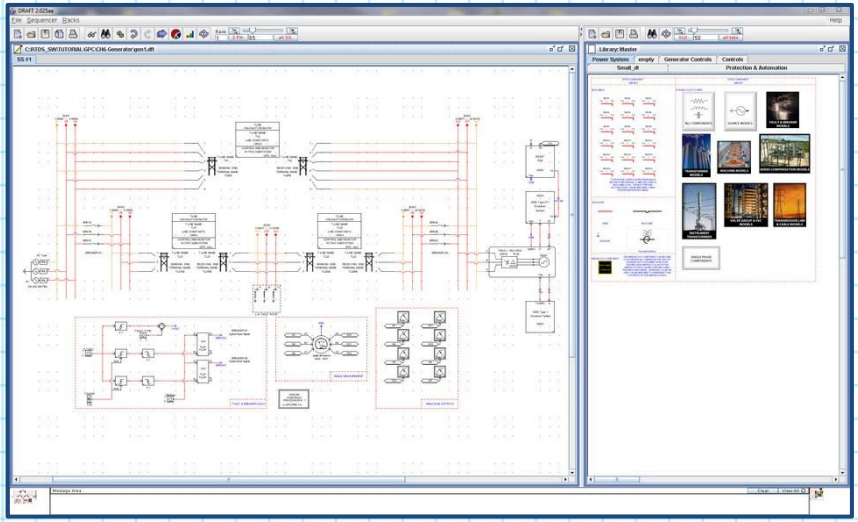


Пример кабеля

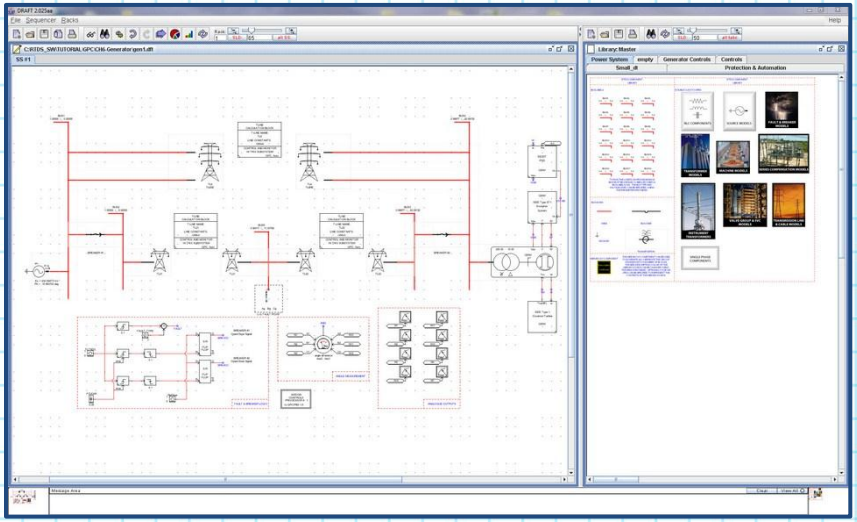
Программное обеспечение

Редактор схем в RSCAD / DRAFT:

Отображение схемы в трехлинейном или однолинейном режимах



Трехлинейное отображение

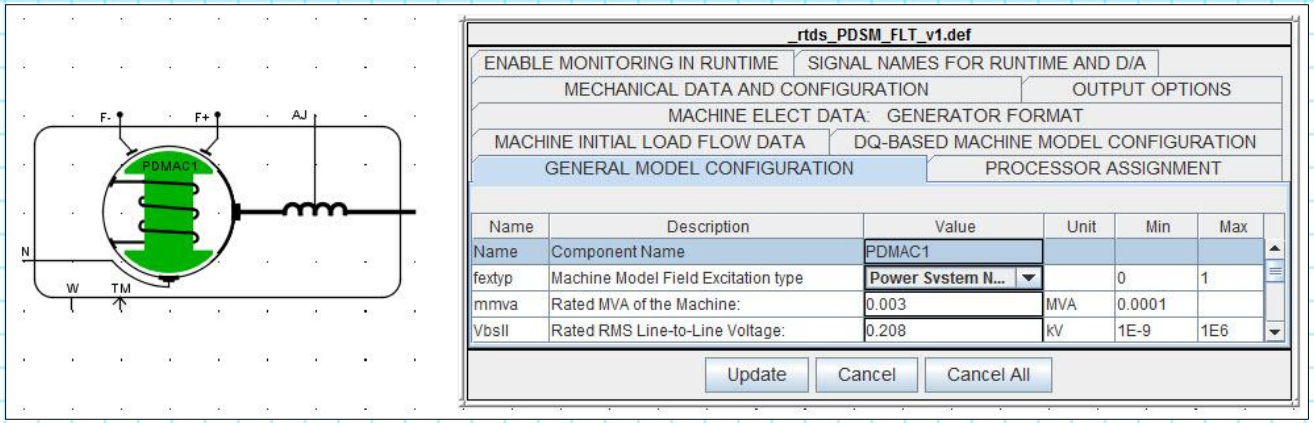


Однолинейное отображение

Программное обеспечение

Редактор схем в RSCAD / DRAFT:

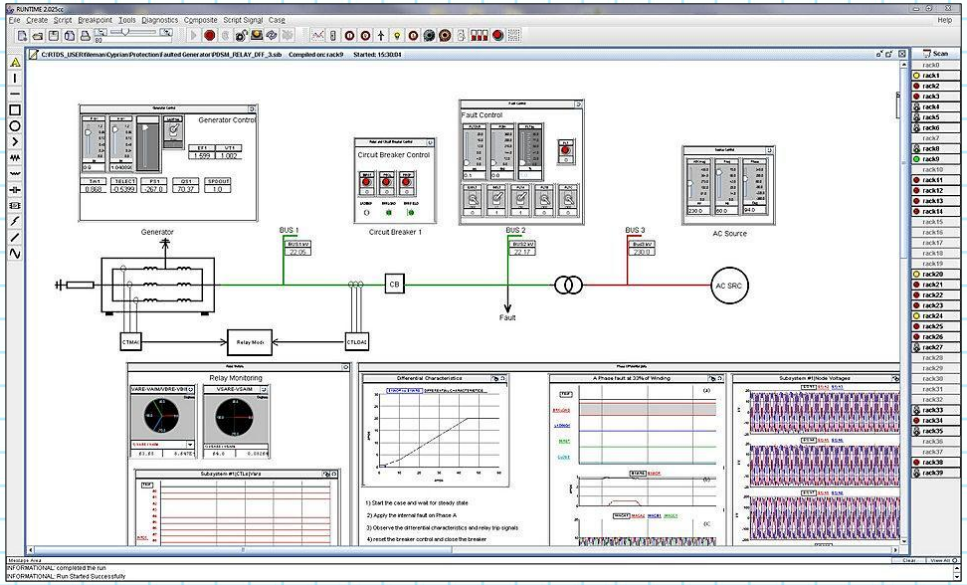
Ввод параметров



Программное обеспечение

Процесс моделирования в RSCAD / RUNTIME

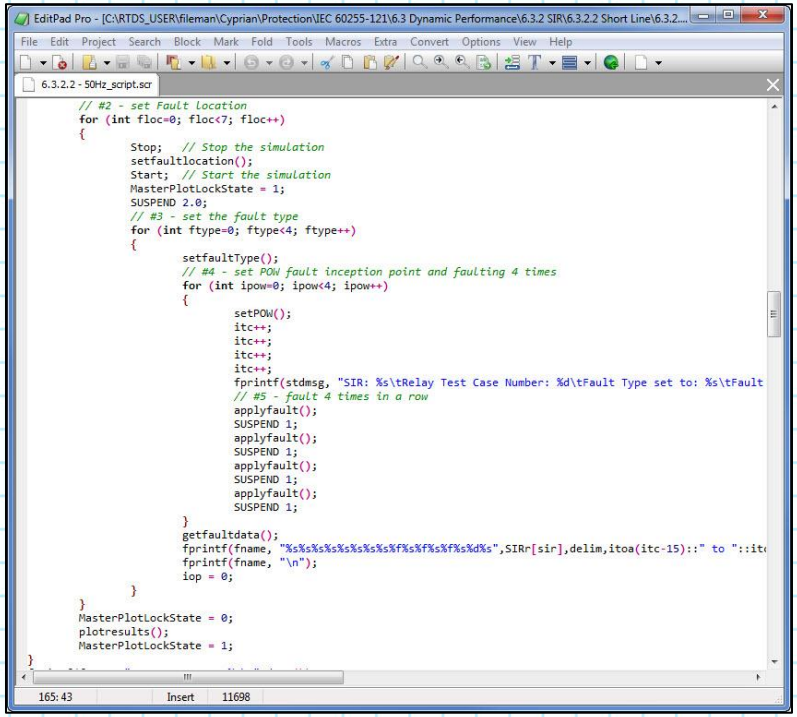
- Истинное реальное время обеспечивает возможность интерактивного управления моделируемой электрической сетью.
- Управление моделью
- Мониторинг
- Сбор данных
- Ручной режим
- Автоматический режим



Программное обеспечение

Автоматизированный пакетный режим проверки

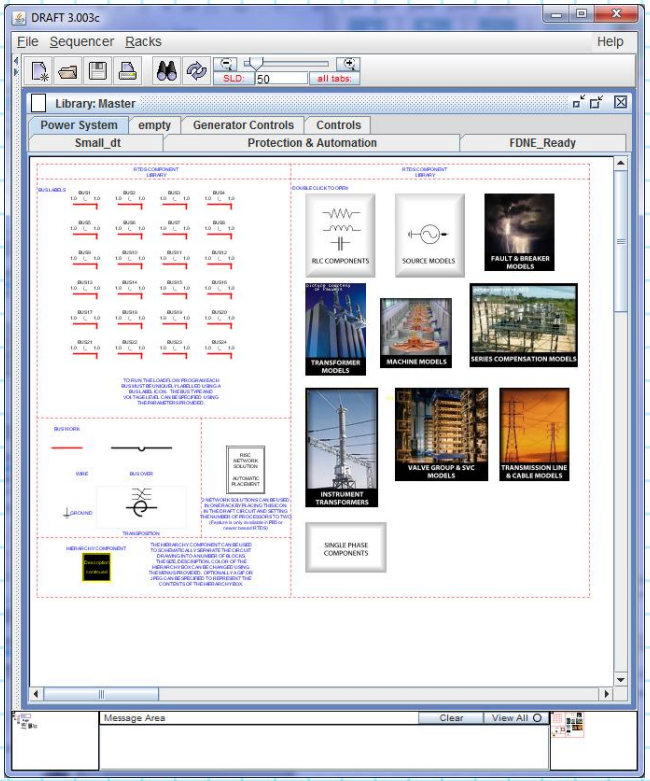
- *Файл сценария*
  - *Программирование на языке высокого уровня, аналогичного языку С*
  - *Операторы условий: if, for, while*
  - *Пользовательские подпрограммы*
  - *Настройка представления результатов анализа*
  - *Автоматизированная печать графиков*
- *Эффективный инструмент управления во многих случаях*

