

**Программно-аппаратный комплекс  
"Симулятор RTDS на платформе NovaCor"**

**Техническое описание**  
перевод с английского



г.Чебоксары 2017.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение.....	3
1.1. Испытания устройств и комплексов РЗА.....	5
1.2. Испытания систем управления и автоматического регулирования .....	7
1.3. Исследования установок HVDC и FACTS с элементами силовой электроники .....	8
1.4. Исследования PMU и централизованных систем релейной защиты и управления.....	11
1.5. Интеллектуальные сети и возобновляемые источники. ....	11
1.6. Силовая электроника.....	12
1.7. Программно-аппаратное моделирование с использованием силового .....	13
оборудования PHIL .....	13
1.8. Образование и обучение .....	14
2. Описание симулятора .....	14
2.1. Аппаратная часть симулятора RTDS.....	16
2.2. Модуль NovaCor .....	16
2.2.1. Процессор.....	17
2.2.2. Возможности.....	17
2.2.3. Коммуникационные порты и интерфейсы модуля NovaCor .....	17
2.3. Интерфейсные модули .....	19
2.3.1. Модуль аналоговых выходов GTAО .....	19
2.3.2. Модуль аналоговых входов GTAI .....	19
2.3.3. Модуль дискретных входов GTDI .....	20
2.3.4. Модуль дискретных выходов GTDO .....	20
2.3.5. Модуль синхронизации времени GTSYNC .....	21
2.3.6. Модуль GTFPGA .....	21
2.3.7. Модуль сетевых протоколов GTNETx2 .....	23
2.3.8. Модуль интерфейса передних панелей GTFPI .....	26
2.3.9. Панель ввода и вывода низковольтных дискретных сигналов .....	26
2.3.10. Панель дискретных выходов высоковольтных сигналов .....	26
2.4. Программное обеспечение RSCAD .....	27
2.4.1. Интерактивная среда с графическим интерфейсом .....	27
2.4.2. Компилятор .....	29
2.4.3. Библиотека моделей компонентов энергосистемы и систем управления .....	30
2.5. Условия эксплуатации симулятора RTDS .....	32
3. Приложение .....	33



## 1. ВВЕДЕНИЕ

Симулятор RTDS (далее симулятор) – это программно-аппаратный комплекс, предназначенный для численного имитационного моделирования в реальном времени электрических, электромагнитных и электромеханических процессов в заданной виртуальной (численной) модели энергосистемы. Симулятор обеспечивает взаимодействие виртуальной модели с внешним физическим оборудованием посредством аналоговых и дискретных сигналов, а также цифровых интерфейсов (протоколов).

Симулятор RTDS предназначен для выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполнения инженерных расчетов и проведения испытаний оборудования, для применения в образовательном процессе высшей школы. Симулятор используется для исследований процессов в традиционных и инновационных электроэнергетических системах постоянного и переменного тока и для проектирования и испытаний устройств, предназначенных для эксплуатации в указанных системах.

Симулятор RTDS представляет собой свободно конфигурируемую модульную конструкцию, размещаемую в специализированном шкафу или в группе шкафов типоразмера 19". Количество и состав модулей симулятора выбирается по требованию заказчика, исходя из размера моделируемой энергосистемы и требуемого количества внешних подключений. В приложение 1 приведены примеры энергосистем и требуемые для их симуляции вычислительные ресурсы симулятора RTDS на базе новой платформы NovaCor.

Область применения симулятора RTDS включает в себя:

### ➤ Испытания систем управления и защиты.

- Преобразователи с линейной коммутацией (LLC) для высоковольтных (HVDC) и ультравысоковольтных (UHVDC) систем постоянного тока.
- HVDC на базе многоуровневых преобразователей (MMC).
- HVDC на базе 2-х и 3-х уровневых преобразователей.
- Компенсаторы реактивной мощности SVC (для промышленных и сетевых целей).
- Гибкие системы передачи переменного тока (FACTS), включая STATCOM, UPFC, SSSC, DVR и др.
- Устройства активной продольной компенсации TCSC.
- Возбудители и регуляторы напряжения синхронных генераторов.
- Системы динамической стабилизации энергосистемы (PSS).
- Распределенная генерация и возобновляемые источники энергии (солнечные, ветровые, топливные элементы и пр.).
- "Умные" сети Smart Grid и взаимодействие по цифровым протоколам МЭК 61850, МЭК 61889, IEEE C37.118 и по протоколам АСУТП МЭК 60870-5-104, DNS, ModBus.
- Разработка последовательности восстановления энергосистемы при авариях (RAS).

### ➤ Испытания устройств релейной защиты

- Испытания устройств и комплексов РЗА в замкнутом цикле с обратной связью:
  - защита линий (дистанционная и дифференциальная);
  - защита трансформаторов;
  - защита генератора;
  - защита шин и пр.
- Проверка устройств РЗА с традиционными аналоговыми входами.



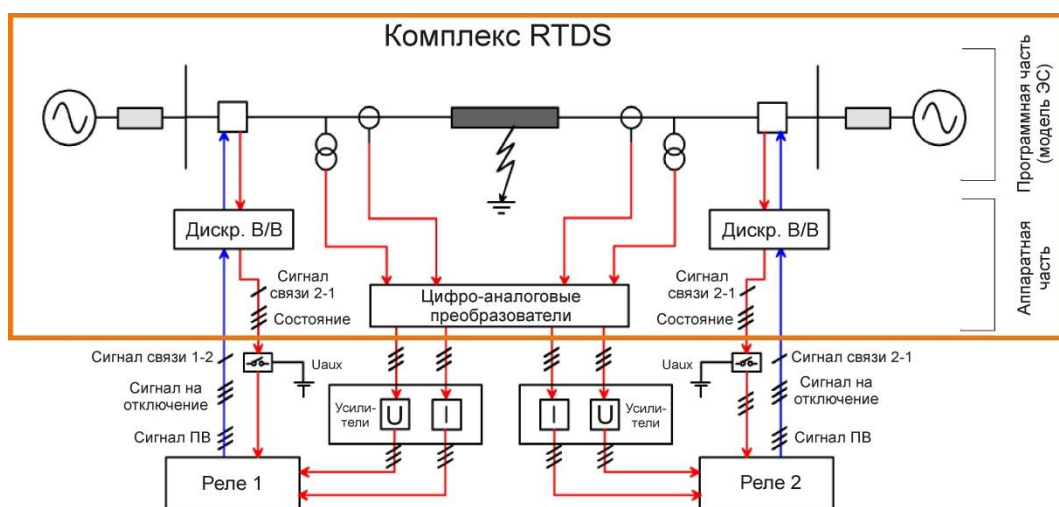
- Проверка устройств РЗА с цифровым интерфейсом по протоколам МЭК61850 (GOOSE, SV, MMS) и по МЭК 61869-9.
  - Восстановления энергосистемы после аварийных отключений.
  - Системы централизованной защиты и глобального мониторинга (WAMP AC).
- **Исследования установок силовой электроники.**
- Системы постоянного тока HVDC (линии и вставки):
    - проектирование преобразователей;
    - испытания системы управления в замкнутом цикле с обратной связью;
    - исследования взаимовлияний с системами переменного тока;
    - 2-х, 3-х и многоуровневые преобразователи VSC и VSC-MMC.
  - Системы переменного тока FACTS (SVC, TCSC, STATCOM, UPFC, SSSC и пр.):
    - проектирование систем;
    - испытания системы управления в замкнутом цикле с обратной связью;
    - исследования взаимовлияний с системами переменного тока;
    - 2-х, 3-х и многоуровневые преобразователи VSC и VSC-MMC.
  - Электропривод:
    - разработка и испытания электропривода в замкнутом цикле с обратной связью;
    - изменяемая модель и структура силового преобразователя.
  - Прочие полупроводниковые системы на базе силовой электроники.
- **Интеллектуальные сети и возобновляемые источники.**
- Исследования и интеграция возобновляемых источников энергии:
    - ветрогенераторы различных типов, включая асинхронные с двойным полем DFIG и синхронные с постоянными магнитами PMCM;
    - солнечные батареи;
    - топливные элементы;
    - механические инерционные накопители;
    - батареи аккумуляторов;
    - взаимодействие электромобилей с электрической сетью.
  - Анализ новых стратегий управления и защиты электрических сетей.
  - Исследования взаимодействий по новым протоколам связи высокого уровня, например, МЭК 61850.
  - Исследования микросетей и распределенной генерации.
- **Исследование энергосистем в целом.**
- Исследования устойчивости энергосистемы в переходных режимах.
  - Электромагнитные переходные процессы.
  - Разработка и испытания систем централизованной защиты и глобального мониторинга.
  - Восстановление энергосистемы после полного отключения.
  - Изолированная работы и противоаварийная автоматика.
- **Образовательная деятельность.**
- Дипломное проектирование и работы на соискание ученой степени.
  - Практическая демонстрация устройств РЗА в условиях работы, близких к реальным.
  - Наглядная демонстрация студентам динамических процессов в реальном времени (например, качаний мощности) для лучшего закрепления теоретических знаний.
- **Исследования судовых энергосистем.**
- Моделирование традиционных корабельных электрических систем.



- Моделирование полностью электрифицированных судов (электроходов):
  - системы переменного тока;
  - системы постоянного тока;
  - гибридные системы;
  - мощные импульсные потребители (электрокатапульты и пр.).
- Программно-аппаратное моделирование с использованием силового оборудования РНЦ.
  - Исследования микросетей.
  - Исследования систем распределенной генерации, например, солнечных батарей PV и топливных элементов FC.
  - Исследования и испытания силового оборудования:
    - механического;
    - электрического.

### 1.1. Испытания устройств и комплексов РЗА

В симуляторах RTDS реализованы самые передовые и эффективные методы проведения испытаний устройств РЗА, которые основываются на том, что эти устройства подключаются к имитационной модели энергосистемы. Программная среда для проведения моделирования имеет удобный и гибкий интерфейс и позволяет подвергать устройства РЗА практически всем видам возможных воздействий, характерных для их условий эксплуатации. Вследствие постоянной обратной связи между РЗА и моделью можно получить полную картину взаимодействий систем релейной защиты и энергосистемы.



Структурная схема для моделирования систем РЗА с аналоговым интерфейсом

На рисунке приведена структурная схема для моделирования энергосистемы на симуляторе RTDS, состоящую из двух независимых источников, соединяющей их линии электропередачи, выключателей, измерительных трансформаторов тока и напряжения. Также имеются элементы преобразования аналоговых и дискретных сигналов. С выхода цифро-аналогово преобразователя (ЦАП) RTDS аналоговые сигналы в виде мгновенных значений тока и напряжения по всем трем фазам в начале и конце линии поступают на усилители, которые доводят их амплитуду до уровня, используемого во вторичных цепях подстанций. Усиленные сигналы поступают на штатные входы устройств РЗА, обрабатываются ими, а дискретные сигналы от выходных контактов устройства поступают на вход симулятора и

попадают в модель в качестве команд управления выключателем. Информация о текущем положении виртуального выключателя также в виде дискретных сигналов поступает от симулятора к устройству РЗА.

В упрощенной модели на ЦАП подаются вычисленные значения тока и напряжения в первичных цепях с учетом коэффициента масштабирования. Полученные таким образом сигналы максимально идеализированы т.к. у них отсутствуют искажения, возникающие в измерительных трансформаторах. В более детальных моделях измеренные значения в первичных цепях подвергаются контролируемому преобразованию в виртуальных измерительных трансформаторах (ТТ, ТН) с учетом процессов насыщения сердечника и остаточной индукции и подаются на ЦАП. Такие сигналы максимально схожи со вторичными сигналами на электрических подстанциях (ПС). Таким образом, использование в модели виртуальных измерительных трансформаторов позволяет учесть их влияние на работу систем защиты.

Для вывода аналоговых сигналов в симуляторе RTDS используются модули вывода аналоговых сигналов GТАО, сигналы с которых могут подаваться на усилители тока и напряжения либо непосредственно на некоторые устройств РЗА, имеющие особые низковольтные входы. Для ввода и вывода дискретных сигналов обычно достаточно модуля GТFPI, к которому подключаются панели с приборными гнездами для удобного подключения оборудования. Для ввода данных в симулятор RTDS через панель используются сигналы от "сухих" контактов, а для вывода дискретных сигналов используется быстродействующее реле.

Симулятор RTDS можно использовать при испытаниях устройств РЗА с цифровым интерфейсом. В отличие от традиционных устройств РЗА обмен аналоговой и дискретной информацией в таких устройствах осуществляется в цифровом виде по специально разработанному протоколу МЭК 61850. На структурной схеме для моделирования "цифровой" ПС, приведенной ниже вместо ЦАП и усилителей мощности используются шины передачи цифровой информации: шина процессов и шина станции. Шина процесса используется для передачи информации о мгновенных значениях тока и напряжения в виде потока SV, представляющего собой непрерывный цифровой поток выборок (синхронных измерений). Шина станции служит для, так называемых, горизонтальных связей между оборудованием ПС и передачи по ней дискретной информации в виде GOOSE сообщений.

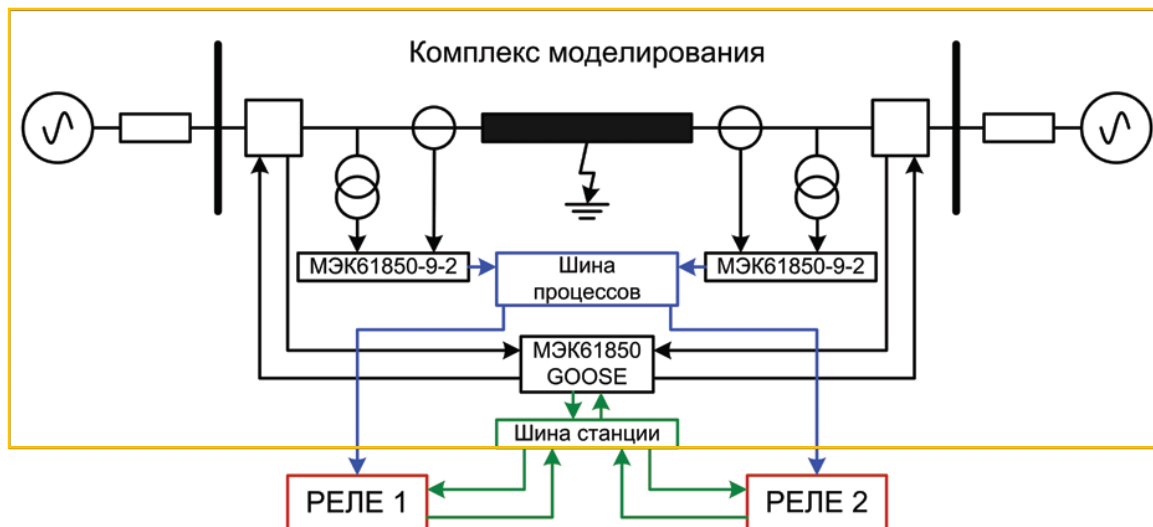
Физически сигналы этих шин формируются при помощи интерфейсных модулей GTNETx2 или GTFPGA-SV.

В приведенных схемах моделирования, устройства РЗА, подключенные к симулятору, могут измерять токи и напряжения и в случае обнаружения ими КЗ, могут подавать команду на отключение выключателя с последующем повторным включением. Так как симуляция выполняется в реальном времени, то сигналы действия устройств РЗА используются для управления виртуальными выключателями в модели энергосистемы, вызывая при этом соответствующее изменение схемы энергосистемы и переходный процесс с новыми установленными значениями токов и напряжений в ее цепях. Таким образом, испытуемое устройство и симулятор RTDS имеют полное взаимодействие между собой в замкнутом цикле с обратными связями. Любое изменение состояния одного из них приводит к соответствующей реакции другого и переходу системы в новое состояние. Симулятор RTDS





позволяет многократно воспроизводить любое состояние системы и детально исследовать происходящие в ней процессы с целью, например, устранения ложных срабатываний РЗА и повышения ее надежности.



