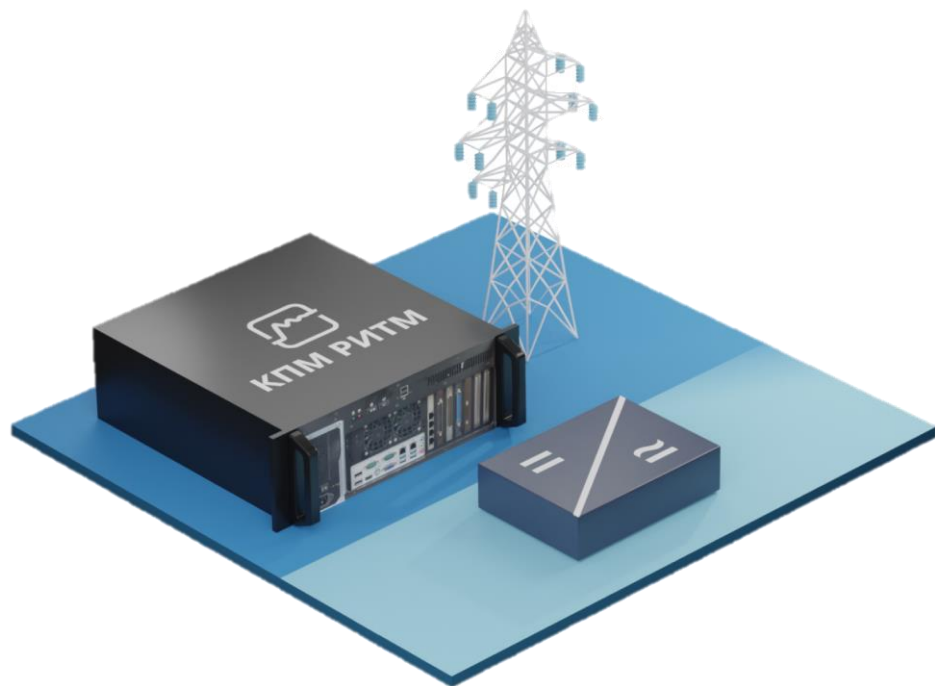




**ЭКСПОНЕНТА**

ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ



## Моделирование силовой электроники и прототипирование систем управления в реальном времени на КПМ РИТМ

---

Даниил Тимофеев

Лаборатория ЦМвЭЭ ЦИТМ «Экспонента»

# ВИЭ в России

На **01.04.2024** совокупная установленная **мощность** объектов ВИЭ в России составляет **6,11 ГВт**.

В лидерах **ветровые и солнечные электростанции** (по **2,6 и 2,2 ГВт** мощности соответственно), а также малые гидроэлектростанции мощностью до 50 МВт (1,3 ГВт).

Также в эксплуатации находятся и иные виды ВИЭ совокупной мощностью более 100 МВт.

Доля установленной мощности ВИЭ-генерации в энергосистеме РФ на 01.04.2024

**2,41%** - все ВИЭ  
**1,71%** - ДМП ВИЭ

Доля ВИЭ в общем объеме потребления электроэнергии в России (за период 01.01.2024-01.04.2024)

**1,09%** - все ВИЭ  
**0,74%** - ДМП ВИЭ

**Источник:** Ассоциация развития возобновляемой энергетики (rreda.ru)

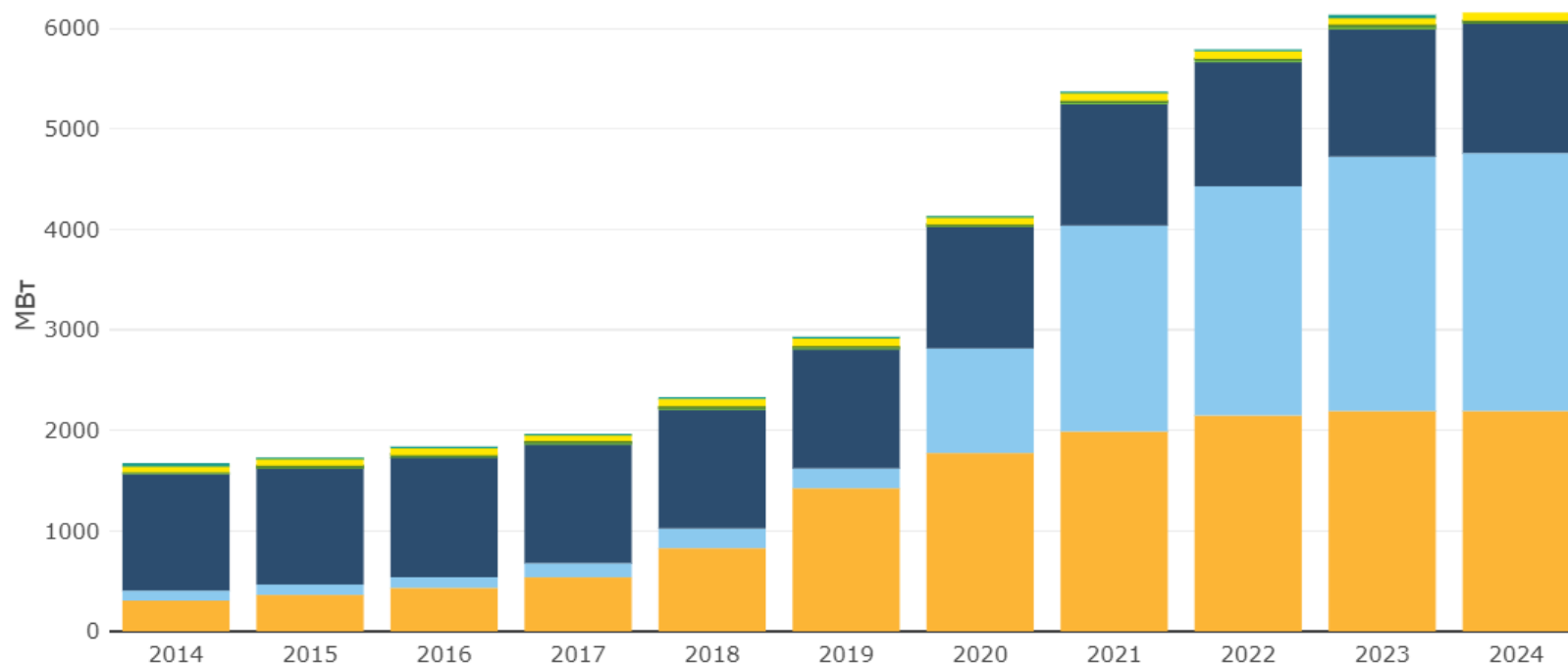
# ВИЭ в России

Доля ВИЭ в общем объеме потребления электроэнергии в России (за период 01.01.2024-01.04.2024)