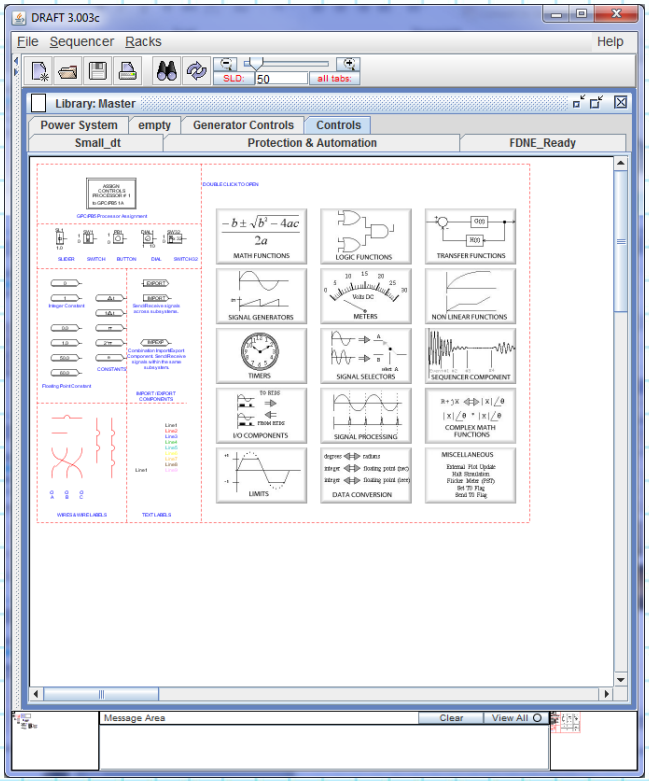


Программное обеспечение

Совершенная библиотека моделей компонентов

Библиотека моделей силовых элементов и систем управления



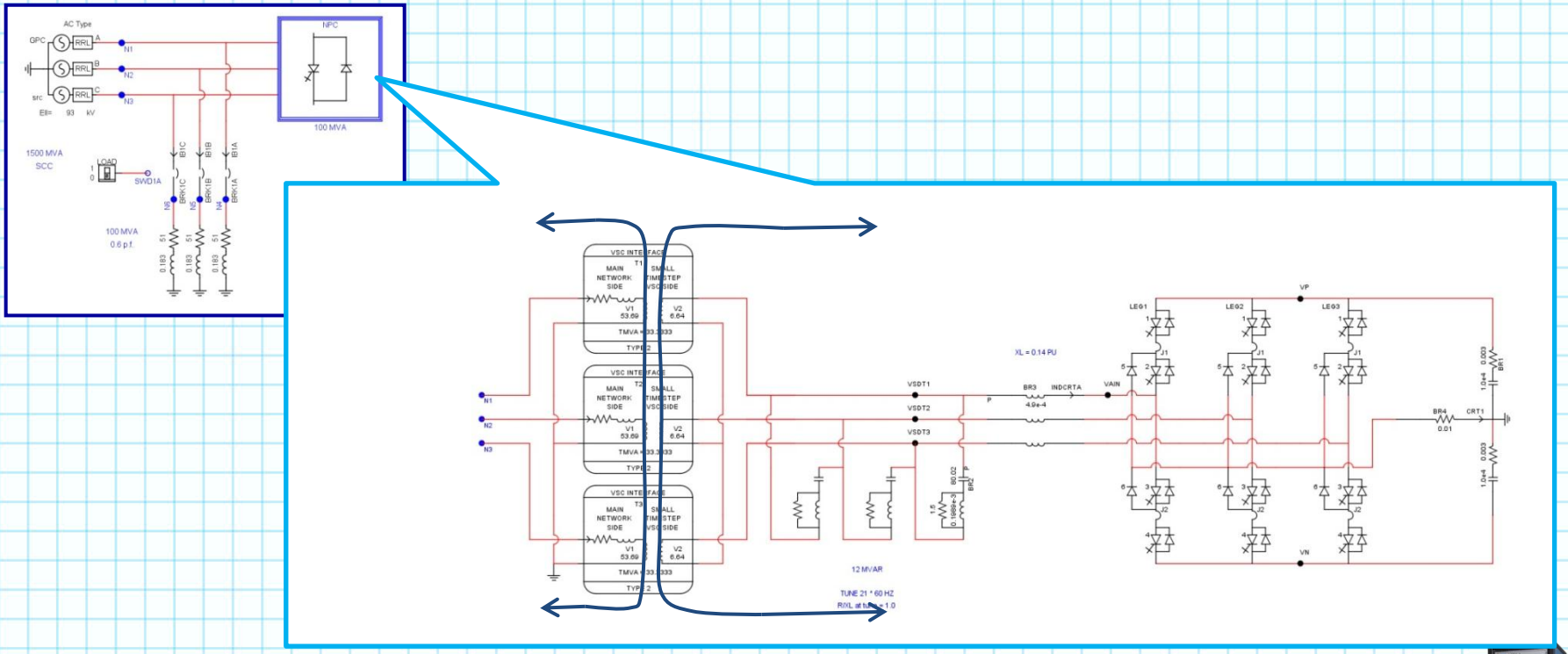


RTDS Technologies

The World Standard fo66r Real Time Digital Power System Simulation

Программное обеспечение

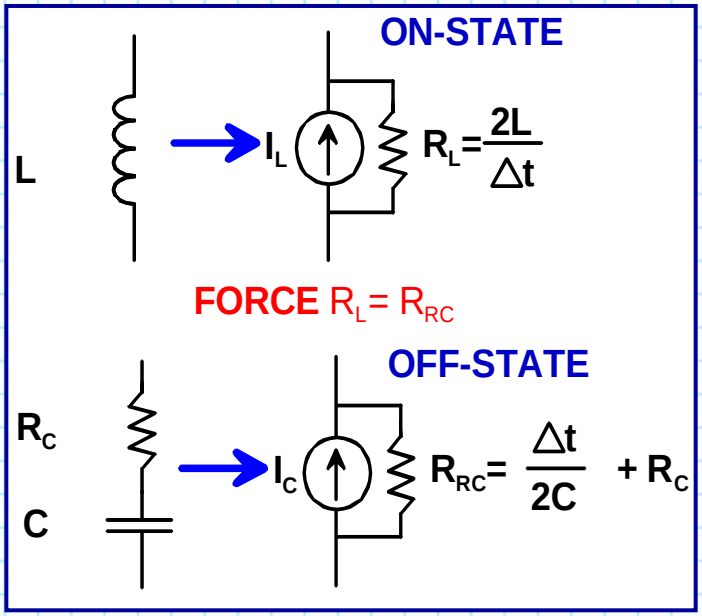
Подсистемы, имеющие малый шаг расчета



Программное обеспечение

Подсистемы с малым шагом расчета
(шаг расчета от 1 до 4 мкс)

- Нет необходимости пересчета матрицы проводимостей для расчетов узлов
- Ключи представлены как небольшие индуктивностей в замкнутом состоянии и малых емкости в разомкнутом состоянии
- Малое время шага необходимо для обеспечения высокой частоты включений-отключений
- Метод применим для произвольно настраиваемой топологии



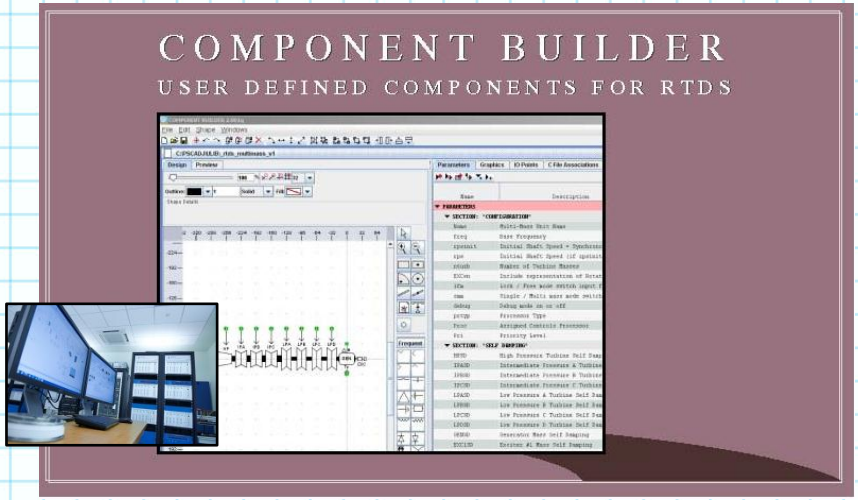
Программное обеспечение

Развитие ПО для RTDS – RSCAD CBuilder

CBUILDER позволяет пользователям разрабатывать собственные модели компонентов для использования в RTDS симуляторе