Структурная схема для моделирования систем РЗА с поддержкой протокола МЭК 61850

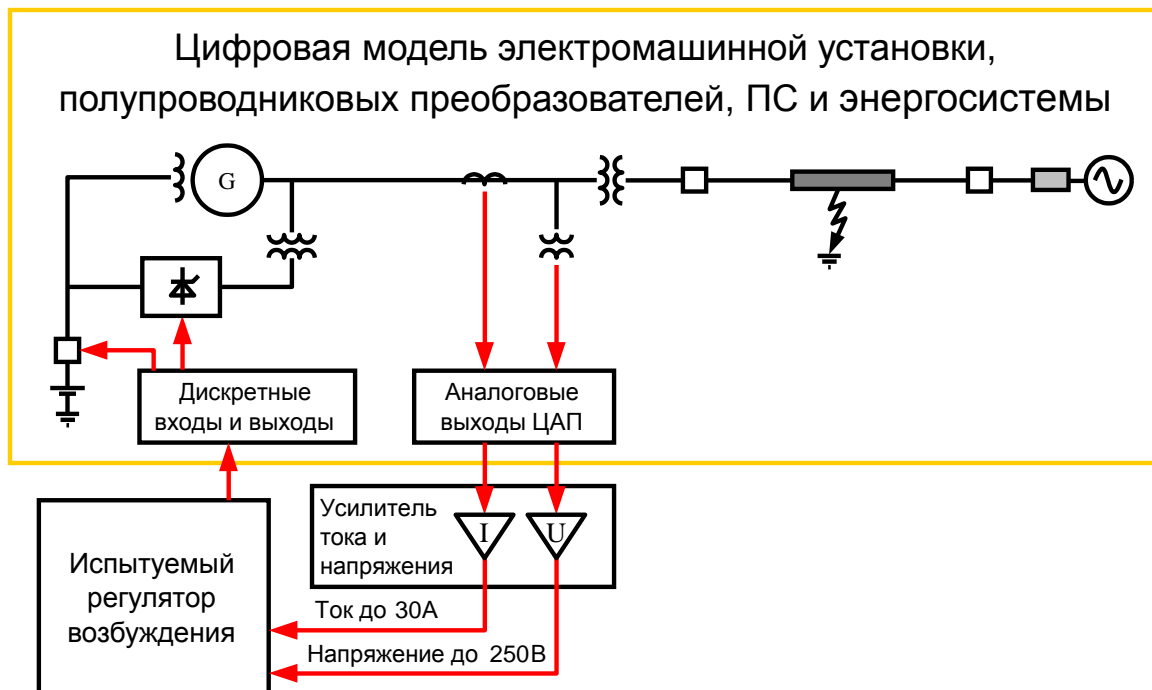
Посредством среды управления процессом симуляции RunTime можно в ручном режиме или по заданному сценарию в автоматическом режиме изменять параметры функционирования виртуальной энергосистемы и вызвать аварийные процессы в ней, например, в виде КЗ. Автоматический режим применяется для проведения испытаний, при которых многократно производятся симуляции с изменением какого либо параметра или группы параметров: момент начала КЗ, тип КЗ и его места положения и т.п. Результаты работы в этом режим могут автоматически сохраняться в виде протокола с приложением численных и графических сведений.

## 1.2. Испытания систем управления и автоматического регулирования

Симулятор RTDS в режиме реального времени обеспечивает взаимодействие реального и виртуального оборудования, что делает его идеальным инструментом для исследований систем автоматического регулирования. Моделирование на симуляторе дает возможность воссоздавать условий функционирования оборудования в широком диапазоне от установившихся режимов работы до аварийных процессов. Все эти условия можно многократно повторять, детально исследовать их влияние на энергосистему для лучшего понимания происходящих процессов и выбора оптимальной стратегии управления.

На рисунке приведена структурная схема для моделирования энергосистемы, включающей в себя тиристорную систему возбуждения, синхронный генератор, линию электропередачи, выключатели, силовой и измерительные трансформаторы, эквивалент центральной энергосистемы и т. д. Реальное устройство управления возбуждением генератора подключается к симулятору через дискретные каналы. Мгновенные значения напряжения и тока с выхода виртуального генератора преобразуются в аналоговые сигналы на модуле ГТАО и поступают на входы усилителей, а затем на вход испытуемого устройства.





Структурная схема для моделирования системы автоматического регулирования

Симулятор RTDS имеет возможность осуществлять ввод аналоговых сигналов от внешних устройств через модуль аналогового ввода GTAI. Входные аналоговые сигналы могут использоваться в качестве управляющих воздействий для симуляции либо служить в качестве данных для регистрации параметров работы испытуемого устройства.

### 1.3. Исследования установок HVDC и FACTS с элементами силовой электроники

Системы передачи постоянного тока (HVDC) и переменного тока (FACTS) являются современными технологиями, обеспечивающими повышение управляемости, надежности и безопасности современных линий электропередач. Изначально симулятор RTDS разрабатывался для моделирования систем HVDC и за прошедшие два десятилетия этот симулятор практически стал промышленным стандартом для испытаний управляющих устройств, предназначенных для работы в системах электропередачи. Симулятор представляет собой практически идеальный инструмент для моделирования и проверки таких устройств. Программное обеспечение симулятора содержит множество готовых примеров для моделирования систем HVDC, HVDC MMC, SVC MMC и LCC HVDC.

Все основные производители систем управления высоковольтными преобразователями для систем HVDC и FACTS используют симулятор RTDS для проведения приемосдаточных испытаний своего оборудования. Успешно испытаны системы управления для систем постоянного тока LCC- HVDC и VSC-HVDC, включая системы сверхвысокого напряжения UHVDC и для модульных многоуровневых преобразователей MMC, а также для систем передачи переменного тока общесетевого назначения и для промышленных потребителей, представляющих собой устройства SVC, STATCOM, TCSC, DVR, UPFC и др.

Многие электросетевые компании в мире используют симуляторы RTDS совместно с имеющимся у них дублирующим комплектом аппаратуры управления эксплуатируемых ими систем HVDC и FACTS. В таких случаях симулятор RTDS выступает в качестве имитатора эксплуатируемой энергосистемы, а в связке с системой управления позволяет исследо-





вать все нововводимые изменения и модификации в эксплуатируемой сети и системах управления, проверить возможные улучшения при реконструкции, подготавливать персонал по теоретическим и практическим вопросам эксплуатации вверенных энергообъектов. Ниже приведены нескольких таких примеров.

Бразильская электросетевая компания **Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)** отвечает за координацию и управление линией HVDC Rio Madeira протяженностью 2 375 км и являющейся самой длинной линией электропередачи в мире. Системы управления для этого проекта были испытаны исключительно на симуляторе RTDS.

Электросетевая компания **Trans Bay Cable**, расположенная в Сан-Франциско и управляющая 85-метровым подводным кабелем HVDC "Trans Bay", по которому передается энергия от г. Питтсбург до г. Сан-Франциско. Это был первый в мире проект HVDC с использованием системы MMC и он также был испытан на симуляторе RTDS.

Индийская электросетевая компания **Power Grid Corporation**, управляющая сетями северо-восточной Агры (NEA) и использующая первую в мире линию электропередач сверхвысокого напряжения UHVDC с отводами. После ввода в эксплуатацию компания NEA будет передавать энергию от гидроэлектростанций из северо-восточного региона Индии в г. Агра. Сеть включает в себя четыре конечные подстанции и трех преобразовательные станции общей мощностью более 8000 МВт, что является самой большой из когда-либо построенных систем передачи постоянного тока. Этот проект был испытан с использованием симулятора RTDS.

Библиотека компонентов RSCAD с малым шагом расчета содержит обширный набор готовых функциональных блоков для систем HVDC и FACTS. Подсистемы с малым шагом расчета симулируются с шагом расчета в диапазоне 1-3 мкс и могут сопрягаться с моделями обычных энергосистем, симулируемых с шагом расчета 30-50 мкс. Ключевой особенностью подсетей с малым шагом расчета является то, что пользователь может конфигурировать как схему силового преобразователя, так и структуру силовых ключей. Так можно свободно сконфигурировать двух- и трехуровневые преобразователи на силовых ключах с частотой ШИМ свыше 2 кГц. Также доступен двухуровневый преобразователь с малыми потерями и частотой ШИМ до 40 кГц. Несколько подсистем с малым шагом расчета могут подсоединяться друг к другу через модели линий и кабелей с учетом бегущей волны и объединяться в большую систему, симулируемую с шагом расчета 1-3 мкс.

Команда разработчиков RTDS Technologies постоянно работает над совершенствованием моделей библиотеки компонентов RSCAD и разработке новых моделей. В настоящее время в библиотеку включены компоненты следующего назначения:

**Формирование импульсов зажигания и пилообразных сигналов.** Импульсы зажигания с высоким разрешением могут формироваться при симуляции с малым шагом расчета при помощи модели генератора импульсов зажигания. Также можно осуществлять ввод в симулятор импульсов зажигания от внешних устройств посредством модуля ввода дискретных сигналов GTDI.

**Модели преобразователей с линейной коммутацией LCC.** RSCAD содержит шести- и двенадцатиканальные модели групп ключей для LCC. Модели содержат широкий спектр возможных неисправностей ключей, включающие как внутренние так внешние. Их можно



легко конфигурировать под системы сверхвысокого напряжения UHVDC за счет последовательного включения. Также они имитируют внутренние и внешние неисправности в узлах преобразователя. В модели используется улучшенный алгоритм зажигания ключей, который позволяет исследовать работу преобразователя с погрешностью вариации момента зажигания около 1 мкс.

**Модели многоуровневых преобразователей MMC и VSC в RSCAD.** Имеются модели двух- и трехуровневых преобразователей для линий и вставок постоянного тока. MMC преобразователи имеют множество преимуществ перед традиционными тиристорными схемами и все чаще применяется в системах HVDC и FACTS. Присущая MMC технически сложная конструкции требует больших вычислительных затрат при моделировании. Симулятор RTDS обладает самыми современными средствами для моделирования и испытаний систем MMC и предлагает ряд готовых моделей.

Симулятор RTDS имеет два вида библиотечных моделей MMC преобразователей: модели, которые симулируются на базе вычислительного ядра NovaCore, и модели, которые симулируются на внешнем вычислительном модуле со специализированной программируемой логической матрицей (ПЛИС). Эти модели используются как для испытаний систем управления высокого уровня, так и при разработке подробных алгоритмов управления.

**GM - Базовая модель** используется с ПЛИС на базе модуля "MMC Support Unit V2" для имитации группы из двух силовых ключей. Каждый канал может содержать до 512 подмодулей. Поддерживаются полумостовые и мостовые конфигурации ключей. Рассматриваются все возможные состояния ключа IGBT. Базовая модель поддерживает индивидуальные импульсы зажигания IGBT, индивидуальные конденсаторы подмодулей, выбор топологии и различные внутримодульные неисправности. Дополнительно, базовая модель может имитировать внутренние замыкания на землю в конфигурации для моста и полумоста.

**U5 - Унифицированная модель** используется с ПЛИС на базе модуля GTFPGA-MMC для имитации групп из шести силовых ключей. Каждый канал может содержать до 512 подмодулей. Поддерживаются полумостовые и мостовые конфигурации ключей. Учитываются нормальные режимы зажигания (блокировка, прямые и обратные вставки, байпас). Можно моделировать внутренние ошибки, но не на уровне отдельных ключей IGBT.

**MMC5** использует основное ядро. Компонент MMC5 предназначен для испытаний систем управления высокого уровня и исследования их взаимодействия с энергосистемой. Группы из шести силовых ключей можно моделировать на одном вычислительном ядре. Каждый канал может содержать до 640 подмодулей. Поддерживаются полумостовые и мостовые конфигурации ключей. Балансировка напряжения на конденсаторах обеспечивается моделью. Напряжения на конденсаторах всех подмодулей к окончанию каждого малого шага расчета достигают одинакового уровня.

**CHAINV5** использует основное ядро. CHAINV5 - это модель, которая имеет отдельный вход зажигания подмодуля и может использоваться для детальных исследований систем управления зажиганием. CHAINV5 может содержать до 40 подмодулей для мостовой и до 56 подмодулей для полумостовой конфигурации ключей. При использовании CHAINV5 моделирование внутренних неисправностей не допускается.



#### **1.4. Исследования PMU и централизованных систем релейной защиты и управления**

Синфазные измерения, т.е. измерения, которые выполняются всеми измерительными установками строго одновременно вне зависимости от их удаленности друг от друга, используются для единовременной фиксации мгновенных значений токов и напряжения во всей энергосистеме. Для этих целей применяются устройства PMU, роль которых могут также выполнять некоторые устройства РЗА или регистраторы аварийных процессов. Симулятор RTDS может легко имитировать работу взаимоудаленных устройств PMU и использоваться при исследованиях качаний мощности, измерения фазовых углов, частоты системы, стабильности напряжения и др. Другими вариантами применения данных от имитатора PMU являются:

- отображение полной ситуационной картины;
- сигнализация о достижении аварийных и рабочих пределов;
- оценка состояния энергосистемы и управление перегрузками и пр.

Модель RSCAD для устройств PMU формирует данные в формате протокола IEEE C37.118, которые распространяются через концентратор данных (PDC) или на другое внешнее оборудование РЗА. Для формирования потока данных используется модуль GTNETx2 с микропрограммой "PMU". Синхронизация измерений и данных производится от модуля синхронизации GTSYNC, который подключается к внешним источникам сигналов точного времени типа 1PPS, IRIG-B или IEEE 1588.

##### **Средства проведения испытаний PMU**

В RSCAD имеется приложение для испытаний PMU (PMU Test Utility), которое предназначено для испытаний PMU в установившихся и в переходных режимах. Стандарт IEEE C37.118 с поправками, определяет испытательные сигналы и возможные ограничения производительности, а регламент IEEE Conformance Assessment Program (ICAP) определяет спецификацию испытательных воздействий (TSS) на уровне испытательных процедур и вычислений. Приложение RSCAD для испытаний PMU воспроизводит процедуру испытаний и вычислений в соответствии с ICAP-TSS. В этом приложении можно задавать различные параметры синусоидального сигнала, формируемого виртуальным компонентом PMU. Сформированный сигнал отправляется на модуль аналоговых выходов ГТАО, масштабируются в нем, и через внешние усилители тока и напряжения или напрямую поступает на испытуемое устройство PMU. Заданное значение параметров также используются для расчета теоретически точного значения синфазного сигнала при каждом тестировании. Затем приложение собирает данные от устройств PMU и отображает их на экране. Измеренные значения фазы, частоты и интенсивности отказов (ROCOF) сравниваются с теоретически рассчитанными значениями, по которым выполняется расчет погрешности по частоте, суммарная векторная ошибка (TVE) и ошибки ROCOF. Для этих испытаний используется модуль синхронизации GTSYNC.

#### **1.5. Интеллектуальные сети и возобновляемые источники.**

Симулятор RTDS уже в течение 20 лет постоянно совершенствуется, чтобы отвечать все новым требованиям в условиях постоянно развивающейся электроэнергетики. В последнее время все большее внимание уделяется концепции интеллектуальных "умных" сетей (smart grid) и концепции распределенной генерации. Производители оборудования, электросетевые компании, университеты и исследовательские институты во всем мире



стремятся разработать решения, которые бы уменьшали негативные воздействия на окружающую среду, повышали безопасность и надежность энергетической инфраструктуры и обеспечивали эффективную выработку, передачу и распределение электрической энергии. Компания RTDS Technologies стремится сохранять лидирующие позиции для своего продукта и наделяет его способностью моделировать указанные выше интеллектуальные системы.

Термин "умная" сеть относится к развитой электрической сети, которая использует современные телекоммуникационные технологии для сбора информации и оперативного реагирования на текущую ситуацию таким образом, чтобы оптимально направлять потоки электроэнергии, повышать надежность электроснабжения, безопасность эксплуатации и устойчивость работы. «Умные» сети это не какая-то конкретная технология, а набор технологий и рабочих процедур, которые должны произвести революцию в распределенных электрических сетях.

Для реализации в среде моделирования технологий, связанных с интеллектуальными сетями, требуется наличие высокоуровневых коммуникационных возможностей. Благодаря модулям GTNET или GTNETx2, симулятор RTDS способен обеспечить коммуникацию в следующих информационных средах:

- МЭК 61850 для приложений автоматизации подстанций
- DNP, МЭК 60870-5-104 и Modbus для систем АСУТП (SCADA)
- IEEE C37.118 для приложений PMU

Симулятор RTDS предлагает средства и модели для симуляции распределенной генерации и возобновляемых источников энергии. Библиотека содержит соответствующие компоненты для моделирования ветровых турбин, солнечных батарей, топливных ячеек, аккумуляторных батарей и различных источников питания, а также модели устройств силовой электроники, используемые совместно с ними.