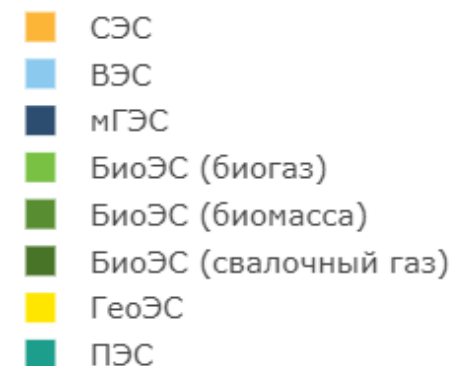
**1,09%** - все ВИЭ  
**0,74%** - ДМП ВИЭ

Доля установленной мощности ВИЭ-генерации в энергосистеме РФ на 01.04.2024

**2,41%** - все ВИЭ  
**1,71%** - ДМП ВИЭ



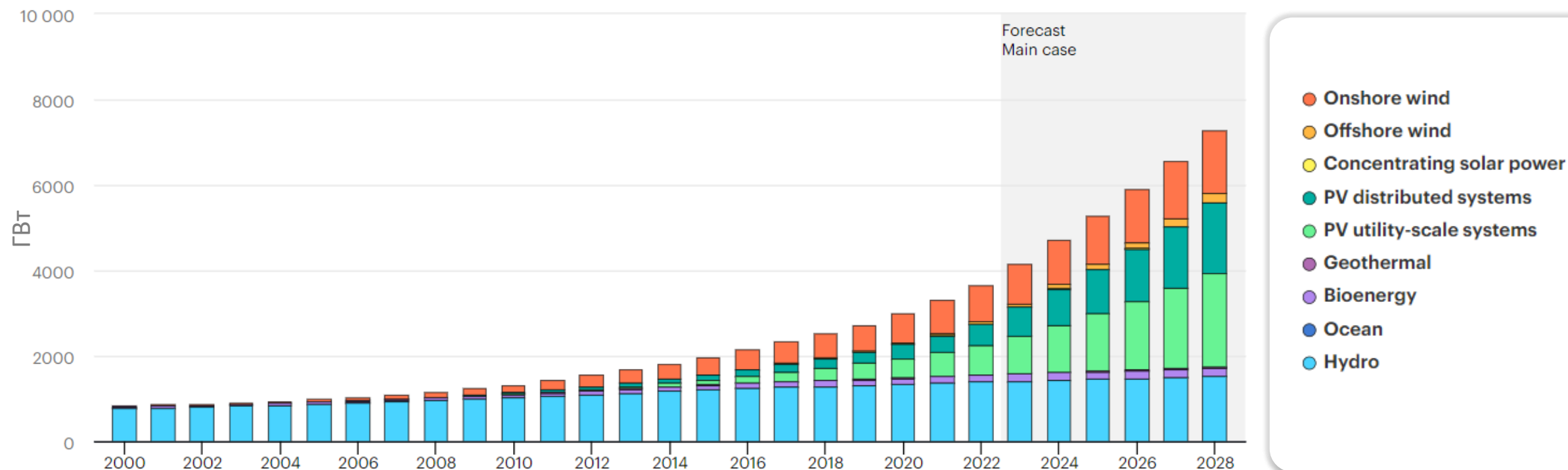
**Динамика совокупной установленной мощности объектов ВИЭ-генерации в России**



**Источник:** Ассоциация развития возобновляемой энергетики (rreda.ru)

# ВИЭ в мире

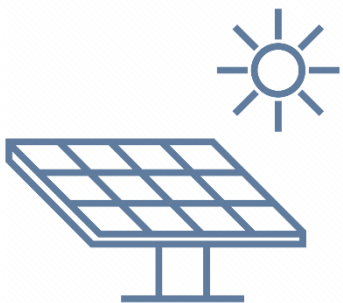
## Динамика совокупной установленной мощности объектов ВИЭ-генерации



Источник: Международное энергетическое агентство (IEA)

# Сложности интеграции ВИЭ и СНЭ в сети

Повышение распространения использования технологий ВИЭ с силовыми преобразователями может вызывать ряд вопросов



- Некорректная работа устройств РЗА
- Отсутствие механической инерции
- Влияние ВИЭ на алгоритмы работы устройств автоматики
- Сложность использования ВИЭ в реализации локальной ПА
- Техническая сложность ВИЭ и СНЭ повышает требования к персоналу
- Электронная генерация снижает качество электроэнергии

# Зачем моделировать силовую электронику?

## **ВИЭ и СНЭ:**

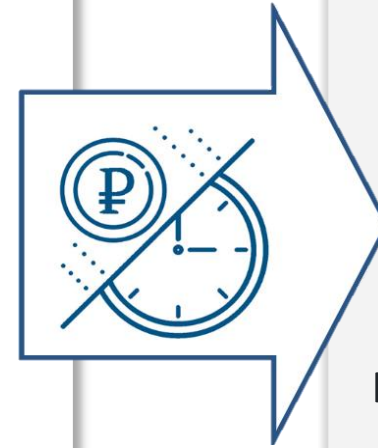
безболезненная интеграция ВИЭ и СНЭ в сети=>  
**HiL-тестирование** систем управления, например,  
алгоритмов виртуальной инерции

## **РЗА:**

разработка новых систем защиты для сетей с  
высокой долей ВИЭ =>  
**HiL-тестирование** терминалов РЗА на цифровых  
моделях в реальном времени

## **Исследования:**

Моделирование и проведение проектных и научных  
изысканий для сетей с ВИЭ



Совершенствование  
алгоритмов и методов,  
уверенный ввод в  
эксплуатацию без  
продления сроков и  
неожиданного поведения  
оборудования

# Моделирование в реальном времени на КПМ РИТМ

Российский программно-аппаратный комплекс моделирования в жестком реальном времени (ПАК РВ).

## КПМ РИТМ

Первый российский ПАК РВ с 2017 г.

Более **20 предприятий** В России **используют** КПМ РИТМ.