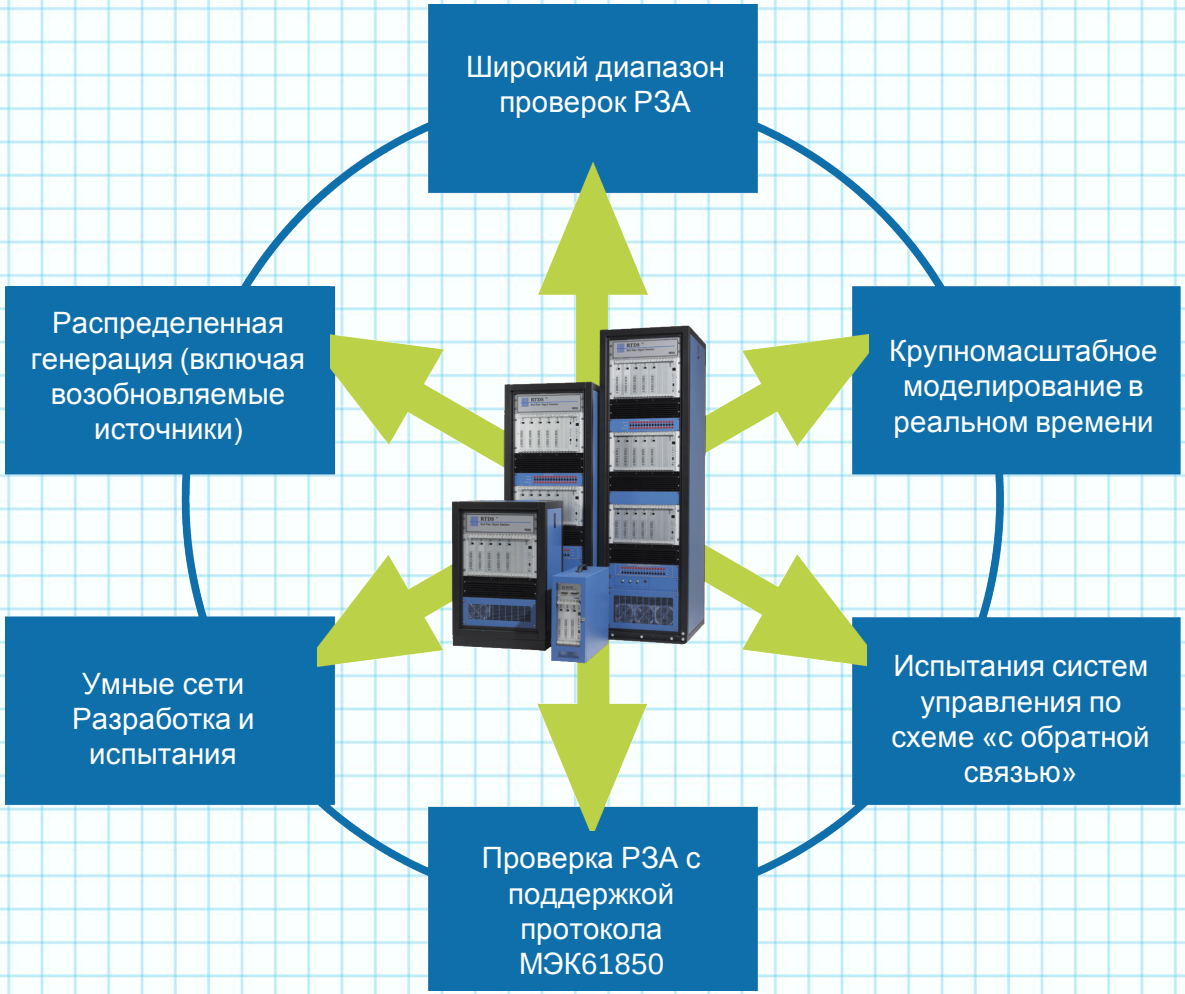
Разработанные пользователем модели работают в реальном времени с другими моделями компонентов, имеющимися в библиотеке RTDS

Модели CBUILDER поддерживается модулями PB5/GPC



В CBUILDER можно создавать как силовые элементы, так и системы управления

Применение RTDS



Применение RTDS

Проверка устройств защиты с использованием обратных связей

Проверка релейной защиты

Методы проверки релейной защиты

- Имитационные испытания
  - Типовые виды испытаний
  - Не используются сигналы реальных энергосистем
  - Используемые сигналы нереалистичны и не совпадают с сигналами, которые возникают при авариях.
- Испытания по осциллограммам
  - Используется записи с регистраторов аварийных процессов или смоделированные сигналы
  - Сигналы действительны только до момента срабатывания защиты
  - Только одно реле может быть проверено
- Испытания с обратными связями
  - Требуется симулятор реального времени для формирования сигналов близких к сигналам энергосистемы
  - Обратные связи обеспечивают полное взаимодействие проверяемого реле с моделируемой энергосистемой
  - Проверяться одновременно несколько устройств РЗА, включенных также как и в реальной энергосистеме

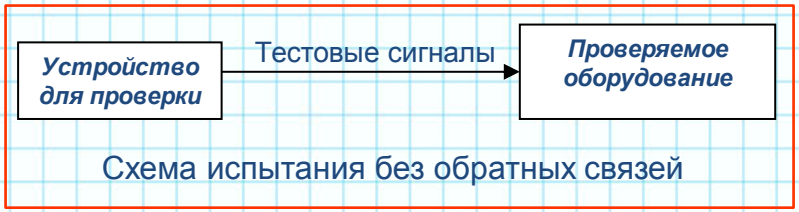


Схема испытания без обратных связей

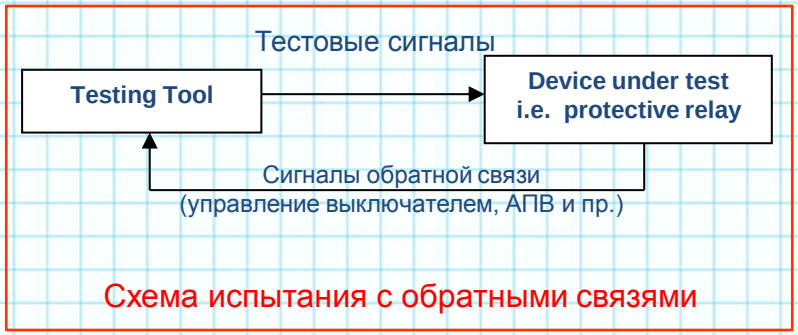
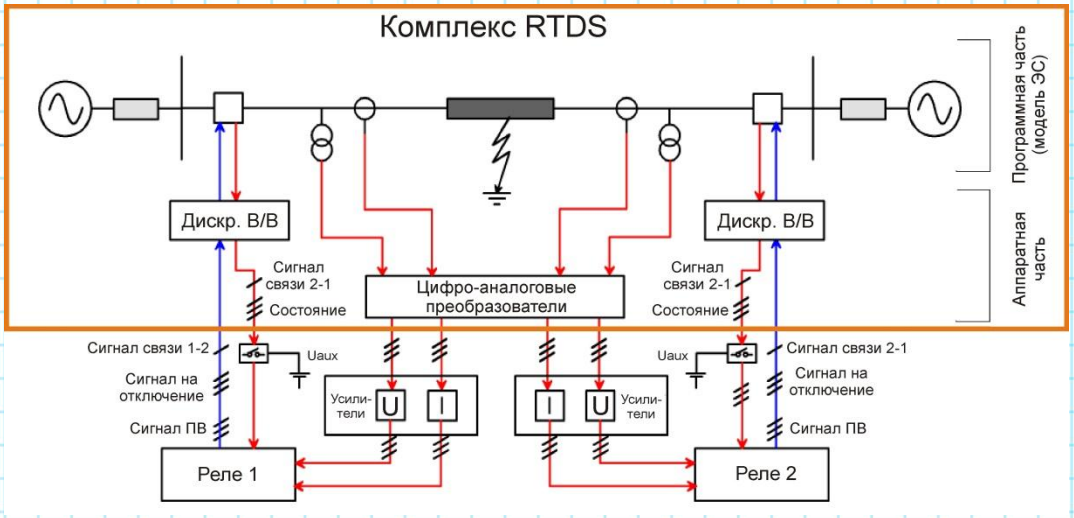