## 1.6. Силовая электроника

Для симуляции устройств силовой электроники требуется выполнение расчетов с малым шагом времени и возможность наблюдения высокоскоростных процессов, происходящих при переключении силовых ключей. Компания RTDS Technologies разработала и успешно реализовала методику выполнения моделирования в реальном времени с разным шагом расчетов, которая позволяет одновременно симулировать всю энергосистему с подсистемами силовой электроники. В этой методике подсистемы силовой электроники симулируются с шагом расчета в диапазоне 1-3 мкс и получаемые данные сопрягаются с расчетами общей энергосистемы, выполняемыми с шагом расчета примерно 30-50 мкс. Важно, что в таких подсистемах пользователь может свободно конфигурировать схему и топологию соединения силовых ключей. Имеется возможность оперировать на уровне отдельных переключающих элементов и собирать из них преобразователь произвольной конфигурации с частотой переключений ШИМ до 2 кГц. Дополнительно пользователи могут использовать готовые модели преобразователей в стандартной топологии (2-ух, 3-ех и многоуровневые). Например, двухуровневый преобразователь с низкими потерями может симулироваться с частотой переключения ШИМ до 40 кГц.

Несколько подсистем силовой электроники могут подключаться друг к другу через воздушные и кабельные линии, которые также моделируются с шагом расчета 1-3 мкс и ис-



пользуют модель бегущей волны. Кроме этого в библиотеке компонентов с малым шагом расчета RSCAD имеются готовые модели трансформаторов, синхронных и асинхронных машин, генераторов сигналов высокой точности и групп силовых ключей HVDC.

### **1.7. Программно-аппаратное моделирование с использованием силового оборудования РНЛ**

В некоторых случаях при моделировании удобно использовать реальное силовое оборудование, не прибегая к разработке его математической модели. Некоторые виды силового оборудования можно включать на функциональном уровне в петлю обратной связи симулятора RTDS и использовать в ходе симуляции. Эта технология называется "программно-аппаратное моделирование с использованием силового оборудования" Power Hardware In the Loop (PHIL) и позволяет при моделировании в реальном времени осуществлять переток активной и реактивной энергии между специальным усиливающим оборудованием и реальными установками для генерации электрической энергией, электромобилями, аккумуляторами, двигателями, потребителями и пр. Симулятор RTDS успешно используется для выполнения исследований по технологии PHIL в различных сферах. Ниже приведен ряд примеров использования технологии PHIL:

- Испытание двигателей электрических судов и их электропривода мегаваттной мощности.
- Испытания виртуального синхронного генератора (VSG).
- Испытания ветрогенераторов с переменной скоростью мегаваттной мощности.
- Исследование синхронизации трехфазного силового преобразователя.
- Испытание инверторов для фотоэлектрических преобразователей (PV).

Моделирование по технологии PHIL позволяет проводить испытания реальных устройств в условиях полностью контролируемой среды подключения перед тем, как начать их эксплуатацию в действующей энергосистеме. На симуляторе RTDS создается модель энергосистемы, к которой будет подключаться испытываемое устройство, и обеспечивается их взаимодействие посредством сигналов тока и напряжения. Все подключения между симулятором RTDS и испытываемым устройством должны тщательно анализироваться с учетом шага расчета модели, задержек, вводимых усилителями и преобразователями, которые в купе определяют суммарную задержку интерфейса PHIL. Усиливающее устройство для PHIL должно работать в режиме источника и приемника активной и реактивной мощности и относиться к классу так называемых четырехквadrантных усилителей мощности. Важно учитывать способ формирования сигналов тока и напряжения, номинальные мощности испытываемого устройства и подключаемого усилителя.

Во время испытаний с применением PHIL симулятор RTDS посредством модуля аналогового вывода GТАО формирует аналоговые сигналы низкого уровня  $\pm 10\text{В}$ . Эти сигналы поступают на вход усилителя, который формирует пропорциональные им сигналы тока и напряжения требуемого уровня и подает их на испытываемое устройство. Для создания системы с замкнутой обратной связью используются измерительные датчики, которые преобразуют токи и напряжения с выхода испытываемого устройства, и подают их на вход модуля аналогового ввода GТAI и далее используются при симуляции. Для снижения шумов, возникающих в интерфейсе PHIL, используются аппаратные и программные фильтры. Тип фильтров и их параметры выбираются исходя из приемлемого компромисса между устойчивой работой и необходимой точностью моделирования.





## 1.8. Образование и обучение

### Учебные заведения

Университеты и другие учебные заведения по всему миру применяют симулятор RTDS в образовательном и научно-исследовательском процессе. Для студентов, обучающихся по программам бакалавра и магистратуры, были разработаны учебные примеры для использования симуляторов RTDS в образовательном процессе.

Студенты получают возможность максимально эффективно взаимодействовать с виртуальной энергосистемой и управлять ею. Симулятор RTDS выступает в роли наглядного и действенного инструмента, позволяющего лучше освоить и закрепить теоретические знания и приобрести практический опыт управления энергосистемой. Благодаря моделированию в реальном времени учащиеся могут получить опыт работы с реальными устройствами РЗА и системами автоматического регулирования.

По запросу предоставляется комплект готовых примеров моделей энергосистем с их описанием для выполнения студенческих лабораторных работ на симуляторе RTDS.

### Имитационная среда для оператора

Энергосетевые компании очень часто используют симуляторы RTDS для создания модели своих сетей и обучения диспетчерского персонала. Симулятор предоставляет техническим специалистам возможность работать и испытывать устройства РЗА в условиях максимально схожих к условиям эксплуатации, характерным для данного предприятия. Предлагаемые изменения и электросетей могут быть предварительно опробованы в безопасных лабораторных условиях на виртуальной модели.

Сетевые компании сообщают, что использование симулятора RTDS для обучения и тренировки диспетчерского персонала привело к сокращению времени простоя энергосистем, предотвращению повреждения оборудования, улучшению репутаций компании и, как следствие, к увеличению доходов.

## 2. ОПИСАНИЕ СИМУЛЯТОРА

Наиболее распространенным методом для точного и стабильного выполнения математических расчетов при моделировании электромагнитных переходных процессов в программных симуляторах (PSCAD, ATP, EMTP и пр.), является алгоритм Г. Доммеля. Этот алгоритм, основываясь на интегрировании методом трапеций, позволяет приводить интегральные уравнения узловых потенциалов в алгебраическую форму. Расчеты по указанному алгоритму выполняются в дискретные моменты времени с равными интервалами, который называется "шаг расчета" (timestep) и обозначается  $\Delta t$ .

Все уравнения, описывающие модель, должны вычисляться на каждом шаге расчета. Для обычного ПК может потребоваться несколько секунд на вычисления одного состояния большой и сложной моделей энергосистемы с элементами силовой электроники. В таких случаях говорят, что симуляция выполняется «не в реальном времени» или «офлайн». При достаточной производительности вычислительной машины, способной непрерывно выполнять необходимые вычисления состояния модели за время шага расчета, получается систе-





ма, работающая в режиме "реального времени". Если же вычислительная система выполняет симуляцию и обмен данными с внешним миром очень строго за интервал, не превышающий шаг расчета, то такая система относится к классу систем с "жестким" реальным временем и обеспечивает наилучшую точность моделирования.

Симулятор RTDS - это электронно-вычислительная машина, способная выполнять расчеты электромагнитных переходных процессов по алгоритму Доммеля, в непрерывном режиме в реальном времени. Программно-аппаратное обеспечение симулятора позволяет выполнять моделирование одновременно с двумя шагами расчета в диапазоне от 1,5 до 50 мкс. Внутренняя операционная система симулятора RTDS следит за тем, чтобы процесс вычислений не превышал заданный шаг расчета и гарантирует выполнение симуляции в режиме жесткого реального времени.

Симулятор RTDS прост и эффективен в использовании, а весь процесс моделирования управляется посредством программного обеспечения RSCAD. Среда RSCAD имеет графический интерфейс и служит для подготовки задания на моделирование, управления симуляцией, оперативного изменения параметров модели непосредственно в ходе симуляции, сбора данных результатов моделирования и их последующего анализа. Для подготовки задания на моделирование RSCAD предоставляет обширную библиотеку моделей компонентов, используемых в энергосистемах, установках силовой электронике, системах автоматического регулирования, управления, релейной защиты и автоматики. Эти модели компонентов разработаны и протестированы в компании RTDS Technologies, прошли апробацию и уточнение у клиентов, и, в итоге, правильность их функционирования подтверждена сообществом пользователей симуляторами RTDS в ходе повседневной работы.

Аппаратная часть симулятора RTDS выполнена в виде модульной конструкции, что позволяет легко увеличивать его вычислительную мощность и количество портов ввода-вывода. Вычислительный модуль NovaCог построен на базе 10-ядерного процессора. Лицензии на использование каждого из 10 ядер приобретаются отдельно и могут быть активированы для увеличения производительности и размера моделируемой энергосистемы. Кроме этого, имеется техническая возможность объединить между собой до 60 модулей NovaCог в единый симулятор и использовать его для симуляции очень больших моделей. Модули ввода-вывода подключаются к модулю NovaCог через любые из имеющихся 24 оптических портов. Для "экономии" портов, эти модули могут подключаться между собой последовательной в цепочку к одному порту модуля NovaCог.

Симулятор RTDS – идеальный инструмент для проектирования, исследования и испытаний различного оборудования и устройств РЗА. Как уже говорилось, через аналоговые, дискретные и интерфейсные модули ввода-вывода любое внешнее устройство РЗА может подключаться к симулятору RTDS и взаимодействовать с симулируемой моделью энергосистемы в цикле с замкнутой обратной связью.

Широкие возможности открываются при использовании симулятора RTDS для обучения диспетчеров, инженеров, исследователей и студентов. Работа на симуляторе знакомит с технологиями и особенностями работы электроэнергетики. Так как симулятор может работать непрерывно в реальном времени, он может служить для создания правильного ощущения работы и поведения реальных энергосистем, а подключение к нему измерительных приборов и устройств РЗА дает возможность увидеть в динамике быстроразвивающиеся



процессы. Пользователь имеет практически безграничные возможности по изменению в модели режима работы, конфигурации и оперативной схемы и изучать взаимодействие виртуальной энергосистемы с испытуемым оборудованием.

## 2.1. Аппаратная часть симулятора RTDS

Аппаратная часть симулятора RTDS спроектирована для вычислений электромагнитных переходных процессов в реальном времени по алгоритму Доммеля. В своей основе алгоритм Доммеля позволяет использовать параллельные вычисления на двух уровнях:

- расчет состояния компонентов, объединенных в общую матрицу проводимостей, т. е. внутри одной подсистемы;
- расчет состояния подсистем, т. е. расщепленных матриц проводимостей.

При симуляции на первом уровне для расчетов состояния компонентов, связанных в одну матрицу проводимостей, используются преимущества скоростного обмена информацией между ядрами одного процессора модуля NovaCor. Второй уровень используется при моделировании нескольких подсистем с задействованием нескольких объединенных между собой вычислительных модулей NovaCor. За счет использования возможностей второго уровня параллельных вычислений можно моделировать энергосистемы практически неограниченного размера.

Кроме вычислений в реальном времени по алгоритму Доммеля симулятор RTDS разрабатывался для проведения испытаний реальных устройств РЗА и систем управления, для которых особенно важным является возможность осуществление ввода и вывода необходимых сигналов взаимодействия. Операции ввода вывода требуют затрат процессорного времени, которые обычно могут приводить к увеличению шага расчета, но в симуляторе RTDS применяется специальные технические решения для минимизации затрат времени и максимального увеличения пропускной способности каналов связи вследствие организации множества прямых каналов между процессором и модулем ввода-вывода. Обмен по этим каналам осуществляется в параллельном режиме, что позволяет избежать образования "бутылочного горлышка" в цикле симуляции.

## 2.2. Модуль NovaCor



Внешний вид модуля NovaCor

С 2017 года симуляторы RTDS стали компоноваться из одного или нескольких вычислительных модулей с названием NovaCor. Каждый такой модуль выполнен на базе мощного многоядерного процессора и содержит порты для связи с управляющим ПК, другими вы-



числительными и интерфейсными модулями, а также имеет сенсорный дисплей и несколько аналоговых выходов, на которые можно выводить контрольную информацию в ходе симуляции.

### **2.2.1. Процессор**

Каждый модуль NovaCor содержит один 10-ядерный RISC-процессор IBM POWER8™, работающий на частоте 3,5 ГГц. Ядра процессора выполняют симуляцию управляющих и силовых компонентов, производят общий расчет сети и управляют операциями ввода-вывода. Вычислительная мощность модуля NovaCor определяется количеством используемых ядер в соответствии с приобретенной лицензией.

Модуль NovaCor чрезвычайно гибок в применении. При наличии нескольких модулей NovaCor в составе симулятора RTDS их можно использовать независимо друг от друга для решения на каждой своей задачи, либо объединять их вычислительные мощности для симуляции одной большой модели.

### **2.2.2. Возможности**

Максимально на одном модуле NovaCor можно симулировать модель, содержащую до 600 однофазных и, соответственно, 200 трехфазных узлов, разделенных на две подсистемы. Для расчетов сети в каждой подсистеме требуется отдельное ядро. Это же ядро может выполнять симуляцию компонентов управления, а остальные доступные ядра выделяться для симуляции силовых компонентов, таких как линии электропередач, электрические машины, подсистем с малым шагом расчета и пр. При необходимости, компилятор может назначать отдельное ядро из числа доступных для симуляции компонентов управления.

В минимальной конфигурации модуль NovaCor может функционировать с одной лицензией, используя только 1 из 10 ядер. В таком виде модуль способен симулировать модель, содержащую до 90 однофазных (30 трехфазных) узлов в совокупности с компонентами систем управления и силовыми компонентами.

### **2.2.3. Коммуникационные порты и интерфейсы модуля NovaCor**

Каждый модуль NovaCor содержит оптические порты разных типов для взаимодействия с другими модулями NovaCor и для подключения интерфейсных модулей.

На лицевой панели модуля NovaCor имеются гнезда, на которые выводятся аналоговые сигналы от 12 ЦАП с диапазоном выходных сигналов  $\pm 10$  В и разрешением 12 бит. Пользователь может организовать вывод из модели на эти гнезда аналоговых сигналов, соответствующих выбранным переменным.

Настройка модуля NovaCor, отображение режима работы, а также, в будущем, отображение значений переменных в выполняемой симуляции осуществляется при помощи цветного 7" сенсорного дисплея.

#### **Интерфейс рабочей станции**

Интерфейс рабочей станции "workstation interface" (WIF) модуля NovaCor предназначен для связи с управляющим ПК через сеть Ethernet и организации взаимодействия с оператором посредством программы RSCAD. Модуль NovaCor имеет порт RJ45, через который



он подключается к локальной сети Ethernet (10/100 Base-T) по протоколу TCP/IP.



Подключение модуля NovaCor к управляющему ПК

Аппаратное обеспечение модуля NovaCor отображается в локальной сети как специализированный компьютер с собственным IP - адресом, к которому может получить доступ любой компьютер, подключенный к этой локальной сети.

### Синхронизация расчетов

Все расчеты, выполняемые модулем NovaCor, производятся на одном процессоре и по тому синхронизированы между собой. Если же симулятор RTDS состоит из нескольких модулей NovaCor, то для синхронизации расчетов между модулями используется специальная сдвоенная оптоволоконная линия связи глобальной шины «Global Bus» с отдельными каналами приема и передачи. Для симулятора RTDS, состоящего из двух модулей NovaCor используется прямое подключение глобальной шины между модулями. Для симуляторов, содержащих 3 и более модулей NovaCor, для синхронизации расчетов между ними, требуется применение специального концентратора глобальной шины "GBH". Максимальная длина волоконно-оптических кабелей между вычислительными модулями и концентратором GBH составляет 30 м.