Активное применение в электроэнергетике:

- ✓ **Разработка:** НПП «ЭКРА», НПО «Фарватер»
- ✓ **Обучение:** НГТУ (г. Новосибирск), ЮГУ (г. Ханты-Мансийск), ДальГАУ (г. Благовещенск)
- ✓ **Исследования:** Коми НЦ УрО РАН



# Моделирование в реальном времени на КПМ РИТМ

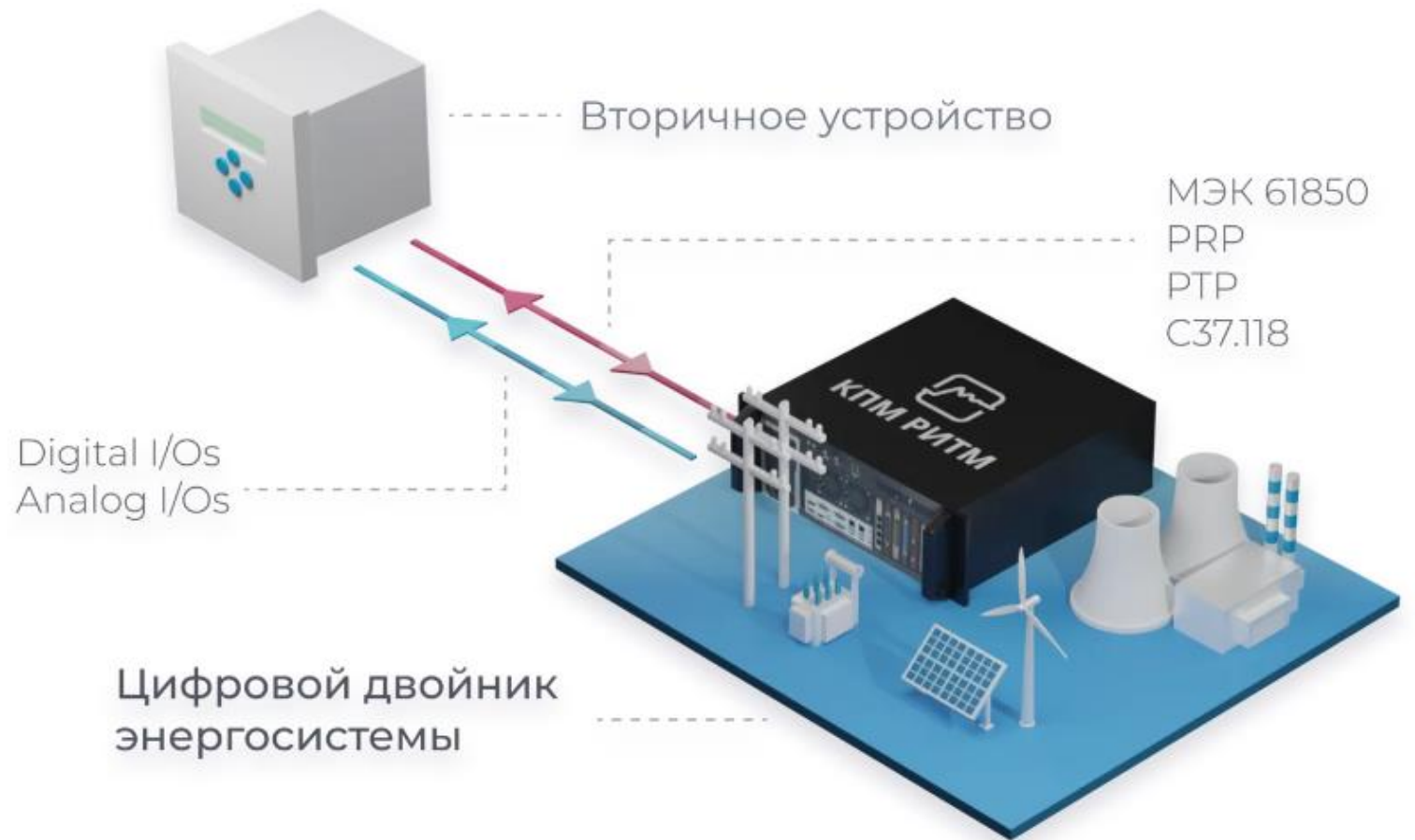




# Сценарии использования КПМ РИТМ

## Тестирование вторичных устройств

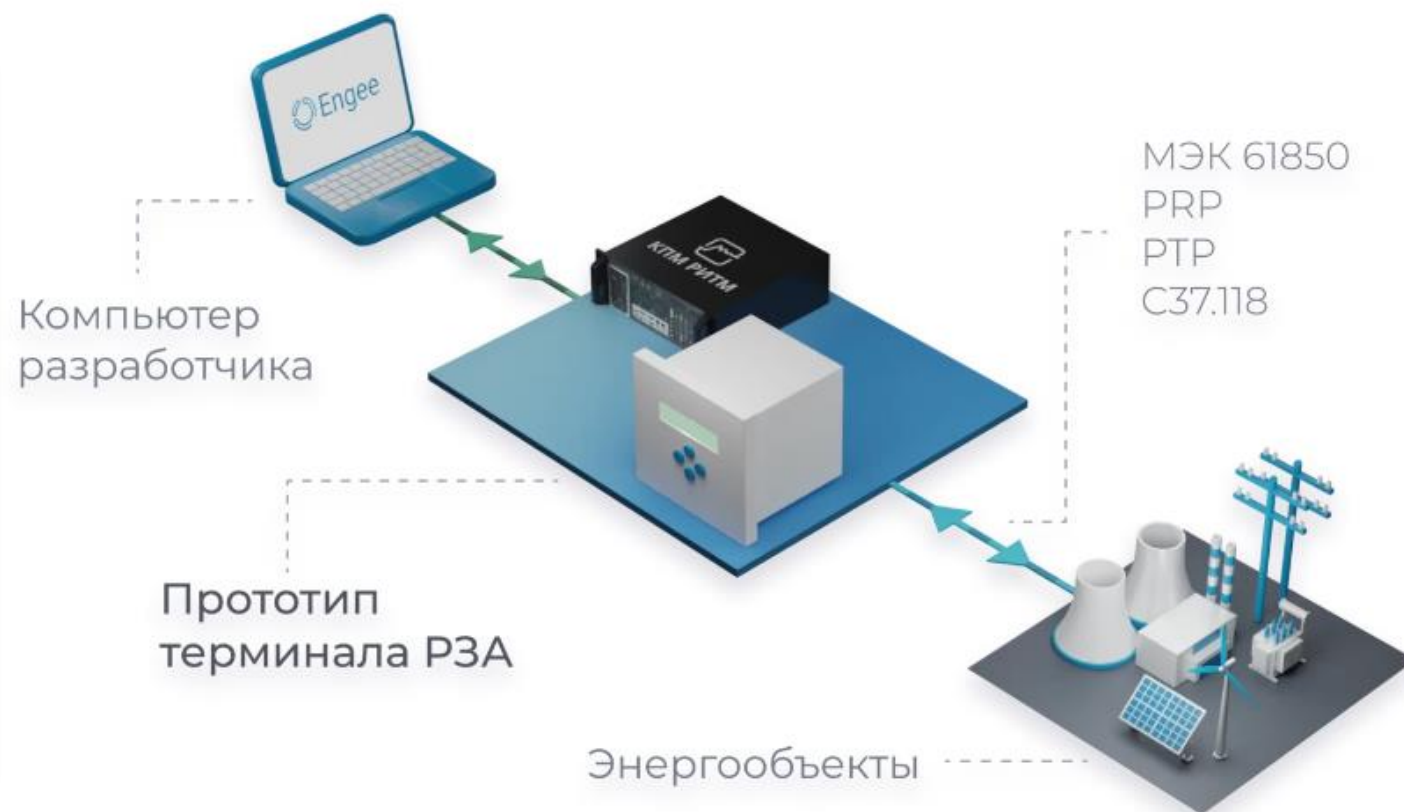
Предварительное испытание и отладка разрабатываемого устройства, подготовка устройства к сертификации. Полунатурные испытания вторичного устройства, например, терминала РЗА, на цифровой модели энергосистемы в режиме жесткого реального времени. В рамках сценария можно подключить терминал по различным интерфейсам.