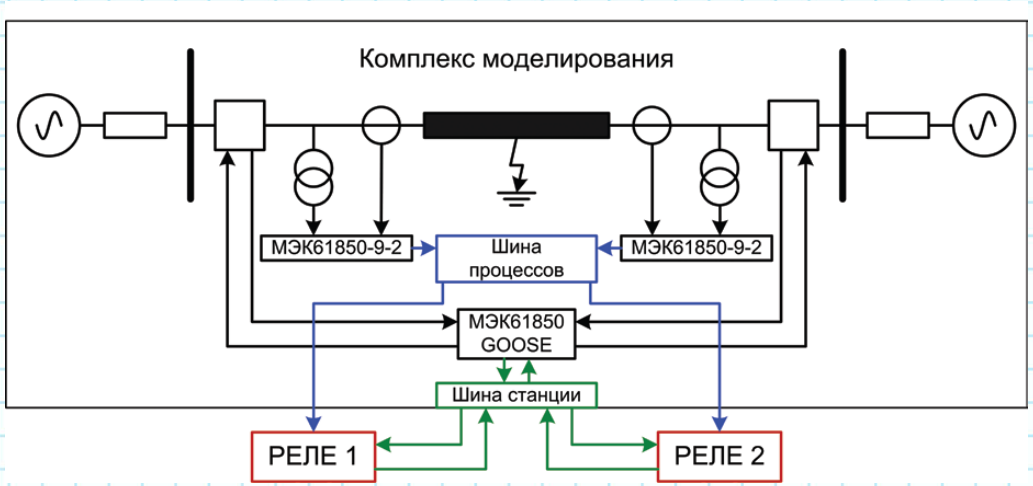
Схема испытания с обратными связями

Проверка релейной защиты



Интерфейс с аналоговыми сигналами

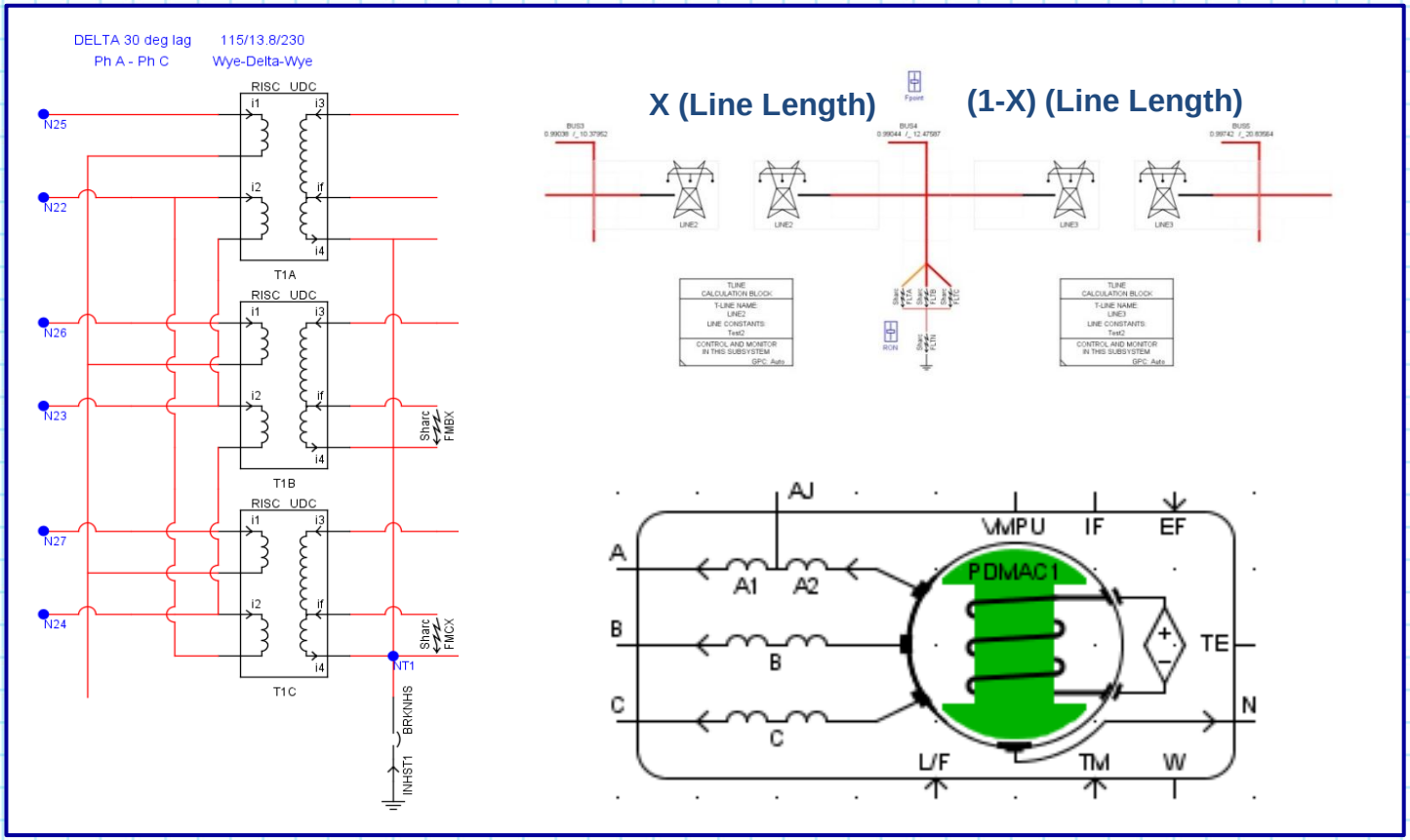
Интерфейс по протоколу МЭК 61850



RTDS Technologies

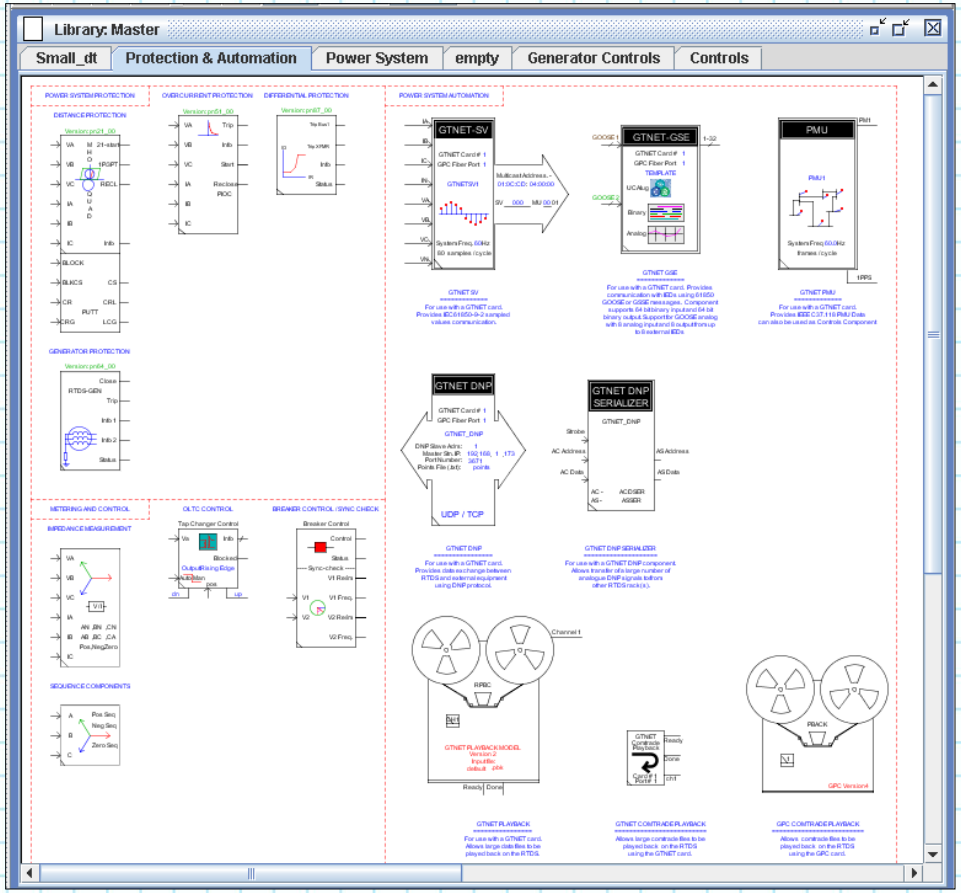
Проверка релейной защиты

Специальные модели для проверки релейной защиты



Защита и автоматика

Релейная защита, автоматика и PMU

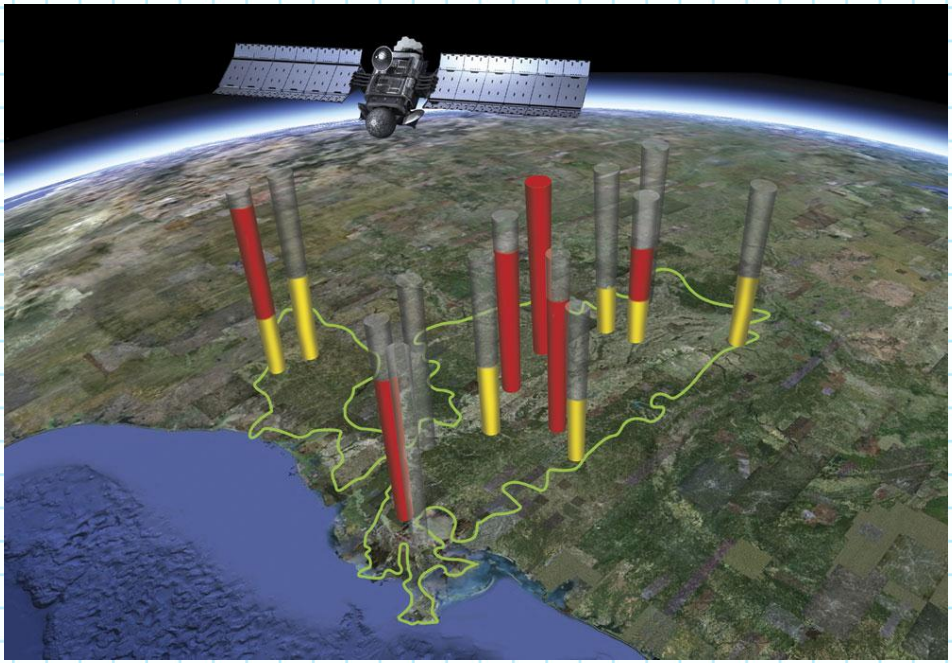


Phasor measurement unit (PMU) – устройство векторных измерений или синхрофазор

- ❑ Модели реле защиты
  - Защита линии
  - Защита генератора
  - Дифференциальная защита
  - Токовая защита
- ❑ Автоматическое управление
  - АПВ с контролем синхронизма
  - РПН
- ❑ Модели PMU
  - До 8 PMU устройств
  - Соответствует IEEE C37.118

Защита и автоматика

Проверка PMU–измерения на больших территориях и управление



В последнее время большое внимание уделяется взаимодействую изолированных систем

Управление на больших территориях и защита имеет много преимуществ и эффект

Система измерений на больших территориях на базе устройств PMU может обеспечить информацией глобально или мастера управления сетью.

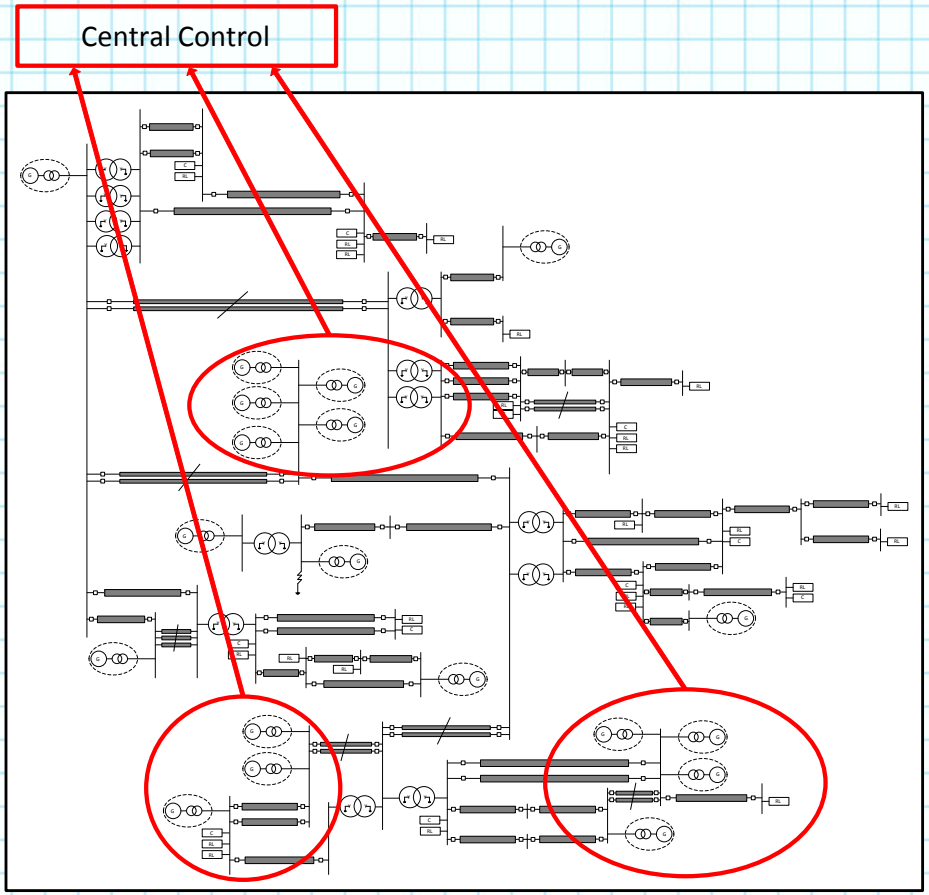
Защита и автоматика

Проверка PMU и глобальной релейной защита и автоматики

- Синхронизация по системам GPS
  - Синхронизация от внешних источников точного времени
  - Общее опорное время для сравнения результатов
  - Проверки для статической и динамической устойчивости
- GTSYNC
  - Прием сигналов: PPS, IRIG-B и IEEE 1588
- GTNET-PMU
  - IEEE C37.118 протокол