Подключение модулей NovaCor к концентратору GBH

### Взаимодействия между модулями NovaCor

Когда в симуляторе RTDS используется несколько модулей NovaCor, кроме сигналов синхронизации требуется осуществлять передачу расчетных данных между вычислительными модулями, каждый из которых выполняет симуляцию своей подсистемы. Для этого используются специальные оптоволоконные каналы связи внутренней коммуникации Inter-Rack Communication (IRC). Каждый модуль NovaCor имеет 6 портов IRC, что позволяет подключать между собой до 7 вычислительных модулей и объединять их в единый симулятор. Если же симулятор содержит более 7 модулей NovaCor, то вычислительные модули звездообразно подключаются к специальному коммутатору IRC, что позволяет создать симулятор RTDS, содержащий до 60 модулей NovaCor и способный моделировать в реальном



времени огромные энергосистемы. Максимальная длина оптических кабелей связи IRC составляет 30 м.

### 2.3. Интерфейсные модули

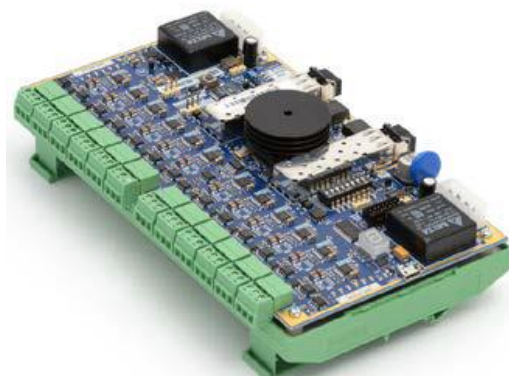
Для сопряжения симулятора RTDS с внешним оборудованием используются специализированные интерфейсные модули, которые имеют высокое разрешение и точность, оснащены гальванической изоляцией и имеют удобные разъемы для подключений. Как правило, интерфейсные модули крепятся на DIN - рейку, которая располагается с задней стороны шкафа RTDS. Подключение интерфейсных модулей к вычислительному модулю осуществляется через оптоволоконные кабели, но для удобства и экономии портов интерфейсные модули можно подключать последовательно друг за другом в одну цепочку от одного порта модуля NovaCor. Это позволяет практически неограниченно добавлять интерфейсные модули и увеличивать количество каналов ввода-вывода.

#### 2.3.1. Модуль аналоговых выходов GТАО



Модуль GТАО предназначен для вывода аналоговых сигналов и обеспечения гальванической изоляции с внешним оборудованием. Модуль имеет 12 аналоговых каналов с выходным напряжением  $\pm 10$  В (пик.). Все цифроаналоговые преобразователи синхронизированы между собой и имеют разрешение 16 бит, обеспечивающее широкий динамический диапазон выходных сигналов. Например, для каналов тока динамический диапазон достаточен для формирования сигналов номинального и аварийного уровня. Модуль содержит собственный вычислитель для интерполяции данных, поступающих на каждом шаге расчета примерно 1 раз в 50 мкс, и вывода аналоговых значений с периодом дискретизации 1 мкс. Модуль GТАО также поддерживает симуляцию с малым шагом расчета.

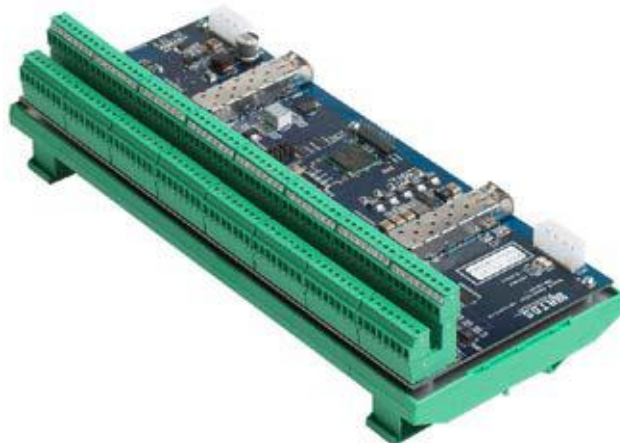
#### 2.3.2. Модуль аналоговых входов GТAI





Модуль GTAI предназначен для ввода аналоговых сигналов и обеспечения гальванической изоляции с внешним оборудованием. Модуль содержит 12 синхронизированных аналоговых каналов с дифференциальными входами и диапазоном измеряемых напряжений  $\pm 10$  В. Аналого-цифровые преобразователи имеют разрешение 16 бит, время преобразования составляет 6 мкс. Каждый канал оснащен фильтром НЧ с настраиваемой частотой среза.

### 2.3.3. Модуль дискретных входов GTDI



Модуль GTDI предназначен для ввода дискретных сигналов и обеспечения гальванической изоляции с внешним оборудованием. Модуль имеет 64 дискретных входа на базе оптронов, которые управляются током 10 мА, что позволяет подключать к ним сигналы разного напряжения при условии использования соответствующих токоограничивающих резисторов. В комплект поставки модуля входит набор сменных резистивных сборок для подключения к источникам дискретных сигналов напряжением 5 В и 24 В. Модуль GTDI поддерживает работу со стандартным и малым шагом расчета, а также имеет функцию для фиксации момента возникновения фронта импульса Digital Input Time Stamp (DITS), имеющую разрешение 250 нс, которая может использоваться, например, для точного управления виртуальным силовым ключом от внешнего устройства. Функция DITS часто применяется при симуляции силовых электронных преобразователей.

### 2.3.4. Модуль дискретных выходов GTDO



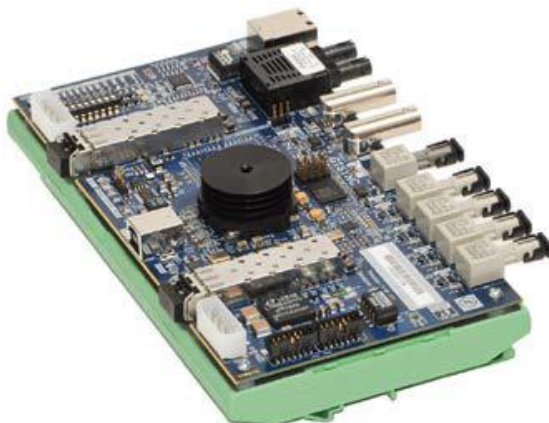
Модуль GTDO предназначен для вывода дискретных сигналов и обеспечения гальванической изоляции с внешним оборудованием. Модуль GTDO содержит 64 дискретных выхода типа "открытый эмиттер", которые разделены на две гальванически изолирован-





ные между собой группы по 32 канала. Каждая группа имеет клемму подключения к своему внешнему источнику питания напряжением от 5 В до 24 В. Каждый дискретный канал оснащен защитой от замыканий и перегрева и может коммутировать ток нагрузки до 0,1 А по всем каналам и ток до 0,8 А при параллельном включении 8 смежных каналов. Модуль GTDO поддерживает работу со стандартным и малым шагом расчета, имеет функцию переключения дискретных сигналов в заданные моменты времени с разрешением 10 нс Digital Output Time Stamp (DOTS). Эта функция используется для минимизации джиттера (неравномерности по времени) в выходных периодических сигналах.

### 2.3.5. Модуль синхронизации времени GTSYNC



Модуль GTSYNC предназначен для синхронизации расчетов от внешнего источника точного времени с одним из следующих интерфейсов: ежесекундные импульсы спутниковой навигации (1PPS), сигналы точного времени формата IRIG-B или по протоколу синхронизации IEEE 1588. Сигналы IRIG-B подключается через BNC разъем, а сигналы 1PPS – через разъем BNC либо оптический разъем ST. Синхронизация по протоколу IEEE1588 осуществляется посредством сети Ethernet, а подключение производится через разъем RJ45 для сети 100BASE-TX либо через оптический разъем ST для сети 100BASE-FX. Вне зависимости от типа и источника сигнала синхронизации (внешнего или внутреннего) модуль GTSYNC может формировать опорные сигналы типа 1PPS и IRIG-B.

Модуль GTSYNC выполняет тактирование модуля NovaCor и синхронное выполнение симуляции по сигналам точного времени. Модуль NovaCor, к которому подключен модуль GTSYNC, назначается ведущим (Master) для остальных модулей NovaCor и осуществляет их синхронизацию по глобальной шине GBH.

Синхронизация процесса симуляции по сигналам точного времени обязательно требуется при использовании цифровых протоколов связи типа МЭК61850 и испытании устройств РМУ или РЗА.

### 2.3.6. Модуль GTFPGA

Модуль GTFPGA подключается к оптическому порту модуля NovaCor и может при- меняться при симуляции. Он представляет собой специализированный вычислительный блок на базе ПЛИС Xilinx Virtex 7 и устанавливается в шкаф RTDS. В зависимости от микропрограммы модуль GTFPGA может применяться для различных задач:

- для симуляции силовых ключей многоуровневых преобразователей ММС;
- для управления импульсами зажигания и балансировки напряжений преобразователя ММС;



- для формирования множества потоков SV по протоколам МЭК 61850-9-2LE и МЭК 61869-9;
- для симуляции с малым шагом расчета воздушных и кабельных линий электропередач с учетом частотно-зависимой характеристики;
- для организации пользовательского интерфейса с симулятором RTDS.



### **GTFPGA-MMC**

Микропрограмма GTFPGA-MMC может симулировать работу групп из шести силовых ключей на основе модели U5 или групп из двух силовых ключей на основе модели GM.

В режиме симуляции с балансировкой напряжения на конденсаторах и управления импульсами зажигания, модуль GTFPGA-MMC может конфигурироваться для управления тремя группами силовых ключей, содержащими до 768 подмодулей. Таким образом, один модуль GTFPGA-MMC может использоваться для управления трехфазной установкой STATCOM, а два модуля GTFPGA-MMC могут применяться для управления одной установкой HVDC с многоуровневыми преобразователями MMC. Более подробная информация о возможностях моделирования MMC приведена в разделе касательно установок HVDC и FACTS.

### **GTFPGA-SV**

Микропрограмма GTFPGA-SV обеспечивает формирование одновременно до 16 потоков данных выборок SV в соответствии с протоколом МЭК 61850-9-2LE или МЭК 61869-9 с разной частотой дискретизации при гарантированном джиттере менее 1 мкс. Для формирования меток времени потока SV требуется модуль синхронизации GTSYNC.

При работе по протоколу МЭК 61850-9-2LE можно формировать до 16 потоков, содержащих данные по 4-ем каналам тока и 4-ем каналам напряжения с частотой выборок 80 изм./период (1 ASDU) или 256 изм./период (8 ASDU). При работе по протоколу МЭК 61869-9 можно формировать до 16 потоков, содержащих данные для 24 величин с частотой выборок 80 изм./период (1 ASDU), 96 изм./период (1 ASDU) или 4800 Гц (2 ASDU). Кроме этого, имеется возможность формировать 16 потоков данных, содержащих данные для 9 величин со скоростью 256 изм./период (8 ASDU) или 14 400 Гц (6 ADSU)

### **GTFPGA-TLINE**

Микропрограмма GTFPGA-TLINE может симулировать с малым шагом расчета до 12 частотно-зависимых воздушных или кабельных линий электропередач.

### **GTFPGA-GENERIC**

Аппаратные возможности модуля GTFPGA могут применяться пользователем под собственные программы, ориентированные на ресурсы ПЛИС, при использовании их со



стандартным или малым шагом расчета. Широкие и гибкие возможности технологии ПЛИС можно использовать для создания интерфейса связи с различным внешним оборудованием или для симуляции собственных моделей. Разработка и создание собственных микропрограмм для модуля GTFPGA производится на языке VHDL в среде разработки компании Xilinx.

### 2.3.7. Модуль сетевых протоколов GTNETx2

Модуль сетевых протоколов GTNETx2 предназначен для взаимодействия симулятора RTDS с внешним оборудованием через сеть Ethernet с использованием различных видов сетевых протоколов. В отличие от других интерфейсных модулей ввода-вывода, размещаемых на DIN-рейке, модуль GTNETx2 устанавливается в специальную кассету и подключается к соединительной плате. В одну кассету можно установить до 3 модулей GTNETx2 или GTNET. Связь и обмен данными с вычислительным модулем NovaCог осуществляется через оптоволоконное соединение, также как и с другим интерфейсными модулями. Каждый модуль GTNETx2 состоит из 2 частей, работающих независимо. У каждой из этих частей имеется собственный порт Ethernet. Опционально доступны следующие 3 варианта подключения к сети Ethernet: медным кабелем 100/1000 Мбит через разъем RJ45, оптическим кабелем 100BASE-FX или 1000BASE-SX через разъем ST.



Кассета для установки модулей GTNET(x2)

Каждая из двух частей модуля GTNETx2 работает независимо по заданному протоколу из числа доступных, т.е. один модуль GTNETx2 может одновременно работать с двумя сетевыми протоколами. Лицензии на использование сетевого протокола приобретаются для каждой части модуля GTNETx2 отдельно. Можно приобрести сразу несколько лицензий для каждой части и использовать их по мере необходимости путем активации перед началом симуляции. Соответственно, для использования одного и того же сетевого протокола на обеих частях модуля GTNETx2, необходимо располагать 2 лицензиями. Список поддерживаемых протоколов включает в себя:

1. SKT Socket TCP или UDP
2. PMU IEEE C37.118
3. GSE/Goose МЭК61850 Goose
4. SV МЭК61850-9-2 Sampled Values
5. PLAYBACK Воспроизведение продолжительных файлов COMTRADE



- |    |        |   |
|----|--------|---|
| 6. | DNP3   | протокол АСУТП Distributed Network Protocol |
| 7. | 104    | протокол АСУТП МЭК 60870-5-104              |
| 8. | Modbus | протокол АСУТП                              |

### ***GTNET-SKT***

Функция GTNET-SKT предназначена для интерфейса с внешним оборудованием по сети LAN/WAN с использованием сетевых протоколов TCP и UDP. Возможна двухсторонняя асинхронная передача данных о значениях 300 величин с частотой опроса до 1 кГц или 60 величин с частотой опроса до 5 кГц. Значение каждой величины кодируется 4 байтами (32 бита) в целочисленном формате или в формате с плавающей запятой IEEE754.

### ***GTNET - PMU***

Функция GTNET - PMU обеспечивает синхронизированные потоки выходных данных в соответствии со стандартом С37.118 по TCP или UDP соединению и имитирует работу до 8-ми виртуальных устройств PMU с информацией о трехфазных симметричных составляющих тока и напряжения или работу 24 устройств PMU с информацией о прямой последовательности. Частота кадров для каждого виртуального устройства PMU может задаваться в диапазоне от 1 до 60 Гц. Возможно задание частоты кадров 240 Гц, но при этом количество устройств PMU уменьшится до 8. Для работы GTNET-PMU требуется модуль синхронизации GTSYNC.

### ***GTNET-GSE***

Функция GTNET-GSE может имитировать работу от 1 до 4 виртуальных интеллектуальных устройств IED. Каждое устройство IED может передавать и принимать до 64 дискретных состояний (или 32 состояния вместе с битами качества). Прием сообщений может осуществляться от 16 внешних устройств IED. Конфигурация задается через файл SCD. Среда RSCAD предлагает к распоряжению специальный SCD редактор, который позволяет пользователю быстро и легко настроить подписки и публикации сообщений GOOSE.

Служебные поля при приеме и отправке сообщений GOOSE, такие как тестовый режим, ввод в эксплуатацию и биты качества, могут динамически изменяться и анализироваться в процессе симуляции, что позволяет применять сложные сценарии для тщательной проверки коммуникаций и оборудования.

### ***GTNET-SV***

Функция GTNET-SV позволяет публиковать или подписываться на поток по протоколу МЭК 61850-9-2, содержащий измеренные значения тока и напряжения в узлах энергосистемы или ее модели. Для работы требуется синхронизация от модуля GTSYNC. Гарантируется публикация данных с джиттером не более 10 мкс.

Каждая функция GTNET-SV может публиковать либо 2 потока выборок с частотой следования 80 измерений за 1 период основной частоты сети (50 или 60 Гц), либо 1 поток с частотой 256 изм./период. Под понятием "поток" имеется в виду цифровой канал данных, содержащий значения выборок по 4 каналам напряжения и 4 каналам тока. Также функция GTNET-SV используется для приема данных по подписке. При этом возможен прием одного потока 9-2LE с частотой 80 или 256 изм./период.

Имеется специальный режим на базе МЭК 61850-9 и китайского национального стан-





дарт для устройств SV, который называется "He 9-2LE ". В этом режиме функция GTNET-SV может публиковать 24 канала напряжения или тока с частотой до 80 изм./период.