# Сценарии использования КПМ РИТМ

## Быстрое прототипирование

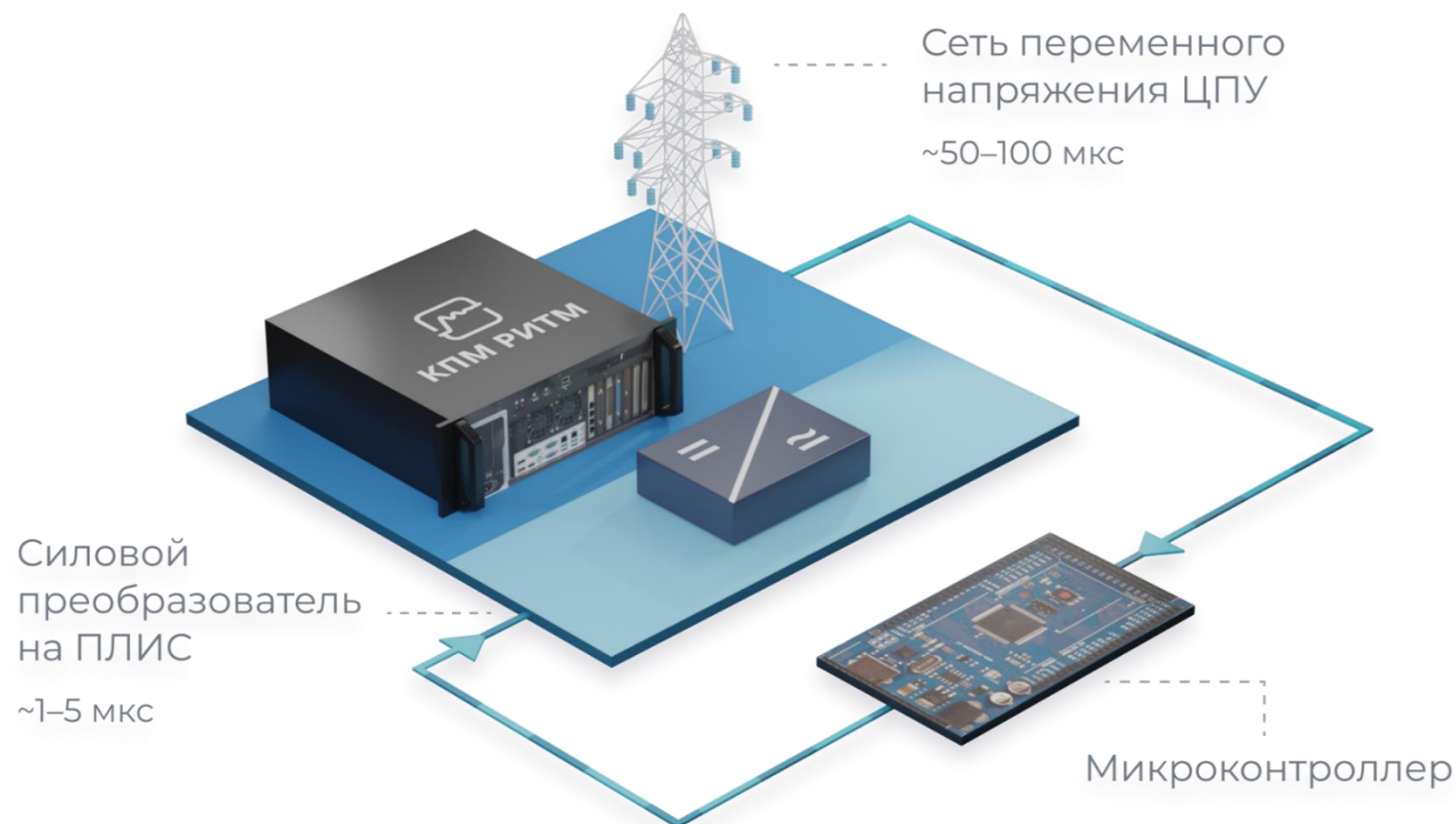
Реализация алгоритма с определенной частотой расчета для быстрого прототипирования. КПМ РИТМ с алгоритмом работы терминала РЗА подключается к испытываемой системе вместо реального терминала, который на данный момент еще не произведен. Таким образом можно убедиться, что выбранный алгоритм работает корректно.