Глобальная защита и автоматика

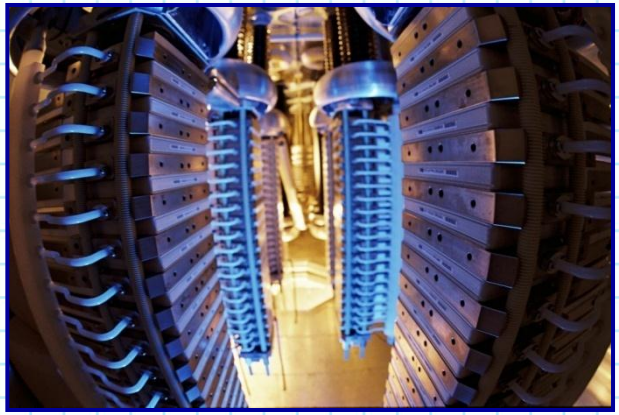
Испытания схемы корректирующей неправильные действия (RAS)



Проверка систем управления

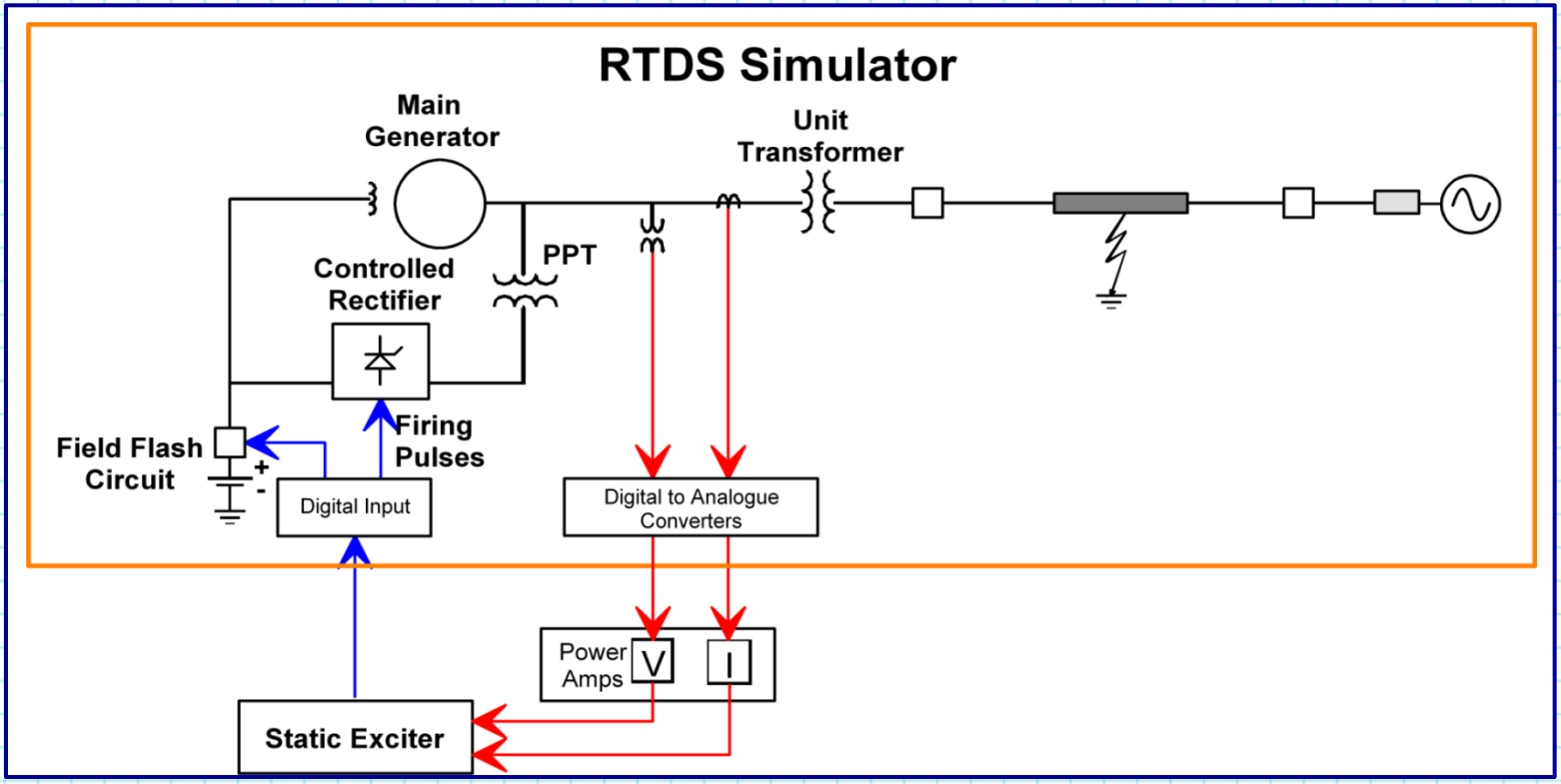
Основные требования:

- *Только истинное жесткое реальное времени позволяет взаимодействовать с внешним оборудованием*
- *Большое количество входов/выходов*
- *Возможность исследования крупномасштабных энергосистем*
- *Высокая точность и разрешающая способность*
- *Непрерывное взаимодействие с пользователем*
- *Стабильность при длительном моделировании*



Проверка систем управления

Испытания регуляторов возбуждения



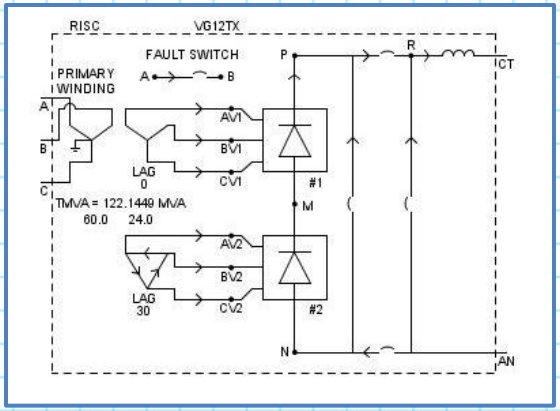
Проверка систем управления

Применение в системах управления

- *Высоковольтные системы постоянного тока (HVDC)*
  - Тиристорные схемы с улучшенным алгоритмом фазового управления
  - Схемы двух, трех и многоуровневых (MMC) преобразователей напряжения (VSC) используют подсети с малым шагом расчета
- *Статические компенсаторы реактивной мощности (SVC)*
- *Управляемые через тиристоры последовательно включенный конденсаторы (TCSC)*
- Статические синхронные компенсаторы (STATCOM)
  - Схемы двух, трех и многоуровневых (MMC) преобразователей напряжения (VSC) используют подсети с малым шагом расчета
- *Генераторы (возбудители, регуляторы, стабилизаторы)*

HVDC

Модель преобразователя постоянного тока:



- *Стандартный подход с 2-мя значениями сопротивлений:*
  - в выключенном состоянии большое сопротивление
  - во включенном состоянии малое сопротивление
- *При каждом переключение переформируется матрица проводимостей*
- *Модели 6- и 12-канальных силовых ключей включающие преобразующий трансформатор, конвертор и различные внутренние повреждения*
- *Группа силовых ключей, включая вторичные цепи DC*
- *Подключение группы силовых ключей как элементов с переменной проводимостью*
- *Улучшенный алгоритм фазового управления, обеспечивающий непрерывный отклик на запускающие импульсы*

Умные сети и распределенная генерация

Распределенная генерация (DG)