### ***GTNET-Playback***

Функция GTNET-Playback позволяет воспроизводить процессы в формате COMTRADE из файлов с чрезвычайно большим объемом данных и по тому хранящиеся на файловом сервере. Функция GTNET-Playback последовательно воспроизводит данные по 8 каналам из файла и выполняет их инъекцию в симулируемую модель. В роли данных могут выступать, например, измеренные значения тока и напряжения по 3 фазам таких сложных видов нагрузок как электродуговые печи или металлопрокатный стан или данные, полученные на предыдущем этапе моделирования. При работе модуль GTNET периодически запрашивает данные для воспроизведения через сеть Ethernet с файлового сервера и передает их через оптоволоконное соединение в вычислительный модуль NovaCог для использования в ходе симуляции.

### ***GTNET-DNP***

Функция GTNET-DNP используется для моделирования систем телемеханики и АСУ ТП (SCADA) и может симулировать ведомое устройство, работающее по протоколу DNP 3.0, который наиболее популярен в странах Северной Америки, Австралии и Южной Африки. Функция GTNET-DNP имеет следующую максимальную пропускную способность:

- вывод 1024 дискретных состояний (например, статус выключателя) с частотой обновления 1000 Гц;
- ввод 512 дискретных команд (например, включение выключателя) с частотой обновления 1000 Гц;
- вывод 500 численных (аналоговых) значений с частотой обновления 10 Гц;
- ввод 100 численных (аналоговых) значений с частотой обновления 10 Гц.

### ***GTNET-104***

Функция GTNET-104 используется для моделирования систем телемеханики и АСУ ТП (SCADA) и может симулировать ведомое устройство, работающее по протоколу МЭК 60870-5-104, который наиболее популярен в странах Европы и России.

Функция GTNET-104 имеет следующую максимальную пропускную способность:

- вывод 1024 дискретных состояний (например, статус выключателя) с частотой обновления 1000 Гц;
- ввод 512 дискретных команд (например, включение выключателя) с частотой обновления 1000 Гц;
- вывод 500 численных (аналоговых) значений с частотой обновления 10 Гц;
- ввод 100 численных (аналоговых) значений с частотой обновления 10 Гц.

### ***GTNET-Modbus***

Функция GTNET-Modbus используется для моделирования систем телемеханики и АСУ ТП (SCADA) и может симулировать ведомое устройство, работающее по протоколу Modbus, который до сих пор широко распространен во всем мире. Функция поддерживает три разновидности протокола Modbus: TCP, RTU (через TCP) и ASCII (через TCP).



### 2.3.8. Модуль интерфейса передних панелей GTFPI



Модуль GTFPI предназначен для ввода и вывода дискретных сигналов через панели низковольтных и высоковольтных сигналов. Модуль GTFPI подключается к вычислительному модулю по оптоволоконному кабелю, а также через многожильные кабели к панелям ввода и вывода. К каждому модулю GTFPI можно подключить одну панель ввода-вывода низковольтных сигналов и одну панель вывода высоковольтных сигналов.

### 2.3.9. Панель ввода и вывода низковольтных дискретных сигналов



Панель низковольтных сигналов устанавливается с фронтальной стороны шкафа NovaCor и имеет гнездовые разъемы для подключения 16 дискретных входов и 16 дискретных выходов. Входные и выходные дискретные сигналы имеют логические ТТЛ уровни с напряжением 5 В. Дискретные входы можно напрямую подключать к так называемым "сухим" контактам реле, т.е. к контактам, которые не имеют подводимого извне напряжения. Для определения состояния "сухих" контактов дискретные входы имеют внутреннюю подтяжку с потенциалом 5 В.

### 2.3.10. Панель дискретных выходов высоковольтных сигналов



Панель устанавливается с фронтальной стороны шкафа NovaCor и управляет состоянием 16 реле с "сухими" выходными контактами. Максимальное коммутируемое напряжением 250 В постоянного и переменного тока, максимальный ток – 0,5 А для резистивной нагрузки. Каждый дискретный выход выполнен с применением легкосменного модуля на базе герконового реле, имеет быстродействие менее 1 мс и обеспечивает гальваническую развязку с внешним оборудованием. Для подавления коммутационных помех от индуктивной нагрузки при коммутации цепей постоянного тока в каждом канале имеется встро-





енный обратно-включенный диод. Анод диода выведен на дополнительную третью клемму, к которой подключается общий для источника и нагрузки провод.

## 2.4. Программное обеспечение RSCAD

Программное обеспечение RSCAD состоит из трех основных частей:

- I интерактивная среда с графическим интерфейсом для подготовки модели и выполнения симуляции;
- II компилятор для формирования задания на моделирование;
- III библиотека моделей компонентов энергосистемы и систем управления.

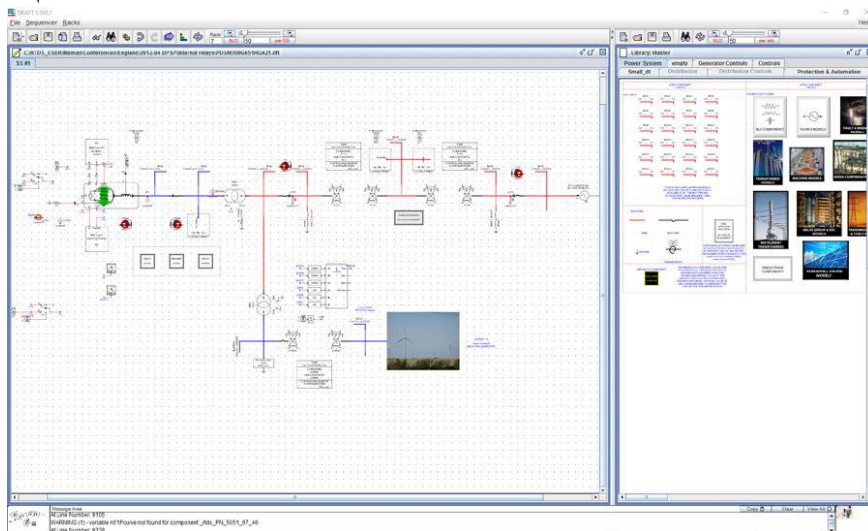
### 2.4.1. Интерактивная среда с графическим интерфейсом

Все взаимодействия оператора с симулятором RTDS осуществляется посредством графического интерфейса программы RSCAD. Программное обеспечение (ПО) RSCAD устанавливается на ПК с операционной системой MS Windows и представляет собой совокупность нескольких подпрограмм, которые используются в течение всего процесса моделирования. Главными подпрограммами RSCAD являются: менеджер проектов *FileManager*, графический редактор для подготовки модели *Draft* и виртуальный стенд управления симуляцией *RunTime*.

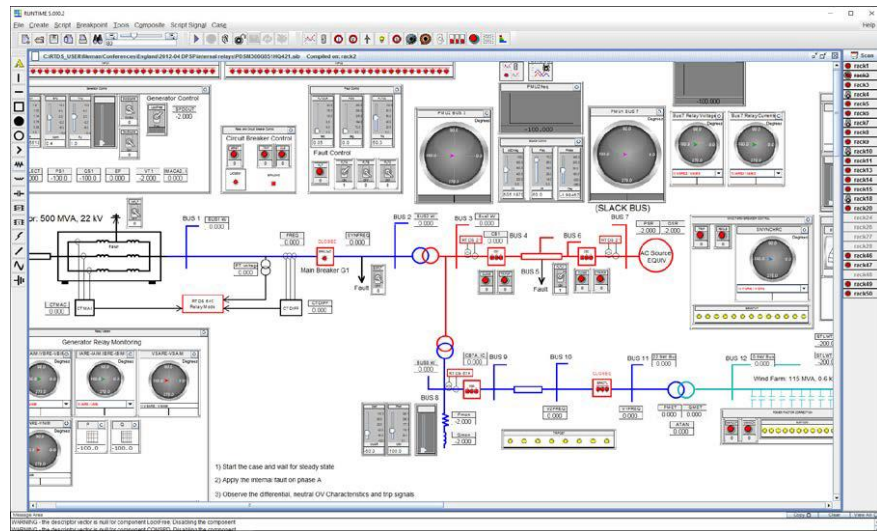
**FileManage.** Подпрограмма менеджера проектов является базовой и представляет собой среду для управления проектами и для вызова других подпрограмм RSCAD. Проекты и их составные файлы отображаются в менеджере в виде древовидной структуры, что помогает систематизировать каталоги с моделями, управлять хранящимися в них файлами, обмениваться информацией между пользователями.

**Draft.** Подпрограмма графического редактора для создания и редактирования электрических и функциональных схем исследуемой модели и ввода параметров ее элементов. Для создания схемы пользователь переносит на рабочее поле готовые компоненты из библиотеки и проводит между ними электрические цепи и функциональные соединения. Библиотека компонентов располагается с правой стороны от рабочего поля и имеет иерархическую структуру с условно-графическим обозначением элементов. Все управление графическим редактором осуществляется посредством манипулятора "мышь" и клавиатуры и оптимизировано для профессиональной работы. Созданные схемы можно сохранять, а также выполнять их компиляцию.

Для удобства редактор *Draft* может переключать режим отображения электрической схемы с трехлинейного на однолинейный вид и обратно. Создаваемая схема может включать в себя иерархические структуры, когда часть схемы перемещают на другие нижестоящие слои, а на верхнем слое вместо нее оставляют замещающий блок. В итоге это повышает наглядность и читабельность схемы модели, что видно из рисунка.



**RunTime.** Подпрограмма RunTime предназначена для наблюдения и управления ходом симуляции. Эта программа имеет графический интерфейс и позволяет создавать виртуальный пульт управления моделью, которая была разработана и скомпилированная в редакторе Draft. Разработанный виртуальный пульт также как и схема модели можно сохранить. В процессе симуляции оператор может управлять регулируемы параметрами модели и состоянием ее элементов посредством виртуальных кнопок и выключателей, ползунковых и дискретных регуляторов. Наблюдение за состоянием модели осуществляется по значениям контролируемых величин посредством различных типов виртуальных измерительных приборов. Имеется возможность создания мнемосхемы модели, в которой цвет и внешний вид элементов будут динамически изменяться в зависимости от состояний соответствующей переменной, например, состояния силового выключателя. Для создания аварийных ситуаций во время моделирования, например КЗ, требуется, чтобы уже на этапе построения схемы было определено место КЗ и его параметры. Далее на виртуальном стенде выводится кнопка активации КЗ, и уже в ходе симуляции оператор нажимает на нее, что приводит к запуску соответствующих переходных процессов.



Среди виртуальных измерительных приборов имеется осциллограф, который позволяет увидеть изменения сигналов в ходе переходного процесса. Обновление экрана осциллографа проводится по воздействию оператора на виртуальные кнопки или по триггеру события, например, срабатыванию таймера начала КЗ. Длительность записи осциллограмм, включая время записи предаварийного процесса, регулируется в настройках RunTime. Осциллограммы содержат большой объем данных, которые при наступлении соответствующего события записываются из непрерывающегося потока расчетов в оперативную память вычислительного модуля NovaCor и далее асинхронно передаются на управляющий ПК для отображения на виртуальном стенде. Оператор может сохранять получаемые сведения для последующего анализа и копировать их в свой отчет, как и другие отображаемые в RunTime данные.

**Средства автоматизация для проведения моделирования**

При работе на RTDS можно воспользоваться средствами выполнения симуляции по заданному сценарию в автоматическом режиме. Часто при испытаниях устройств РЗА бывает необходимо оценить их работу при множестве схожих испытательных воздействий, таких как, например, разные моменты начала коммутации полюсов выключателя или момента КЗ, изменение типа, места, переходного сопротивления КЗ и пр. В таких случаях можно использовать средства автоматического проведения испытаний по заданному сценарию, которые позволяют минимизировать участие оператора-испытателя.

При работе со сценариями используются следующие программные функции:

- функция записи и воспроизведения сценария;



- редактор файлов сценария;
- компилятор перерасчета модели при изменении ее определяющих параметров.

Функция записи и воспроизведения сценария входит в состав RunTime и позволяет зафиксировать порядок действий, выполняемых пользователем: запуск симуляции, настройку заданных параметров системы, видов повреждений, сохранение полученных сигналов и т.п. Все действия пользователя сохраняются в файле сценария на языке С. Этот файл можно редактировать, и добавлять в него новые команды и операторы условий и циклов (if, for или while) чтобы обеспечить многократное повторение и автоматическое изменение требуемых параметров. Кроме того, сценарий можно запрограммировать для автоматического контроля получаемых результатов и их обработки с применением различных фильтров, поиска максимума или минимума, выполнения логических операций и т.п. Результаты работы по сценарию можно сводить в один график таким образом, чтобы увидеть различия для разных начальных условий симуляции. Разработанный таким образом сценарий можно запускать для автоматической проверки устройств, подключаемых к симулятору RTDS.

Компилятор перерасчета модели используется в случаях изменения глобальных параметров модели, определяющих её математическую структуру, что делает невозможным изменять их непосредственно в ходе симуляции. К таким параметрам относятся длина и некоторые другие характеристики воздушных или кабельных линий электропередачи. При изменении положения места КЗ и соответствующего изменения длин двух участков ЛЭП (до и после места КЗ) получается новая математическая модель энергосистемы, которую необходимо заново скомпилировать и только после этого запустить симуляцию. Требуемые для указанной операции действия автоматически выполняются в среде RunTime по заданному сценарию, для чего используется предпроцессор расчета новых параметров ЛЭП, выполняется компиляция модели с новыми значениями параметров ЛЭП, и производится симуляция с КЗ на новом месте. Также компилятор используется для симуляции с разными значениями переходного сопротивления в месте КЗ. В этом случае пользователь в файле сценария задает начальное и конечное значения переходного сопротивления и шаг его изменения. При каждом запуске симуляции переходное сопротивление принимает новое значение.

Основным назначением автоматического режима работы по сценарию является уменьшение времени участия оператора на этапе первичного сбора данных при испытаниях, различающихся только начальными условиями.

#### **2.4.2. Компилятор**

Специально созданный компилятор является важным звеном между графическим интерфейсом пользователя и программным кодом, исполняемым симулятором RTDS. Компилятор RTDS преобразует исходную схему модели и ее параметры, заданные в графическом редакторе Draft, в машинный код для параллельных вычислений одновременно на нескольких ядрах процессора. Компилятор, исходя из имеющихся аппаратных ресурсов, назначает рабочее задание для каждого ядра, а также производит привязку симуляции конкретного компонента исходной модели на определенном ядре. Обычно такая привязка выполняется оператором на этапе создания модели в Draft и бывает необходима для организации связи с интерфейсными модулями ввода и вывода. Результаты компиляции и информация о распределении вычислительных и аппаратных ресурсов записываются в MAP-файл.



### 2.4.3. Библиотека моделей компонентов энергосистемы и систем управления

Для компиляции схемы модели в машинный код используется объектная библиотека компонентов энергосистемы и систем управления. Особо значимым является качество программного кода этих библиотечных компонентов, т.к. оно напрямую влияет на скорость симуляции, а значит на минимально-возможный шаг расчета. В компании RTDS Technologies Inc. уже в течении 20 лет уделяется большое внимание созданию эффективного программного кода компонентов и расширению библиотеки компонентов, качество и надежность которой подтверждена длительной проверкой и апробацией у множества клиентов, использующих симуляторы RTDS.

Симулятор RTDS имеет специальную подпрограмму Component Builder, позволяющую пользователям создавать на языке C собственные модели компонентов энергосистем или систем управления. Эти пользовательские компоненты наряду с остальными библиотечными компонентами могут использоваться при симуляции в реальном времени.

**Компоненты энергосистемы** включает модели элементов энергосистемы, которые имеют подключение к силовым электрическим цепям.

**а) Компоненты со стандартным шагом расчета:**

- многофазные (максимально 12 проводников) линии передачи с бегущей волной;
- 2-ух и 3-ехобмоточные трансформаторы с эффектом насыщения и гистерезисом;
- синхронные машины с учетом механической нагрузки на валу и возможностью моделирования внутренних КЗ;
- асинхронные машины;
- источники напряжения с заданным эквивалентным сопротивлением, амплитудой, частотой и фазой;
- пассивные компоненты резистивного, индуктивного и ёмкостного типа;
- нелинейные индуктивности;
- выключатели и разъединители;
- конденсаторы продольной компенсации с разрядниками ZnO и шунтирующими цепями;
- установки продольной компенсации с тиристорным управлением (TCSC);
- 6- и 12-фазные группы ключей для линий и вставок HVDC;
- фильтр на базе батареи коммутируемых конденсаторов;
- шинные разрядники;
- статические тиристорные компенсаторы (SVC);
- измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН), ёмкостные трансформаторы напряжения (CVT). Все трансформаторы могут учитывать насыщение и гистерезис намагничивания;
- модули воспроизведения COMTRADE файлов.