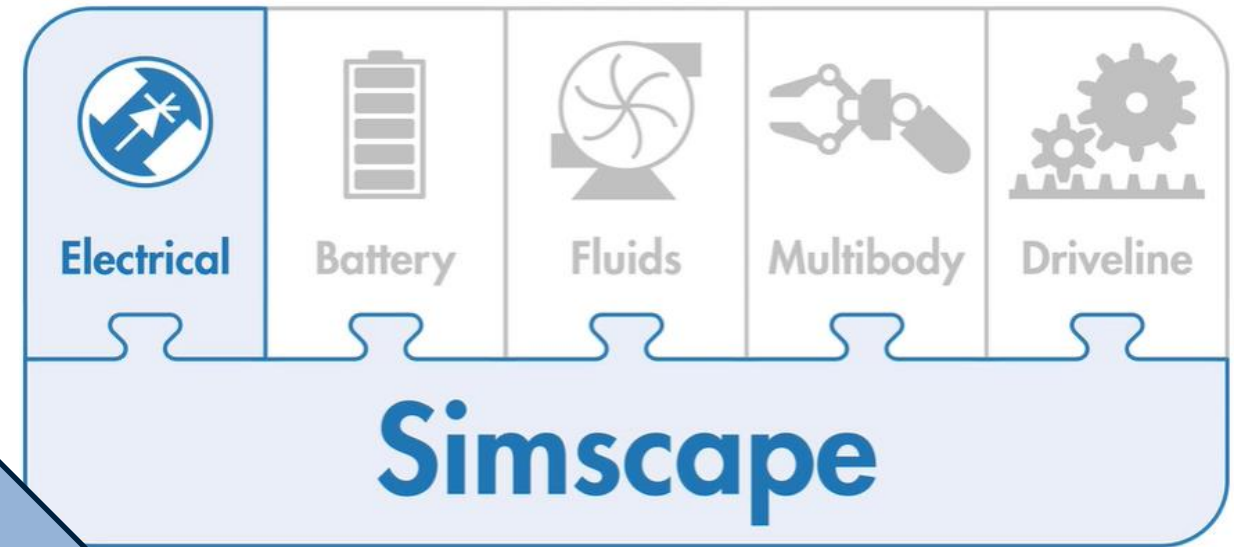
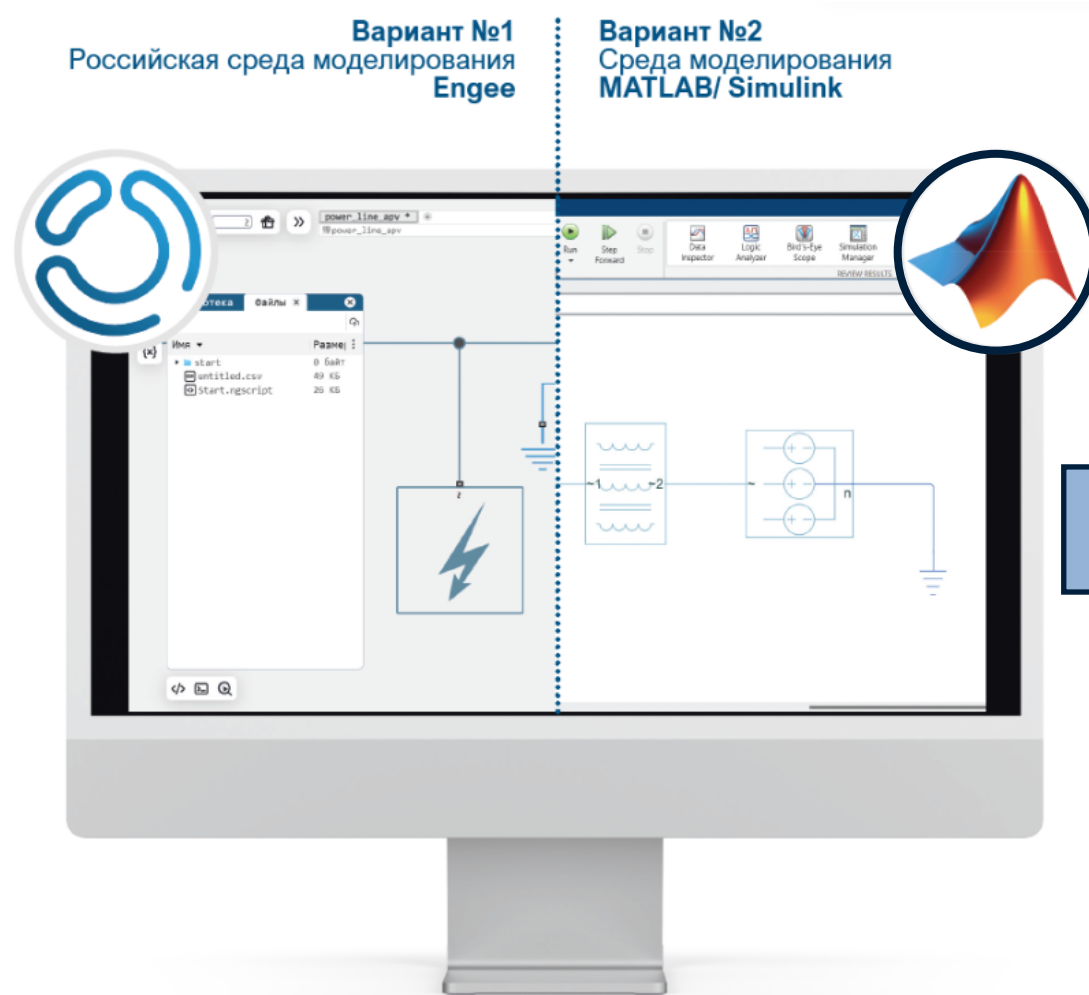
# Сценарии использования КПМ РИТМ

## Тестирование силовой электроники

Использование КПМ РИТМ для тестирования микроконтроллеров инверторов — это эффективный способ верифицировать управляющее ПО и аппаратные компоненты. Если в ходе тестов обнаружены проблемы или несоответствия, можно внести необходимые изменения в управляющее ПО микроконтроллера или элементную базу и провести повторное тестирование.