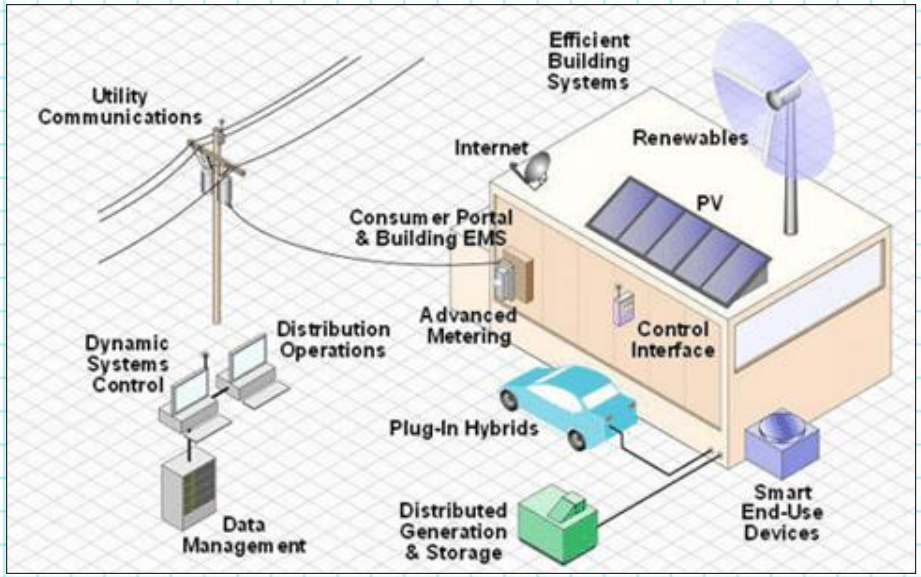
Возобновляемые источники энергии

Исследование взаимодействия малых энергосистем

Умные сети и распределенная генерация

Основные Требования

- Высокоуровневые протоколы
  - МЭК 61850
  - DNP3
  - IEEE C37.118

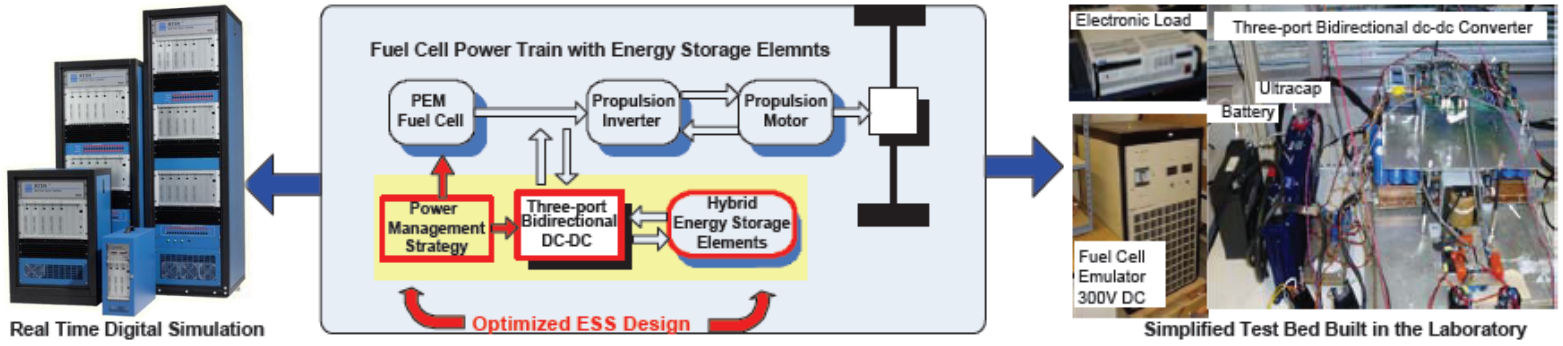


- Альтернативные источники энергии
  - Ветроустановки
  - Солнечные панели
  - Топливные элементы
  - Силовые электронные преобразователи

Электротранспорт и сохранение энергии

Моделирование электромобилей (EV) и индивидуальной генерации (V2G)

Проектирование аккумулирующих и преобразующих устройств типа DC/DC для электромобилей



Проектирование оптимальной системы хранения энергии для транспортного средства на базе топливных элементов

SCADA Системы

Интерфейс SCADA систем и ее проверка

GTNET – DNP

Цифровое моделирование статус/положение (например, положение выключателя) 1024 (частота опроса 1000 Гц)

Цифровое моделирование управление/вход (например, команды на выключатель) 512 (частота опроса 1000 Гц)

Аналоговые выходы 500 (частота опроса 4 Гц)

Аналоговые входы 100 (частота опроса 4 Гц)

GTNET – DNP поддерживает одно ведущее устройство с частотой опроса 5 Гц

Обучение и обслуживание

Услуги по обслуживанию оборудования симуляторов, поддержка в создании модели и дублирующий технический контроль за крупными проектами HVDC, SVC и пр.

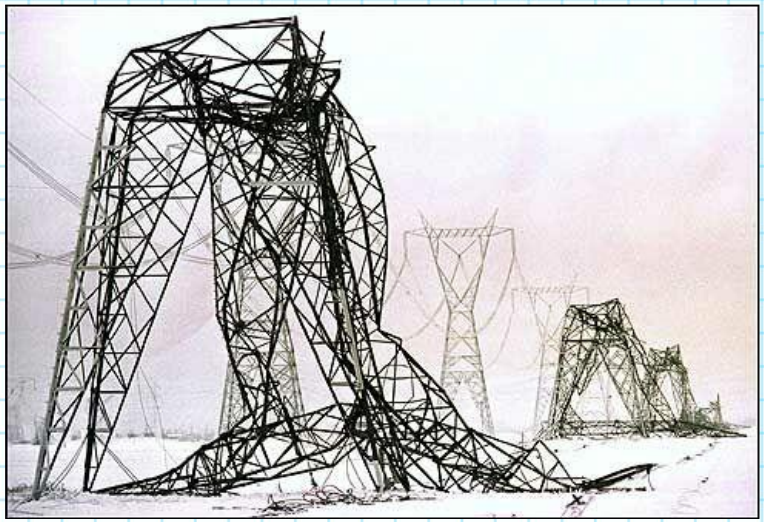
- Furnas (Бразилия)
- TNB (Малазия)
- CSG (КНР)
- SEPC (КНР)
- ESKOM (>FH)
- SEC (Саудовская Аравия)
- Power Grid (Индия)
- Transpower (Новая Зеландия)
- NamPower (Намибия)
- ONS (Бразилия)
- RTE (Фрнация)
- DEWA (ОАЭ)
- …

Крупномасштабное моделирование

Крупномасштабное моделирование в реальном времени

- *Эффективность реального времени*
  - Множество вариантов за меньшее время дает больше информации и лучшее понимание
- *Полоса пропускания (0-3000) Гц с*
  - Наблюдение за всеми гармониками
  - Все аспекты релейной защиты и автоматики могут и должны учитываться
- *Детальное управлением взаимодействием энергосистем*
  - Моделирования целиком или подключение внешнего оборудования

Исследование восстановления энергосистемы



- **Крупнейший в мире симулятор реального времени**
- **Моделирует 800 трехфазных шин**
- **Чрезвычайная ситуация – снегопад 2008 г**
  - Интенсивное повреждение линий 110 кВ
  - Более 7000 повреждений на линии
  - Миллионы потребителей без электричества
  - Инженеры круглосуточно работали с моделью сети в RTDS для выработки порядка восстановления системы
- **СИГРЭ Париж 2010 - Безопасность и надежность электросетей**
  - Моделирования на комплексах RTDS определено в качестве одной из четырех ключевых стратегий для обеспечения надежности и безопасности энергосистем

Противодействие «эффекту домино»

Порядок испытания оборудования

Исследуется система целиком

- Сети до 1500 шин
- Детальное моделирование работы защиты и автоматики
- Реалистичность поведения во всех режимов работы

Работа в реальном времени

- Позволяет проверять промышленные контроллеры
- Операторы имеют реалистичную картину обратной связи
- Физический SCADA интерфейс посредством DNP3

Валидация

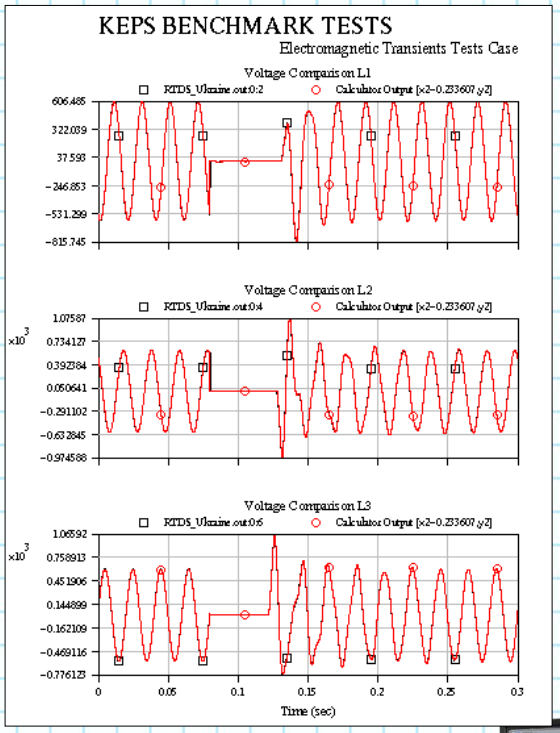
При валидации используется

- Испытания внутри компании RTDS Technologies
- Независимая валидация у потребителя
- Коммерческие исследования
- Отраслевые тесты, включая:
  - ✓ Электромагнитные переходные процессы
  - ✓ Электромеханические переходные процессы, динамическая устойчивость
  - ✓ Установившийся режим, статическая устойчивость

Валидация

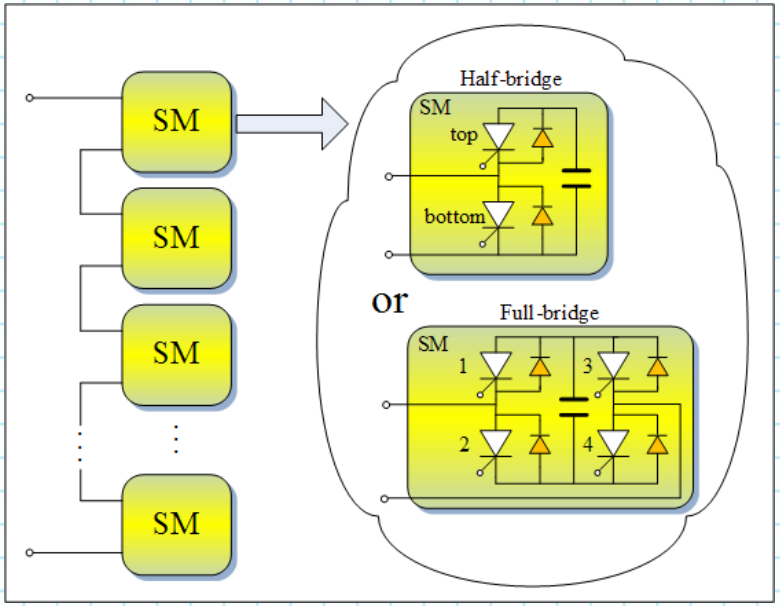
Сравнение результатов, полученных на RTDS с результатами сторонних источников

- Программы расчета переходных процессов PSCAD, EMTP, ATP и пр.
- Программы расчета динамической устойчивости PSS/E, Y-Method, Netomac, BPA.
- Программы расчета установившегося режима PSS/E, Netomac, BPA.
- Рекомендованные контрольные примеры CIGRE и IEEE.
- Измерения в реальных энергосистемах.