**б) Компоненты с малым шагом расчета:**

- коммутационные элементы:
  - выключатели;
  - диоды;
  - тиристоры;
  - транзисторы IGBT с диодом;
  - группа ключей многоуровневого преобразователя MMC;
  - 2- и 3-уровневые преобразователи VSC;





- высокоточный генератор сигналов
- электрические машины (асинхронные и синхронные, в том числе с постоянными магнитами)
- линии воздушной и кабельной электропередачи с бегущей волной и ПИ-секцией
- пассивные компоненты и фильтры
- 2-ух и 3-ехобмоточные трансформаторы

**Библиотека компонентов системы управления** содержит функциональные блоки для преобразования различных величин и формирования управляющих команд:

- виртуальные органы управления: многопозиционный и двухпозиционный переключатель, ползунок, кнопка и пр.;
- задание констант: целочисленных, вещественных, математических ( $\pi$ ,  $e$ );
- преобразователи данных: *радианы*  $\leftrightarrow$  *градусы*, *целые*  $\leftrightarrow$  *вещественные*;
- математические функции: *кратность*, *exp*, *log*, *ln*,  $e^x$ ,  $x^y$ , *sqrt*, *inverse*, *abs*, *sum*, *multiply*, *divide*, *max*, *min* и пр.;
- математические функции для комплексных чисел: *multiply*, *divide*, *add*, *subtract*;
- тригонометрические функции: *sin*, *arcsin*, *cos*, *arccos*, *tan*, *arctan*, *arctan<sup>2</sup>*;
- типовые функциональные блоки: *"мертвая" зона*, *генератор импульсов*, *детектор фронтов*, *время задержки*, *счетчик*, *наклонная*, *наклонная с ограничениями*, *ограничители*, *фазовая автоподстройка (PLL)*, *триггеры*, *преобразование Фурье*, *интегратор*, *опережения-запаздывания*, *затухание*, *поиска по таблице*, *нелинейное преобразование* и пр.;
- логические функции: *И*, *Или*, *Не*, *сдвиг битов*, *преобразования битов в слово и обратно*, *условие if - then - else* и пр.;
- измерители: *активной и реактивной мощности*, *действующего значения (в одно- и трехфазной цепи)*, *фазовый угол*, *частота* и пр.;
- обработка сигналов: *выборка и хранение*, *режекция данных*, *скользящее среднее*, *FIR*, *DFT*, *ABC-DQ0*, *DQ0-ABC*, *ABC- $\alpha\beta$* ,  *$\alpha\beta$ -ABC*, *вращение вектора* и пр.;
- системы управления генератором: *возбуждения*; *частоты вращения газовой-, паровой-, гидротурбины*; *динамической устойчивости*;
- контролер регулятора под напряжением силового трансформатора (TAP);
- функции релейной защиты: *токовая*, *дистанционная*, *дифференциальная*, *защита генератора* и пр.;
- синфазный измеритель PMU.

### Создание собственных компонентов

Подпрограмма Component Builder имеет графический интерфейс и предназначена для создания пользователем собственных моделей компонентов энергосистем или управления и последующего использования их при построении модели в редакторе Draft и симуляции. Алгоритм работы создаваемого компонента задается на языке программирования С. Подпрограмма Component Builder включает в себя компилятор для преобразования созданных компонентов в машинный код для симулятора RTDS.

### Подсеть с малым шагом расчета

Последние нововведения сделали возможным выполнение на RTDS симуляции с шагом расчета менее 1,5 мкс. Такой малый шаг расчета позволяет корректно проводить испытания систем управления с частотой следования импульсов ШИМ до 2 кГц. Новое оборудование моделирует многоуровневые преобразователи с максимальным количеством ключей, равным 36 (GTO/IGBT и диодные пары). Это дает возможность моделировать



встречно-параллельный преобразователь на основе VSC с его трансформаторами и фильтрами в пределах одной подсистемы с малым шагом расчета.

Преобразователи VSC с ШИМ не могут корректно моделироваться со стандартным шагом расчета, т.к. они изменяют свое состояние несколько раз за 50 мкс. Чисто программные симуляторы типа PSCAD могут выполнять моделирования частых переключений VSC при шаге расчета около 10 мкс с использованием интерполяции. Однако интерполяция требует изменять параметры симуляции точно в момент переключения виртуальных силовых компонентов, что невозможно реализовать в симуляторах реального времени, использующих большой шаг расчета. Единственным возможным решением для них является уменьшение шага расчета до 1-3 мкс для симуляции подсистем с силовыми компонентами и максимально точное отслеживание момента их переключения.

Создана новая технология симуляции с малым шагом расчета для моделирования 2- и 3-уровневых мостов. По этой технологии каждый малый шаг расчета может включать в себя до 5 подэтапов, что приводит к снижению на 50% потерь при виртуальных переключениях, а частота PWM 2-ухуровневого моста может быть вплоть до 40 кГц.

Подсистемы с малым шагом расчета объединяются с остальной частью модели энергосистемы, которая симулируется со стандартным шагом расчета 30-50 мкс. Части модели, которые симулируются с разными шагами расчета, сопрягаются при помощи интерфейсных узлов, таких как преобразовательные трансформаторы и продольно включенные реакторы. Несколько подсистем с малым шага расчета могут сопрягаться между собой посредством ЛЭП с бегущей волной, аналогично тому, как это делается при моделировании больших энергосистем со стандартным шагом расчета.

К подсистемам с малым шагом расчета относятся различные виды VSC преобразователей:

- ММС преобразователи для систем передачи энергии FACTS и HVDC;
- асинхронные генераторы DFIG для ветроустановок;
- 2- и 3-уровневые преобразователи для возобновляемых источников и накопителей энергии;
- 2- и 3-уровневые преобразователи для систем передачи энергии FACTS и HVDC.

## 2.5. Условия эксплуатации симулятора RTDS

Пользователь должен обеспечить нормальные условия для эксплуатации симулятора RTDS в условиях чистого офисного помещения и температурой окружающей среды (15 - 30)°С при относительной влажности (40 - 90)% без выпадения конденсата.

Каждый модуль NovaCог имеет максимальную потребляемую мощность 450 Вт. Питание осуществляется от однофазной сети (90 - 264) В с частотой (47 - 63) Гц.

Габаритные размеры модуля NovaCог составляют ШхГхВ: **482x500x176**. Вес **15** кг.

Программное обеспечение RSCAD может устанавливаться на любое количество ПК конечного покупателя. Минимальные требования к ПК:

- операционная система – Windows 7, 8 или 10;
- оперативной памяти RAM – 4 ГБ;
- процессор с частотой – 3 ГГц;
- порт подключения к локальной сети Ethernet.





### 3. ПРИЛОЖЕНИЕ

#### ПРИМЕРЫ МОДЕЛЕЙ И ТРЕБУЕМЫЕ ДЛЯ ИХ СИМУЛЯЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ NOVA-COR

##### Общие положения

1. Каждый модуль NovaCor имеет один 10-ядерный процессор. Каждое ядро имеет производительность в 300 условных единиц (у.е.).

2. Модуль NovaCor может симулировать энергосистему целиком, используя только одно ядро процессора и выполнять расчет сети (расчет токов и напряжения в узлах), моделировать управляющие компоненты, компоненты энергосистемы. Такая энергосистема может содержать до 90 однофазных узлов и до 180 компонентов энергосистем: ЛЭП, трансформаторы, вращающиеся машины и т. д.

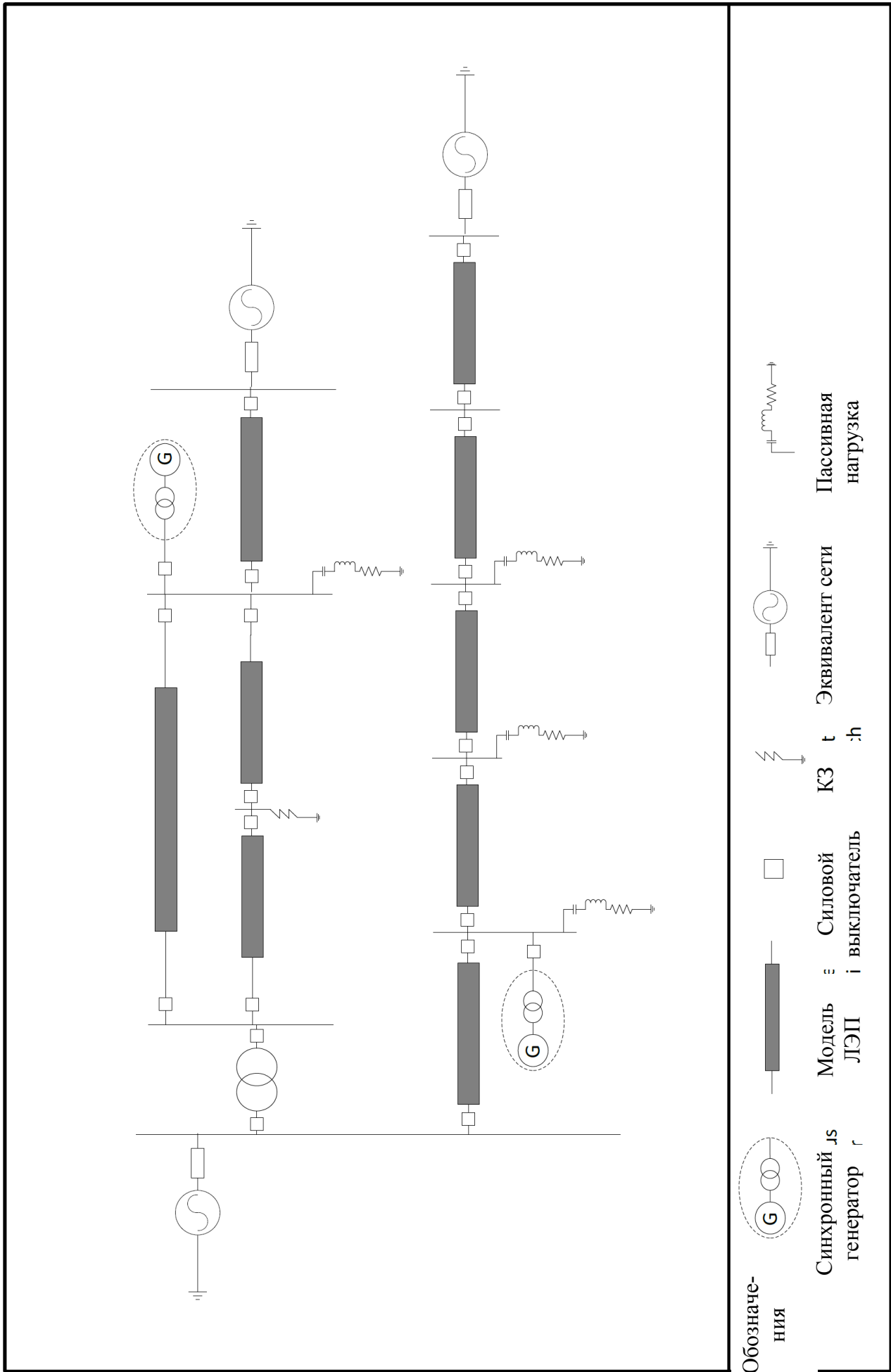
3. Симуляция управляющих компонентов может производиться на одном ядре совместно с расчетом сети или на одном ядре с симуляцией компонентов энергосистемы, либо для их симуляции может выделяться отдельное ядро.

4. Для расчета сети размером более чем 90 однофазных узлов и для симуляции управляющих компонентов требуются отдельное ядро, которое может выполнять расчет сети, включающей в себя до 300 однофазных узлов. Каждый модуль NovaCor может задействовать до двух ядер для расчетов сети, что обеспечивают расчет энергосистемы содержащей суммарно до 600 однофазных узлов, разделенных на 2 подсистемы посредством линий электропередач на базе модели с бегущей волной.

5. Каждое ядро, не задействованное для расчета сети, может выполнять симуляцию до 300 компонентов энергосистемы: ЛЭП, трансформаторы, вращающиеся машин, и т. д.

6. Пассивные компоненты, например, шунтирующие реакторы, симулируются вместе с расчетом сети и не требуют дополнительных ядер.

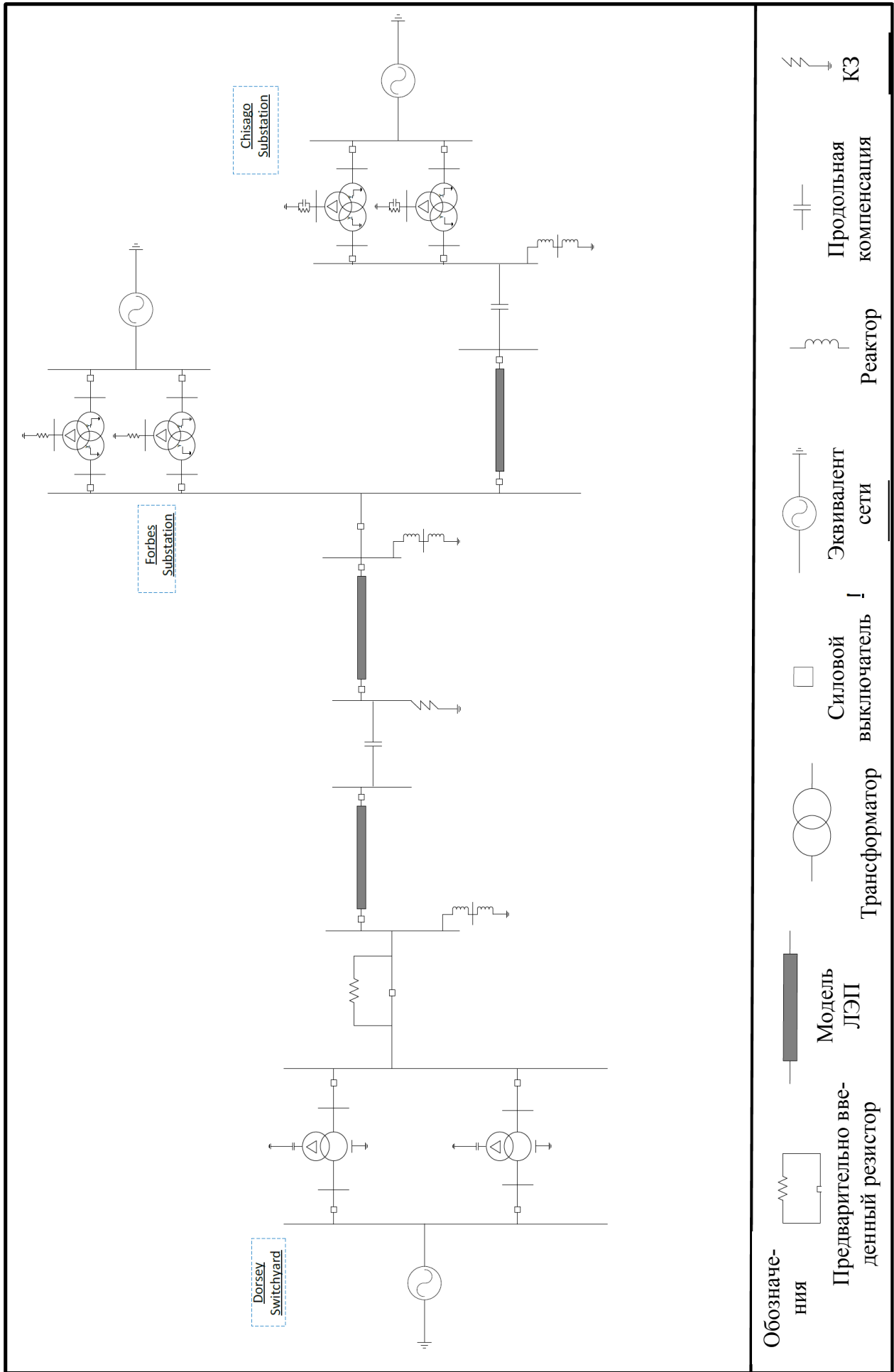




**Пример № 1 – Система с 10 шинами**

<b>Компоненты</b>	<b>Количество</b>	<b>Вычислительная нагрузка, у.е.</b>	<b>Комментарии</b>
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	(102-72*) =30	120	1 расчет сети / 1 подсистема. 72 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	9	90	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Генератор-трансформатор (трехфазный)	2	40	Модель генератора с интегрированным трансформатором (без учёта промежуточных узлов)
Трансформатор (трехфазный)	1	15	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
Источник трехфазный	3	30	
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>295</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>1 ядро</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: одним (1) ядром</b>