# Моделирование элементов силовой электроники



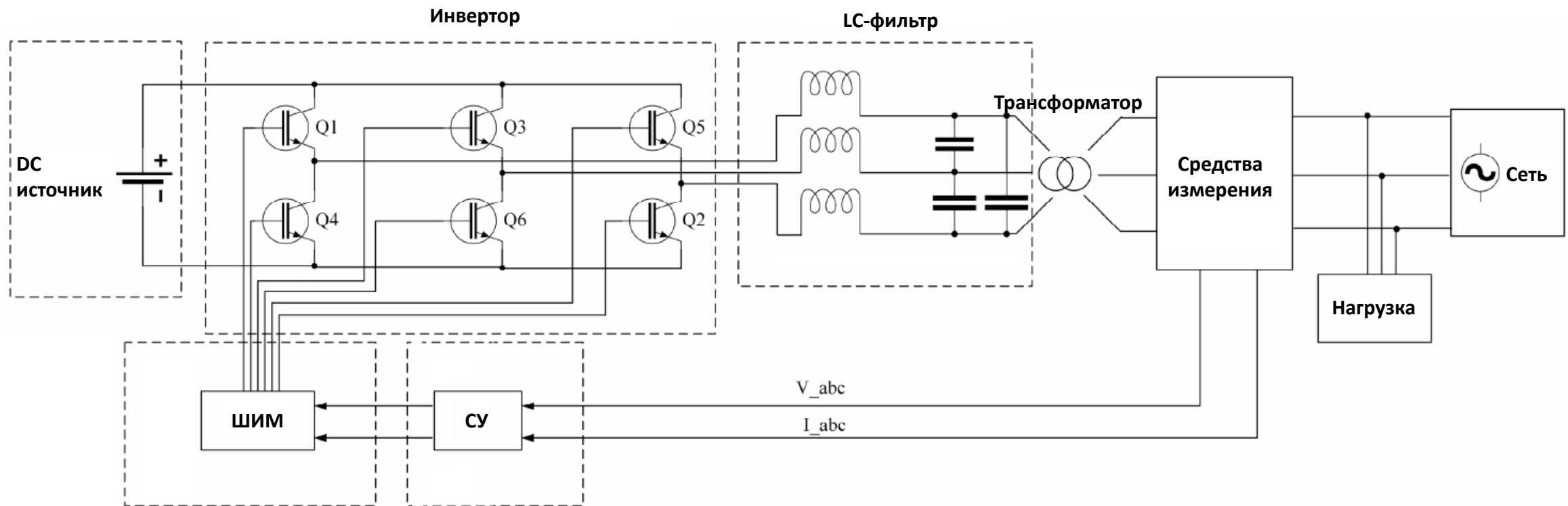
- Моделирование электроэнергетических систем
- **Моделирование ВИЭ**
- **Моделирование силовой электроники**
- **Моделирование алгоритмов управления, защиты, автоматики и обработки сигналов**

# Моделирование элементов силовой электроники

## Пример №1:

Сетевой инвертор подключенный через трансформатор к внешней сети.

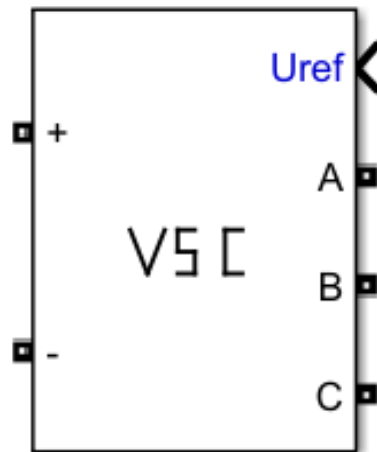
В MATLAB/Simulink соберем небольшую систему с сетевым инвертором (grid-tie), с сопутствующими фильтрами и системой векторного управления.



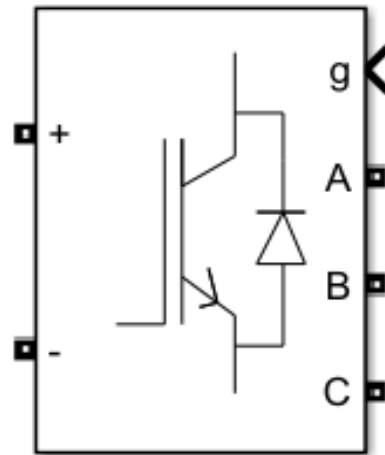
# Методы моделирования преобразовательной техники

В MATLAB/Simulink соберем небольшую систему с сетевым инвертором (grid-tie), с сопутствующими фильтрами и системой векторного управления.

**Усредненная**  
модель силового  
преобразователя



Модель силового  
преобразователя  
**Specialized Power  
Systems**



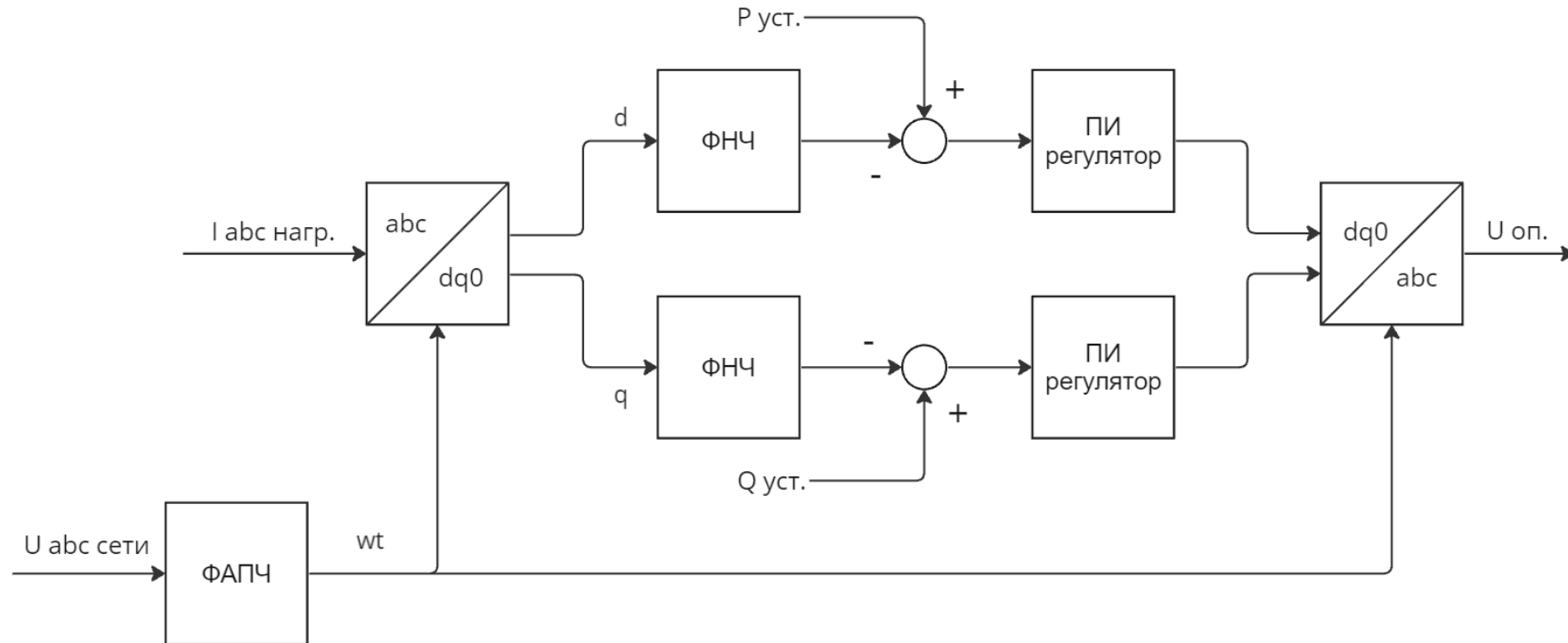
Модель силового  
преобразователя  
**Simscape Electrical**