Последние разработки

Модель ключей ММС



- **HVDC и STATCOM**
- **Сложная задача балансирования напряжения на батарее конденсаторов**
  - Необходимо поддерживать напряжение на конденсаторе в заданном допуске
- **Трудно контролировать большое количество сигналов управления множества ключей**
  - 500 уровней на ключ
  - 3000 контролируемых конденсаторов на каждой ПС
  - 6000 запускающих импульсов для тиристоров на каждой ПС

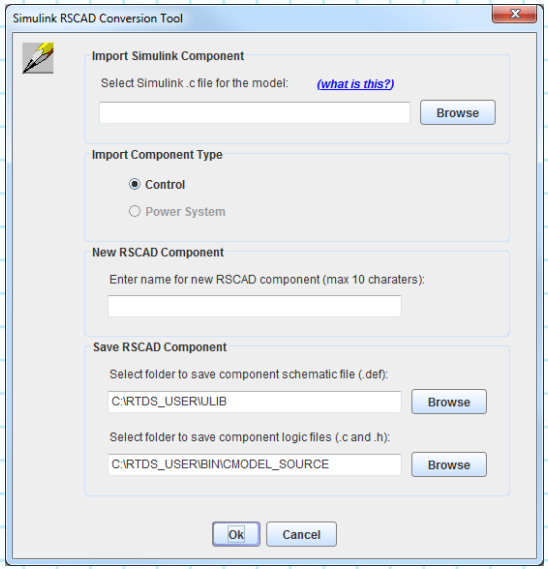
Последние разработки

Модель ключей ММС

- *Модель сетей с малым шагом расчета*
- *CHAIN V5*
  - Процессор поддерживает максимум 60 подмодулей на ключ
  - Используется для проверки систем фазового регулирования
- *MMC5*
  - Процессор поддерживает максимум 640 подмодулей на ключ
  - Идеально подходит для балансировки напряжений на конденсаторах
  - Не подходит для фазного регулирования, но очень полезна для исследований поведения системы и задач верхнего уровня
- *FPGA_U5*
  - Процессор поддерживает максимум 512 подмодулей на ключ
  - Необходима поддержка ММС
  - Используется для проверки систем фазового регулирования
  - Коммуникации по последовательному протоколу Aurora
  - Доступны балансировка напряжений на конденсаторах и запуска ключей

Последние разработки

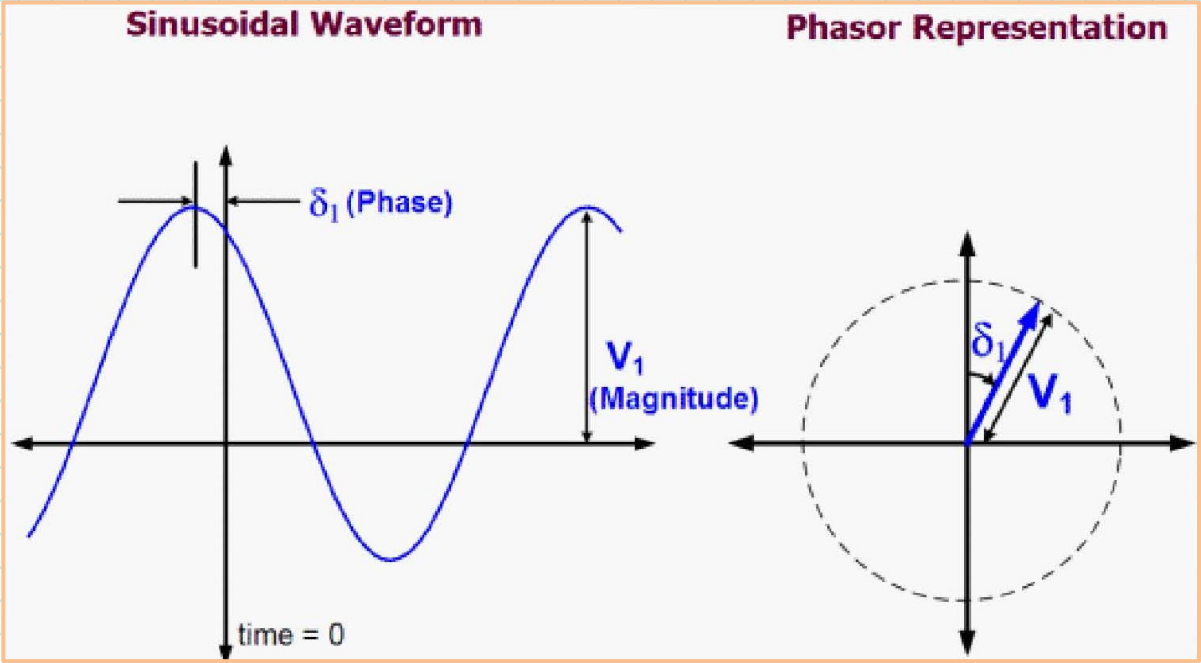
- *Конвертирование из Matlab/Simulink в RSCAD*
  - Только компоненты управления
  - С-код сгенерированный в Matlab/Simulink
  - При импорте используется CBuilder
- *МЭК 61870-5-104*
  - Новый GTNET протокол для SCADA систем
- *Дополнение GTNET-GSE*
  - Более гибкая конфигурация IEC 61850 GOOSE
  - Повышена точность моделирования конкретных устройств
- *Утилиты проверки PMU*
  - Генератор стандартных сигналов



Введение в PMU

Устройство векторных измерений (PMU):

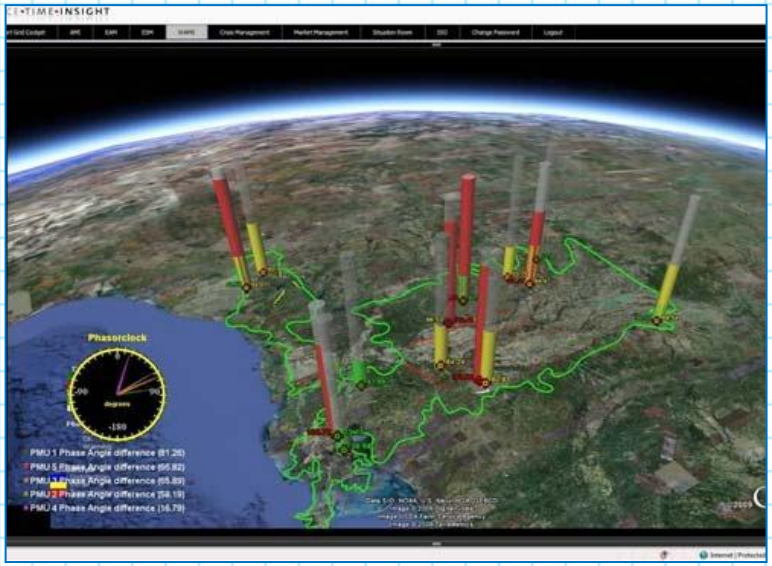
- Измерения в соответствии с IEEE C37.118
- Устройство PMU предоставляет информацию о токах и напряжениях в заданной точке в векторном виде.



Введение в PMU

Использование PMU

- Обширная измерительная система
- Обширная резервная защита
- Оценка состояний
- Стабильность напряжений
- Динамическая устойчивость
- Ситуационный план
- Защита и автоматика в реальном времени
- Обнаружение и устранение колебаний
- Валидация модели системы и нагрузки
- Загрузка линий в реальном времени
- Обнаружение повреждений
- Восстановление системы



Испытания PMU

Что необходимо для проверки PMU?

- Тестовые сигналы для проверки PMU должны генерироваться в соответствии с требованиями стандарта IEEE C37.118.1-2011
- Синхронизация тестовых сигналов по GPS
- Повторяемость и воспроизводимость испытаний
- Протокол испытаний
- Стандарт определяет требования к характеристикам PMU по классу защита (P класс) и по классу измерений (M- класс)
- Без качественных средств испытаний, пользователь должен сам разрабатывать и совершенствовать методы проверки устройств PMU

RTDS Technologies предлагает средства для проверки PMU

Требования к испытаниям PMU

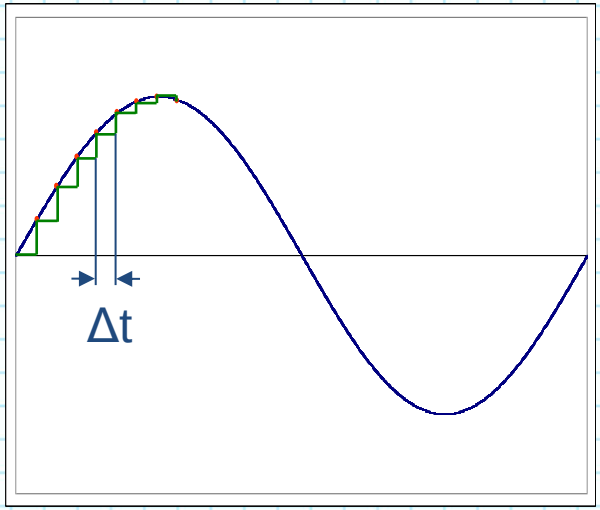
Виды испытаний PMU устройств

- Испытания отдельных PMU устройств
  - Оценка статической и динамической устойчивости
  - Специфицирование для коммерческого учета
  - Специфицирование для функций защиты
  - Суммарная векторная погрешность (TVE)
- Синхронизированные по GPS
  - Обязательное требование для проверки TVE
  - Обеспечивает повторяемость результатов
  - Возможность совместного моделирования физических и виртуальных устройств с использованием общего опорного времени.

Требования к испытаниям PMU

Моделирование электромагнитных переходных процессов

- Расчет мгновенных значений в строго отведенное время шага (dt)
- Кварцевая стабилизация времени шага dt
- Время, затрачиваемое для вычисления мгновенных значений, может быть меньше, чем время шага dt



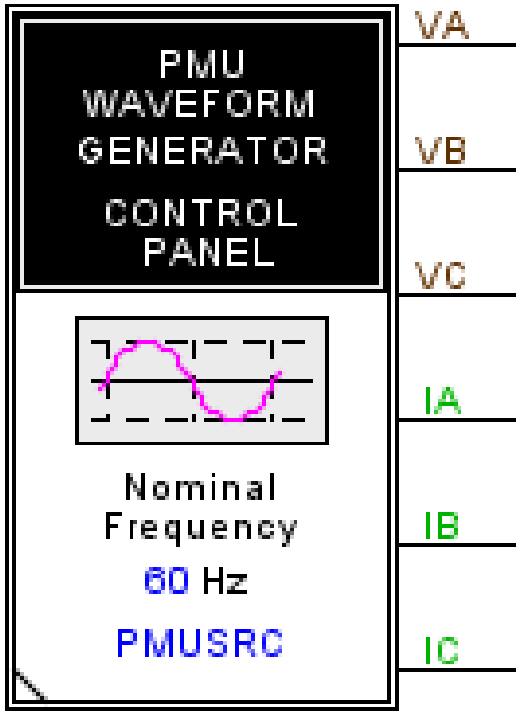
Пример нарушения синхронизации

- Выход 60Гц подключен к PMU
- PMU измеряет с частотой 60.001 Гц (погрешность 16.7 миллионных)
- Подстройка системы к 59.99881 Гц и PMU измеряет 60.0 Гц (погрешность 20 миллионных)
- В худшем случае обеспечивается 60.006 Гц вместо 60 Гц