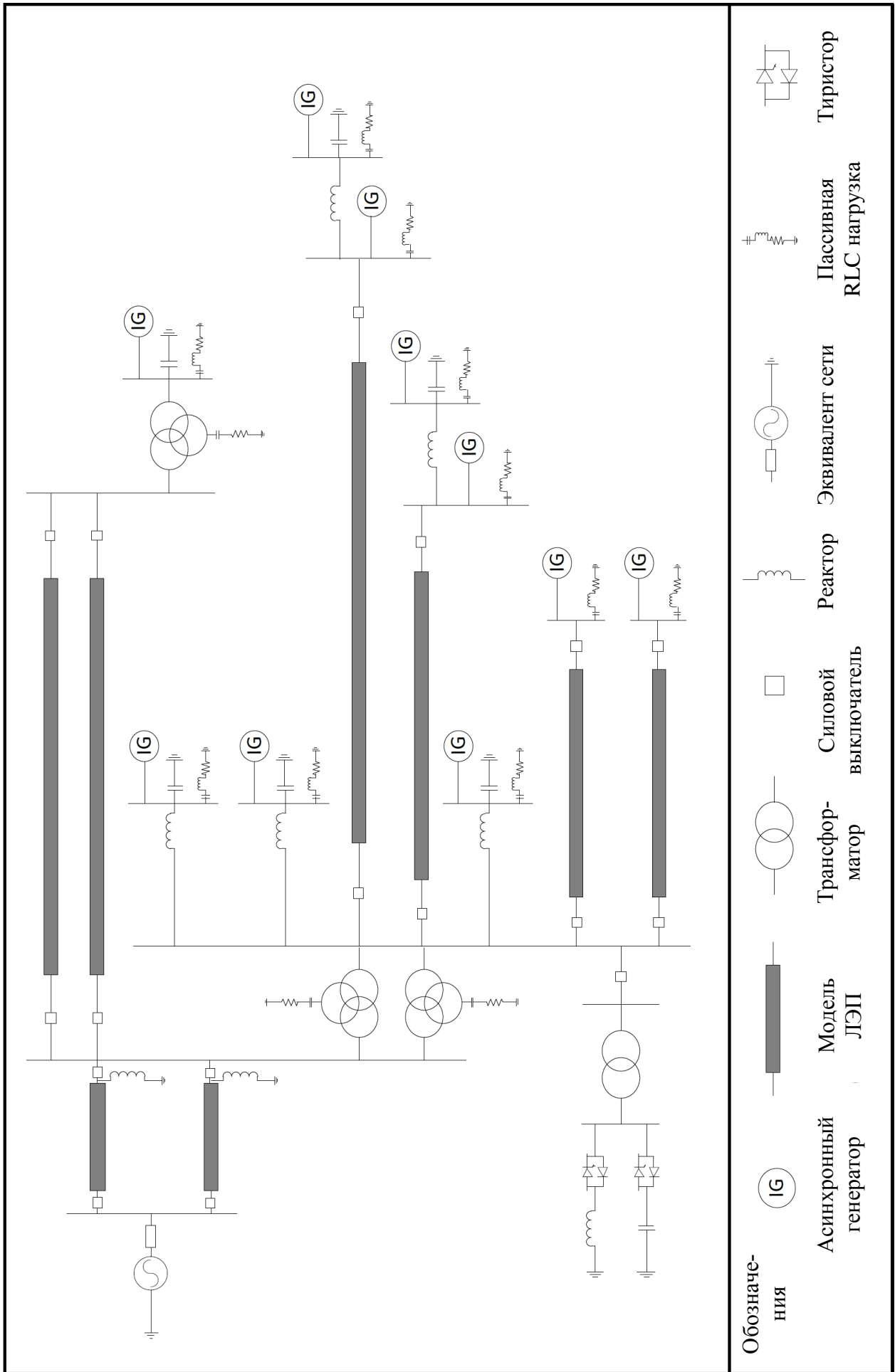


## Пример № 2 – Модель подключения ПС Dorsey-Forbes-Chisago

Компоненты	Количество	Вычислительная нагрузка, у.е.	Комментарии
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	(99-18*) =81	120	1 расчет сети / 1 подсистема. 18 встроенных узла в ЛЭП не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	3	30	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Трансформатор (трехфазный)	4	60	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и внешним подключением
Автотрансформатор (трехфазный)	2	20	Модель автотрансформатора с учетом насыщения
Источник трехфазный	3	30	
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>300</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>1 ядро</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: одним (1) ядром</b>



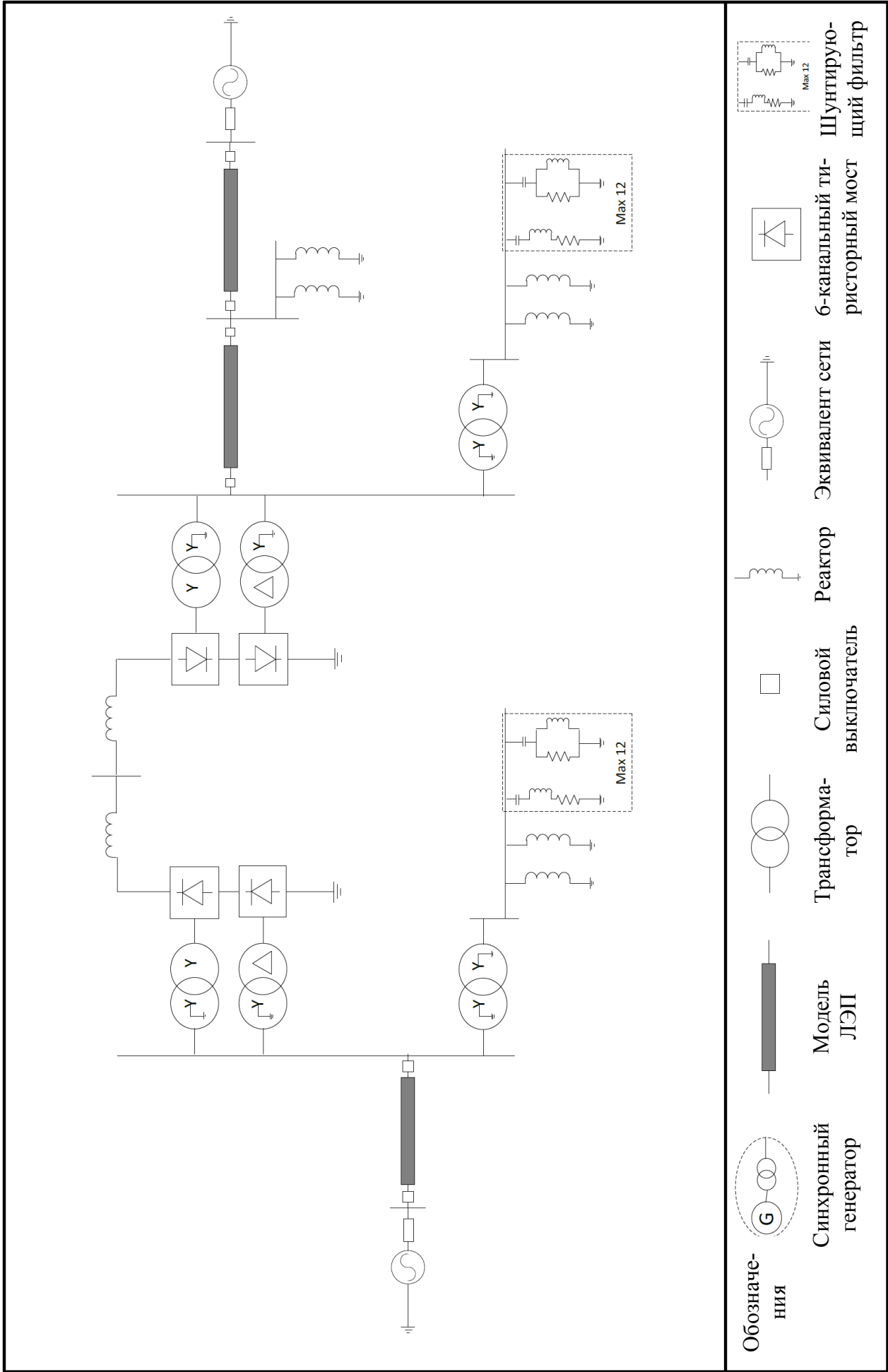




### Пример № 3 – Система с 16 шинами

Компоненты	Количество	Вычислительная нагрузка, у.е.	Комментарии
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	(153-105*) =48	120	1 расчет сети / 1 подсистема. 105 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Реактивный компенсатор SVC	2	40	
Асинхронная машина	10	100	Включая встроенный выключатель
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	8	80	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Трансформатор (трехфазный)	4	60	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
Источник трехфазный	2	20	
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>420</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>2 ядра</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: двумя (2) ядрами</b>

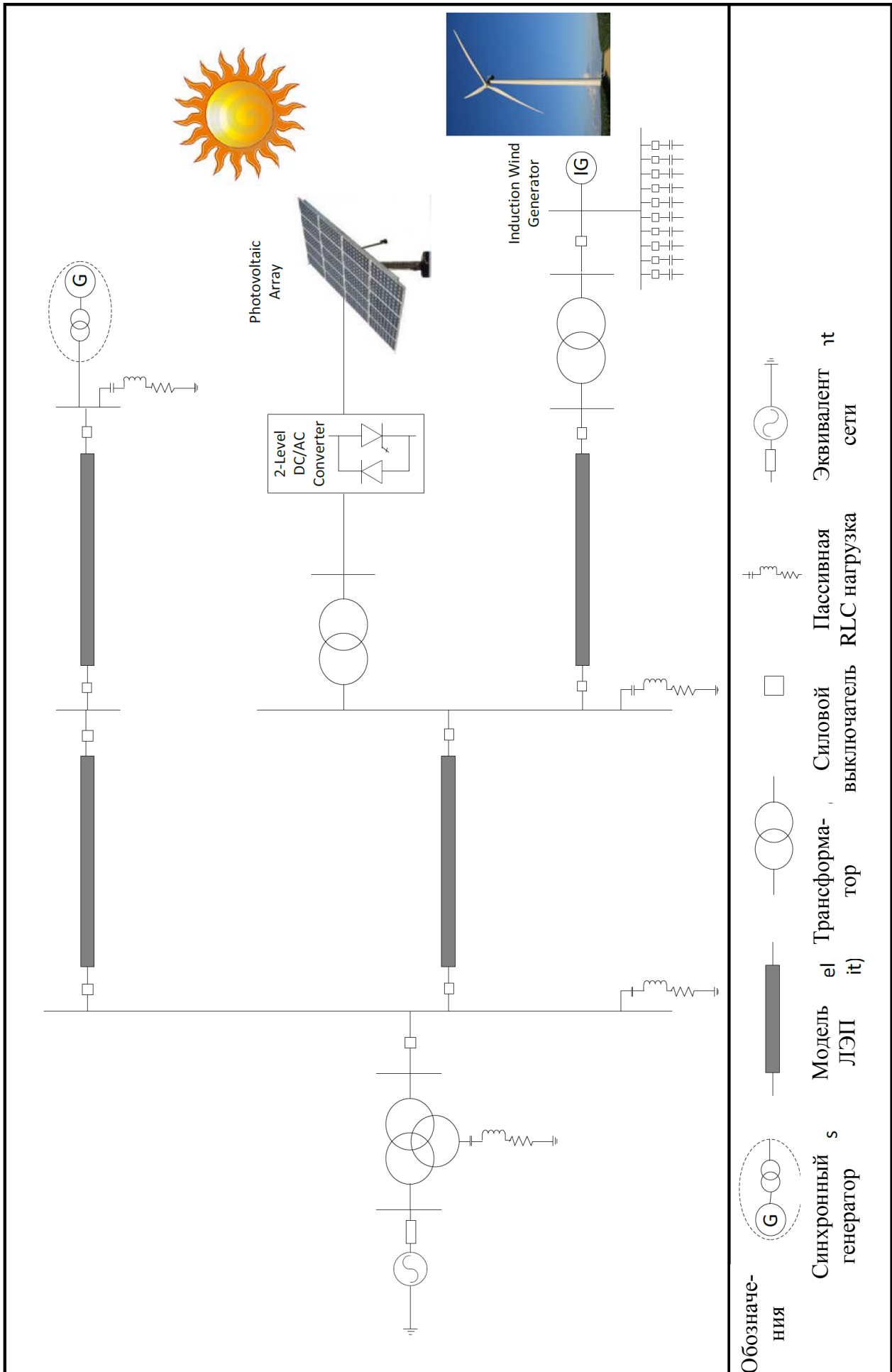




### Пример № 4 – Вставка постоянного тока HVDC

Компоненты	Количество	Вычислительная нагрузка, у.е.	Комментарии
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	$(54-30^*) = 24$	120	1 расчет сети / 1 подсистема. 30 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
6-канальный тиристорный мост	4	80	
Переключаемый шунтирующий фильтр (трехфазный)	2	60	Включая встроенный выключатель
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	3	30	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Трансформатор (трехфазный)	2	30	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
Источник трехфазный	2	20	
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>340</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>2 ядра</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: двумя (2) ядрами</b>



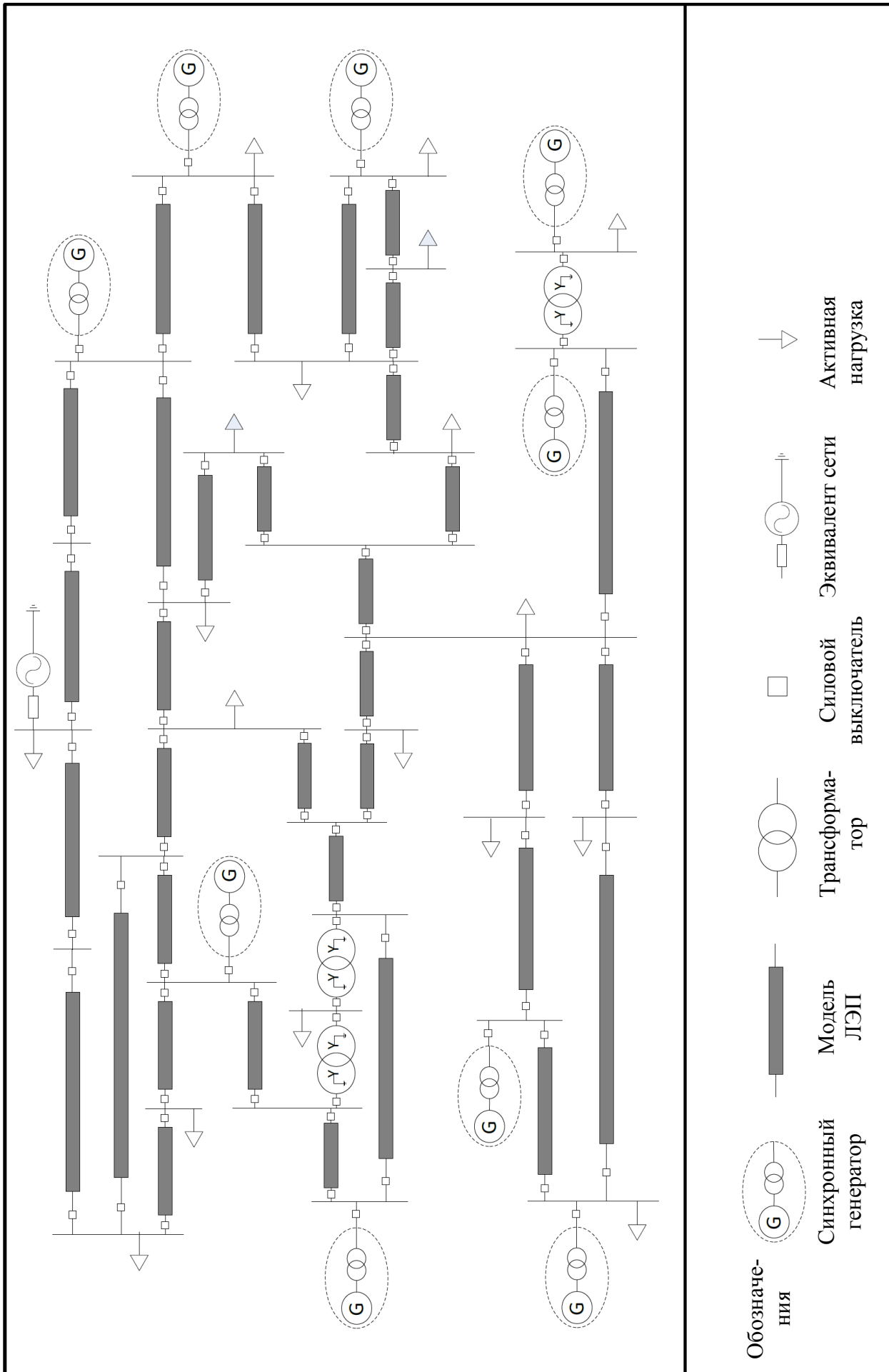




### Пример № 5 – Распределенная генерация

Компоненты	Количество	Вычислительная нагрузка, у.е.	Комментарии
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	$(81-51^*)=30$	120	1 расчет сети / 1 подсистема. 51 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	4	40	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Асинхронный генератор	1	10	Со встроенным выключателем
Генератор-трансформатор (трехфазный)	1	20	Модель генератора с интегрированным трансформатором (без учёта промежуточных узлов)
Солнечная батарея	1	10	
Трансформатор (трехфазный)	3	45	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
Коммутируемые конденсаторы	10	100	
Источник трехфазный	1	10	
Сеть с малым шагом расчета	1	300	2-ух уровневый VSC преобразователь солнечной батареи. Требуется отдельное ядро.
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>655</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>3 ядра</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: тремя (3) ядрами</b>