# Моделирование элементов силовой электроники

Структурная схема простейшей системы управления

С помощью библиотеки блоков математического моделирования MATLAB/Simulink соберем dq-систему управления выдаваемой мощности сетевого инвертора.

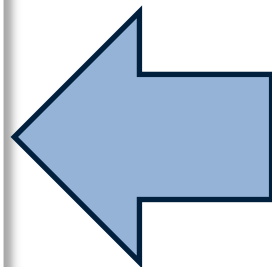
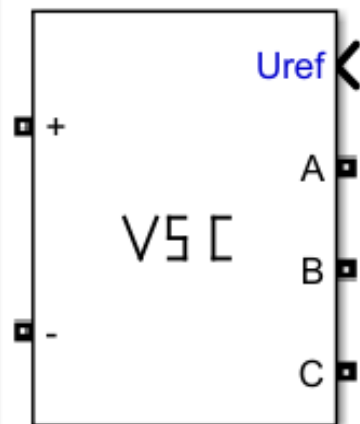




# Моделирование элементов силовой электроники

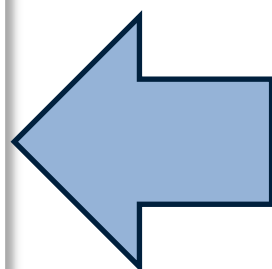
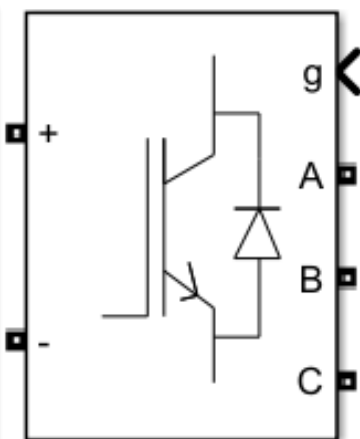
## Усредненная модель

Требуется только опорного напряжения на управляющий вход.

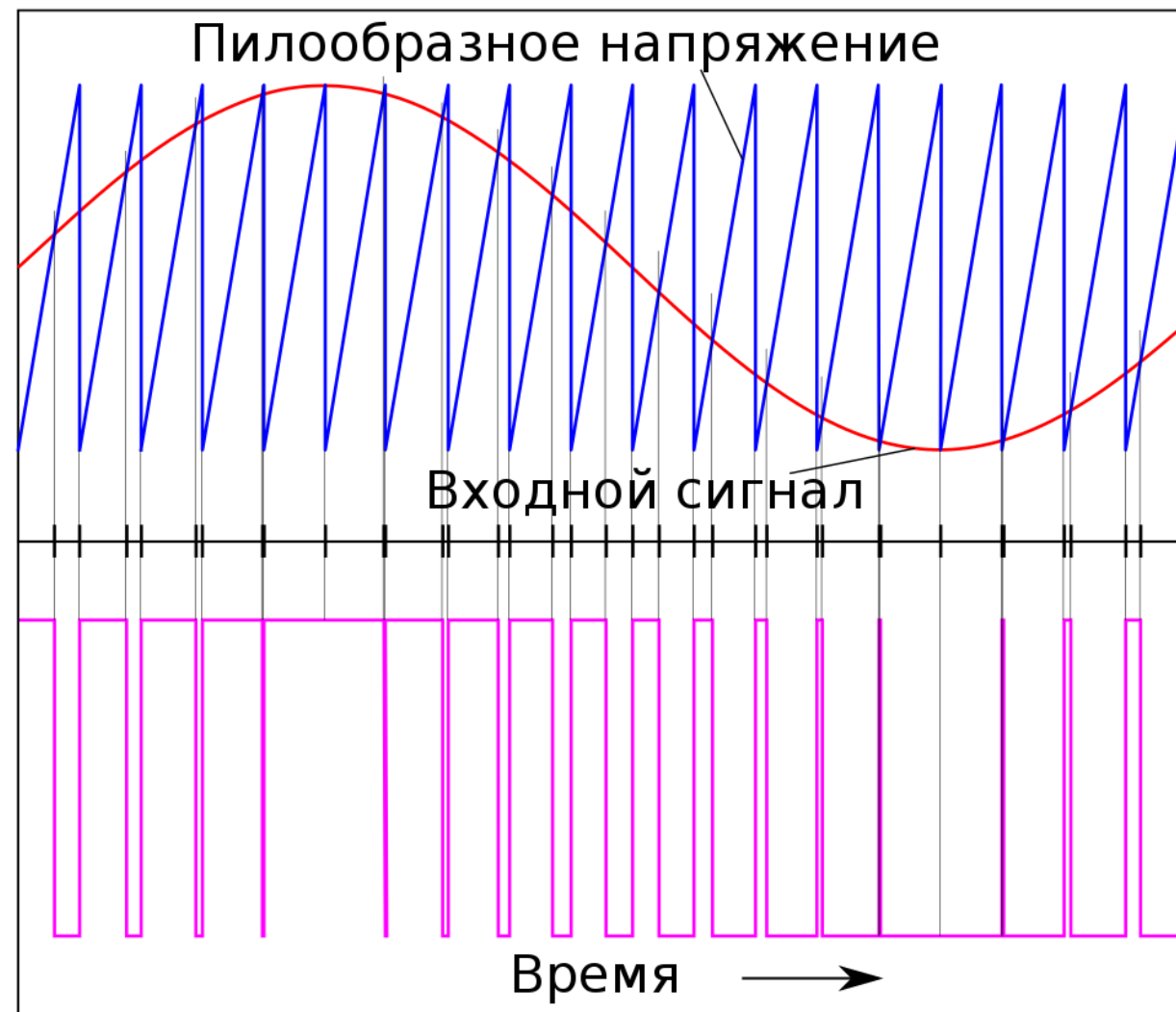


## Полная модель

Требуется ШИМ-сигнала для переключения элементов.