Проверочные сигналы

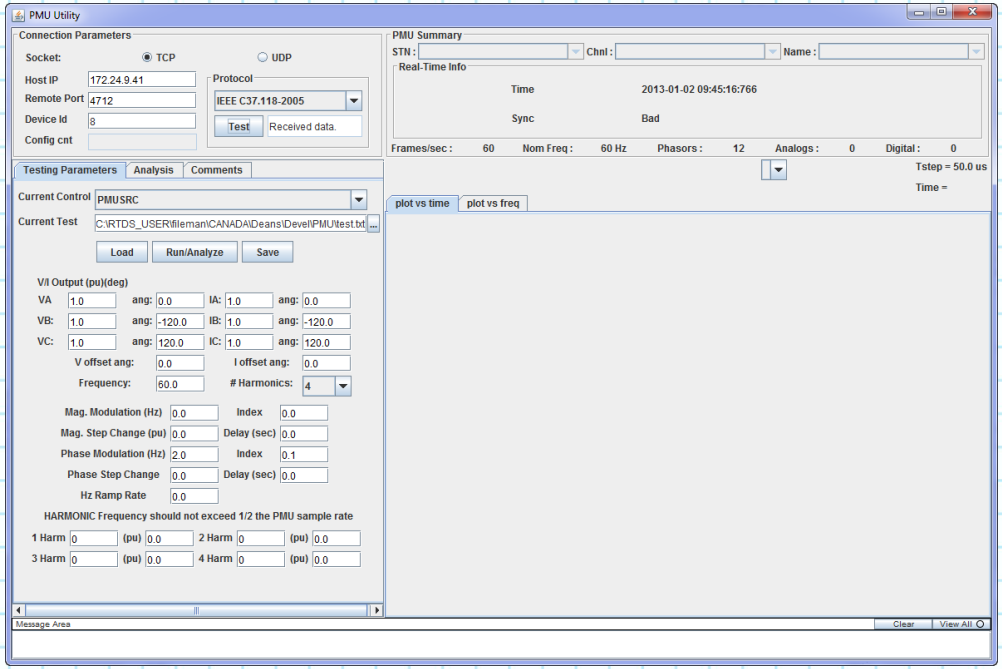
PMU управление сигналами:

- Возможно управление трехфазными сигналами для проверки PMU:
- Виды управления:
  - Фазовый сдвиг
  - Изменение частоты
  - Модуляция фазы
  - Модуляция амплитуды
  - Пошаговое изменение амплитуды с паузой
  - Пошаговое изменение фазы с паузой
  - Генерация до 4-ех гармонических составляющих
- Изменения синхронизируются по сигналам 1PPS



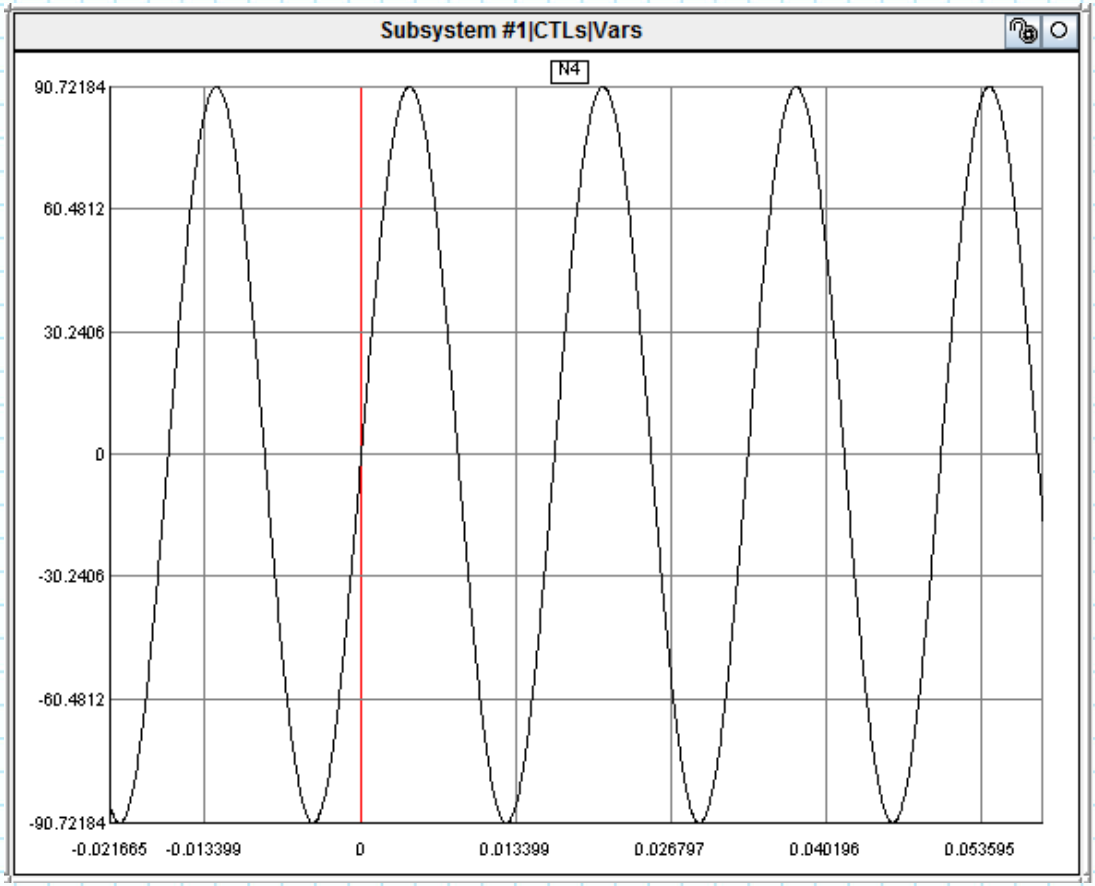
Утилиты для проверки PMU

- Интегрированный в рабочую среду компонент формирования сигналов PMU
- Регистрация (сохранение) данных с PMU во время проверки
- Сравнение экспериментальных значений и расчетных значений
- Формирование графиков и протоколов проверки и их сохранение



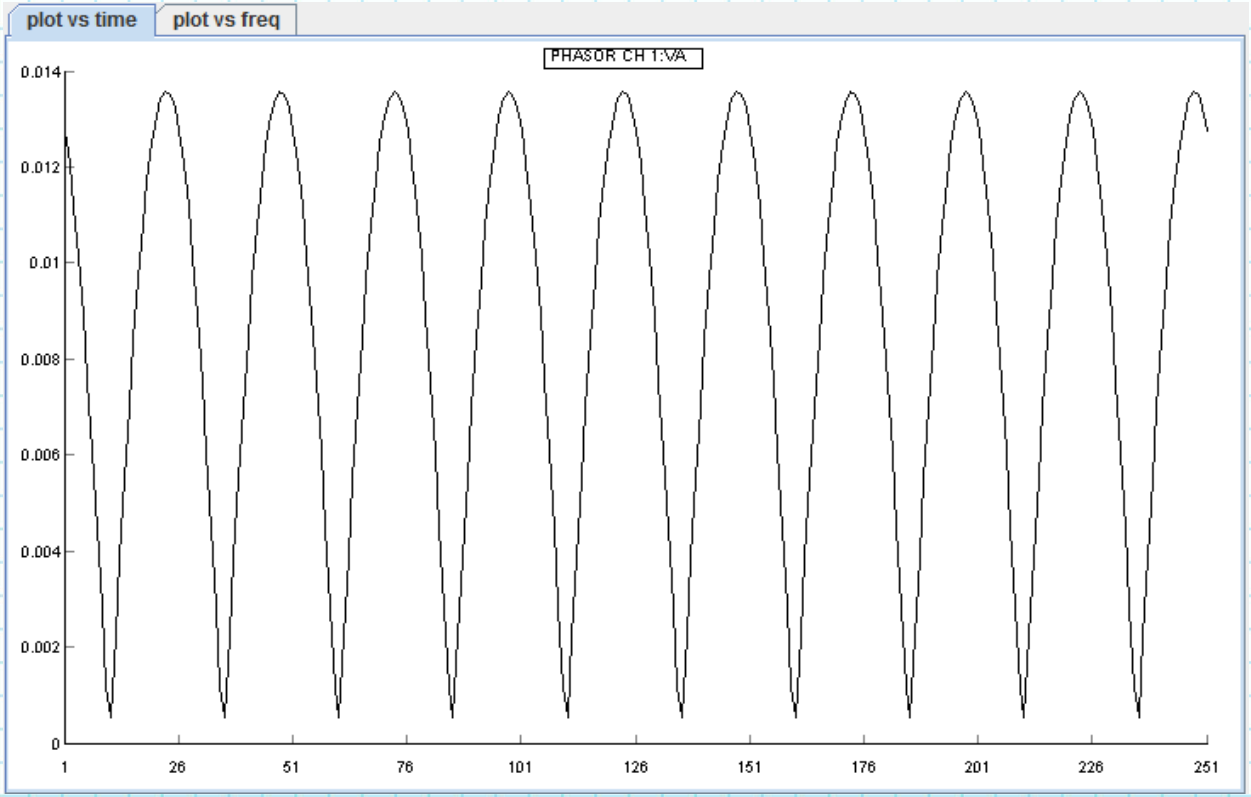
Утилиты для проверки PMU

Запуск модуляции фазы по сигналу 1PPS



Утилиты для проверки PMU

Результаты суммарных векторных отклонений (TVE) во время проверки с модуляцией фазы.



Заключение

Эффект от применения системы моделирования в реальном времени

- Представляет существенный шаг вперед в понимании работы электроэнергетических систем
- Позволяет большому числу организаций получить собственные системы моделирования
- Сочетает в себе точность цифрового моделирования с минимальным временем отклика, характерным для аналоговых систем моделирования
- Обеспечивает инструмент для детального изучения и проверки работы выпускаемых и разрабатываемых реле защиты до установки их на объект.
- Обеспечивает детальное изучение поведения энергосистемы до, во время и после аварии.
- Повышает уверенность и надежность во время разработки, внедрения и эксплуатации энергосистем и их компонентов.