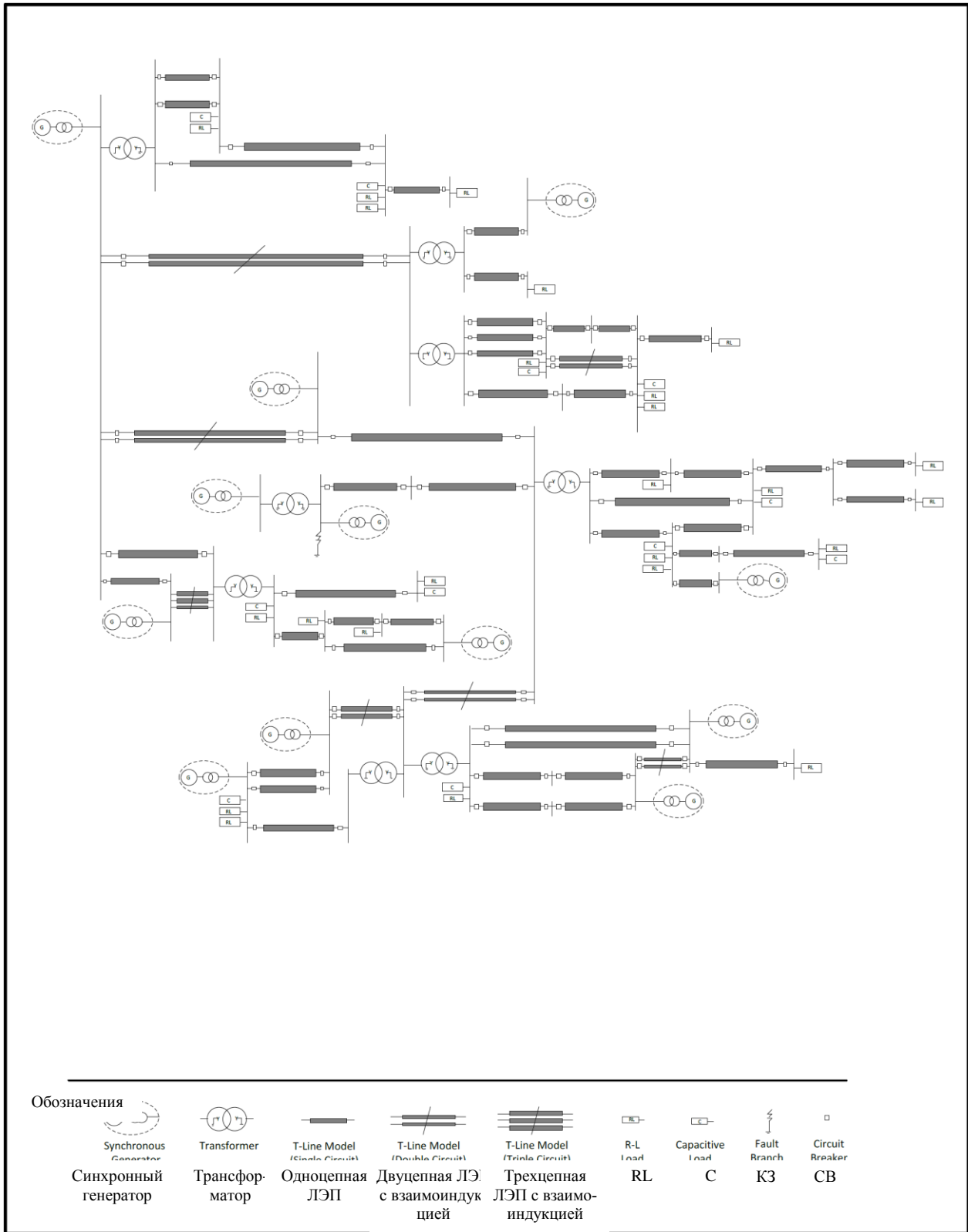




Пример № 6 – Система с 39 шинами

Компоненты	Количество	Вычислительная нагрузка, у.е.	Комментарии
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	(366-276*) =90	120	1 расчет сети / 1 подсистема. 276 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы: генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	34	340	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Генератор-трансформатор (трехфазный)	9	180	Модель генератора с интегрированным трансформатором (без учёта промежуточных узлов)
Трансформатор (трехфазный)	3	45	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
Источник трехфазный	1	10	
Динамическая нагрузка	18	180	
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>875</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>3 ядра</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: тремя (3) ядрами</b>



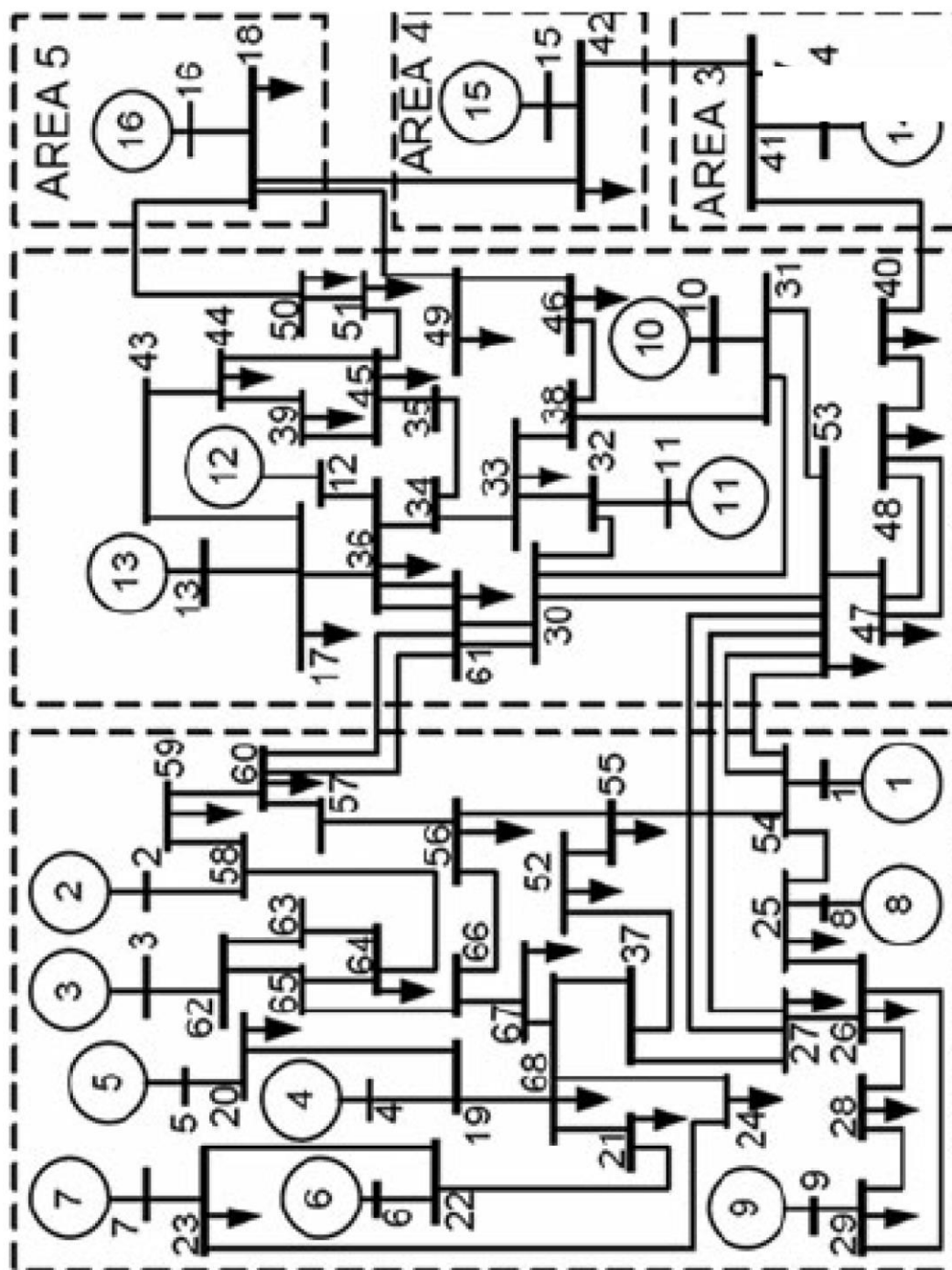


**Пример № 7 – Система с 59 шинами**

<b>Компоненты</b>	<b>Количество</b>	<b>Вычислительная нагрузка, у.е.</b>	<b>Комментарии</b>
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	(645-468*) =177	300	1 расчет сети / 1 подсистема. 468 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	46	460	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Двухцепная линия электропередачи (трехфазная)	6	180	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Трехцепная линия электропередачи (трехфазная)	1	40	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона
Генератор-трансформатор (трехфазный)	12	240	Модель генератора с интегрированным трансформатором (без учёта промежуточных узлов)
Трансформатор (трехфазный)	8	160	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>1380</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>5 ядер</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: пятью (5) ядрами</b>



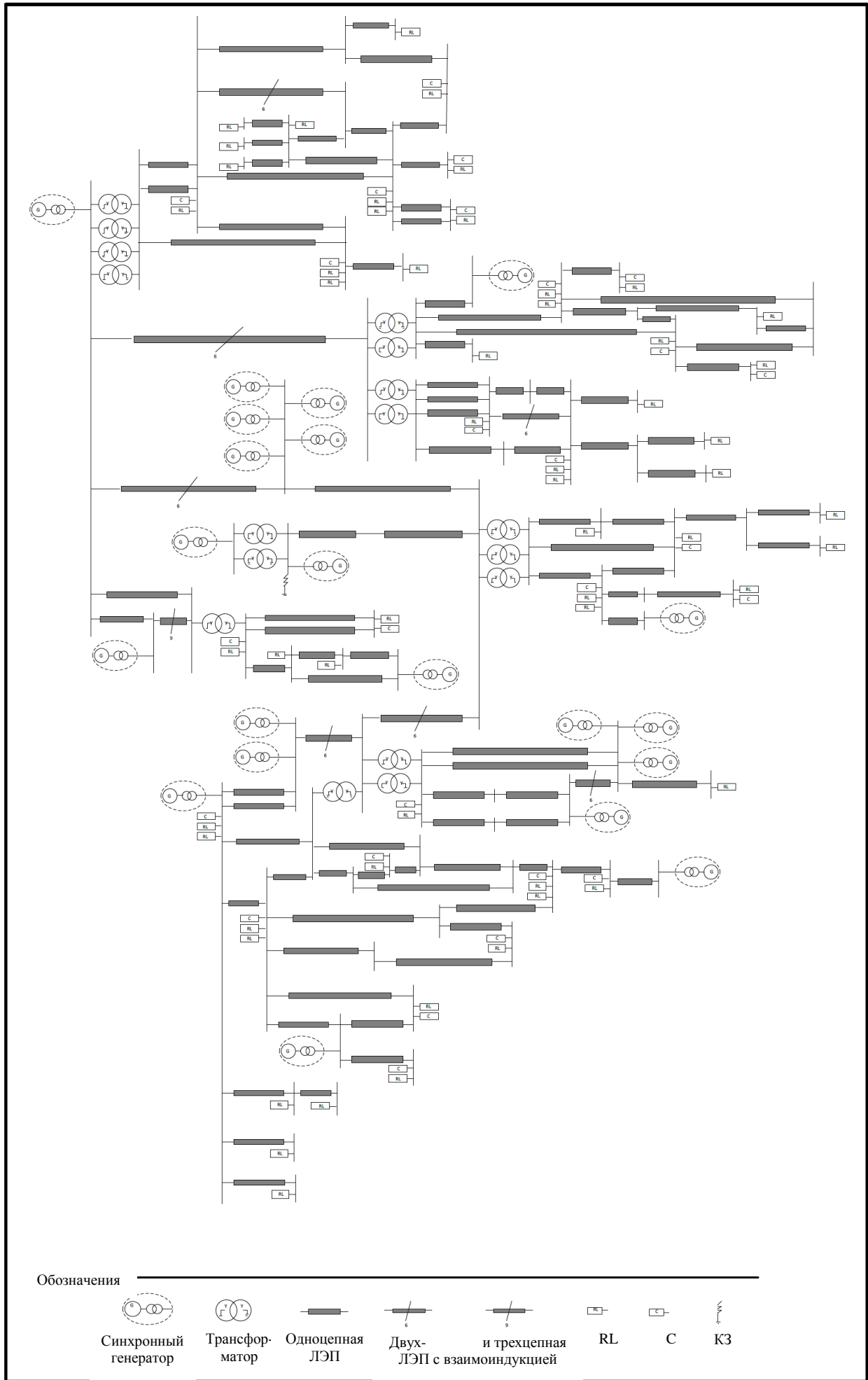




### Пример № 8 – Система с 68 шинами

Компоненты	Количество	Вычислительная нагрузка, у.е.	Комментарии
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	(600-450*) =150	300	1 расчет сети / 1 подсистема. 450 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	55	550	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Двухцепная линия электропередачи (трехфазная)	3	90	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Генератор-трансформатор (трехфазный)	16	320	Модель генератора с интегрированным трансформатором (без учёта промежуточных узлов)
Трансформатор (трехфазный)	4	60	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
Динамическая нагрузка	35	350	
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>1670</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>6 ядер</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: шестью (6) ядрами</b>





### Пример № 9 – Система с 108 шинами

Компоненты	Количество	Вычислительная нагрузка, у.е.	Комментарии
Узлы (1-фазные) и компоненты управления	(1224-900*) =324	600	1 расчет сети / 1 подсистема. 900 встроенных узла: ЛЭП, трансформаторы, генераторы, не требующие расчета сети. Элементы генераторов, выключателей, КЗ, ввода-вывода дискретных сигналов
Одноцепная линия электропередачи (трехфазная)	98	980	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Двухцепная линия электропередачи (трехфазная)	7	210	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона со встроенными выключателями
Трехцепная линия электропередачи (трехфазная)	1	40	Модель с бегущей волной с расчетом методом Бержерона
Генератор-трансформатор (трехфазный)	21	420	Модель генератора с интегрированным трансформатором (без учёта промежуточных узлов)
Трансформатор (трехфазный)	17	255	Модель трехфазного трансформатора с учетом насыщения и со встроенным выключателем
<b>Вычислительная нагрузка итого</b>		<b>2505</b>	<b>300 у.е на ядро, 10 ядер в одном модуле NovaCor</b>
<b>Ядер NovaCor итого</b>		<b>9 ядер</b>	<b>Один (1) модуль NovaCor с: девятью (9) ядрами</b>