ШИМ-сигнал



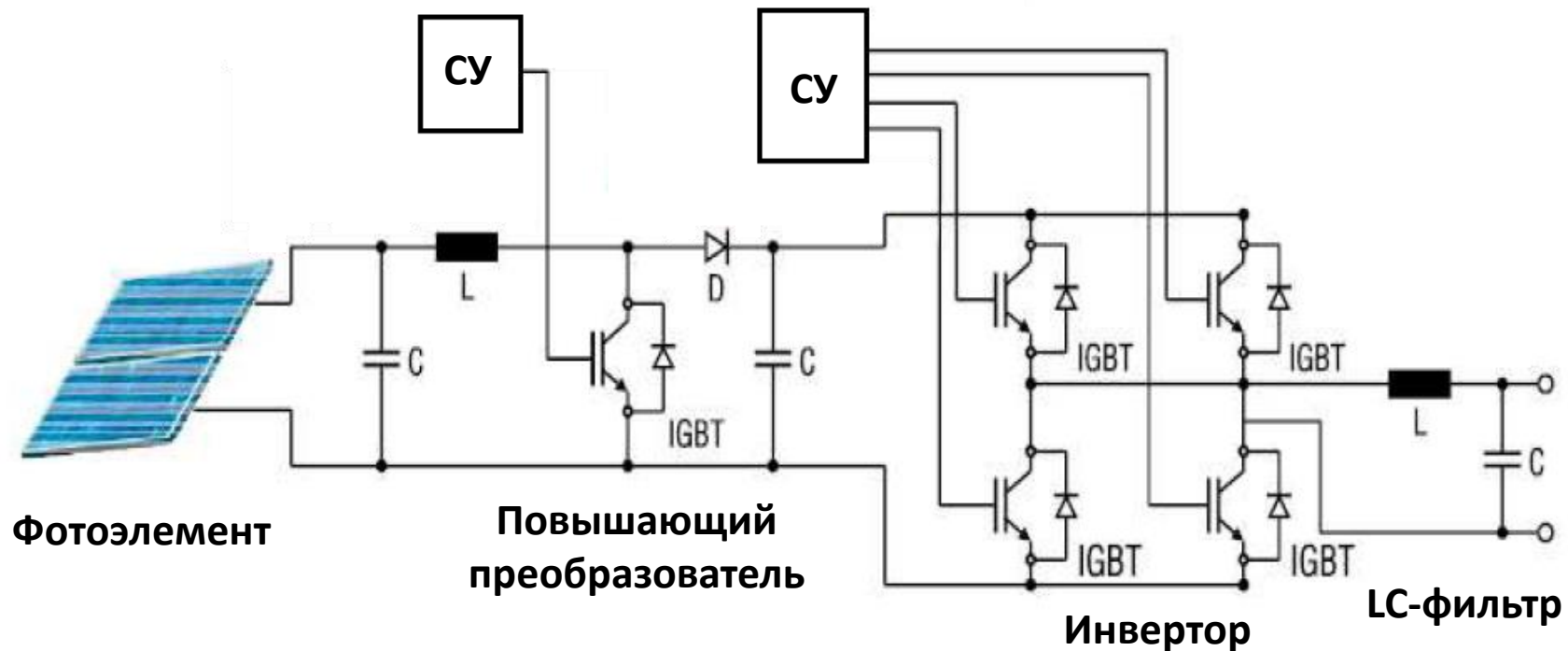


# Моделирование элементов силовой электроники

## Пример №2:

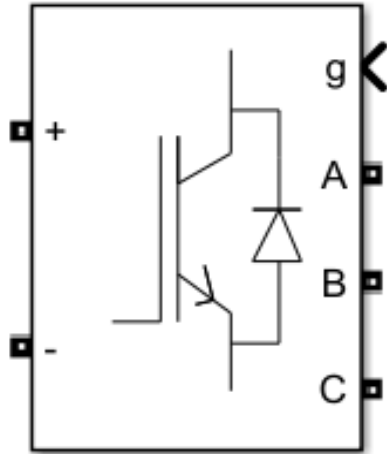
Схема солнечного инвертора с MPPT-контроллером.

В MATLAB/Simulink исследуем модель схемы СЭС с инвертором и повышающим DC-DC преобразователем для выдачи максимальной мощности.



# Полная модель

## Полная модель силового преобразователя

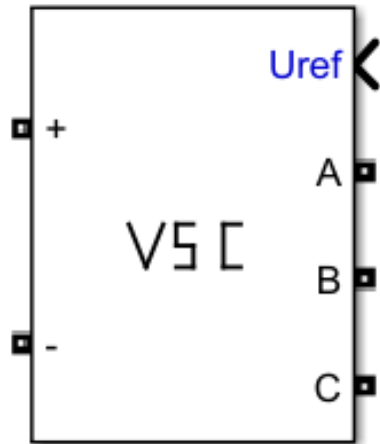


- Простота использования в модели (нет дополнительного инжиниринга)
- Прием ШИМ
- Учет параметров элементов электроники

- Максимальный шаг расчета до 30 - 35 мкс
- При работе на «больших» шагах расчета вызывает излишние искажения формы тока

# Усредненная модель

**Усредненная  
модель силового  
преобразователя**



- **Возможность работы на шаге расчета свыше 200 мкс**
- **Быстрая работы блока**
- **Подходит для быстрого тестирования алгоритмов систем управления**

- **Принимает только опорные синусоиды вместо ШИМ**
- **Не моделирует гармоники**
- **Не учитывает параметры элементов электроники**

# Сценарий разработки и тестирования устройств

**Создание модели и алгоритма управления путем симуляции на ПК**



Система управления инвертором

**Генерация кода для энергосистемы**



**и для микроконтроллера**



**HIL-тестирование**

Моделирование в реальном времени энергосистемы с инвертором



Микроконтроллер с системой управления инвертора

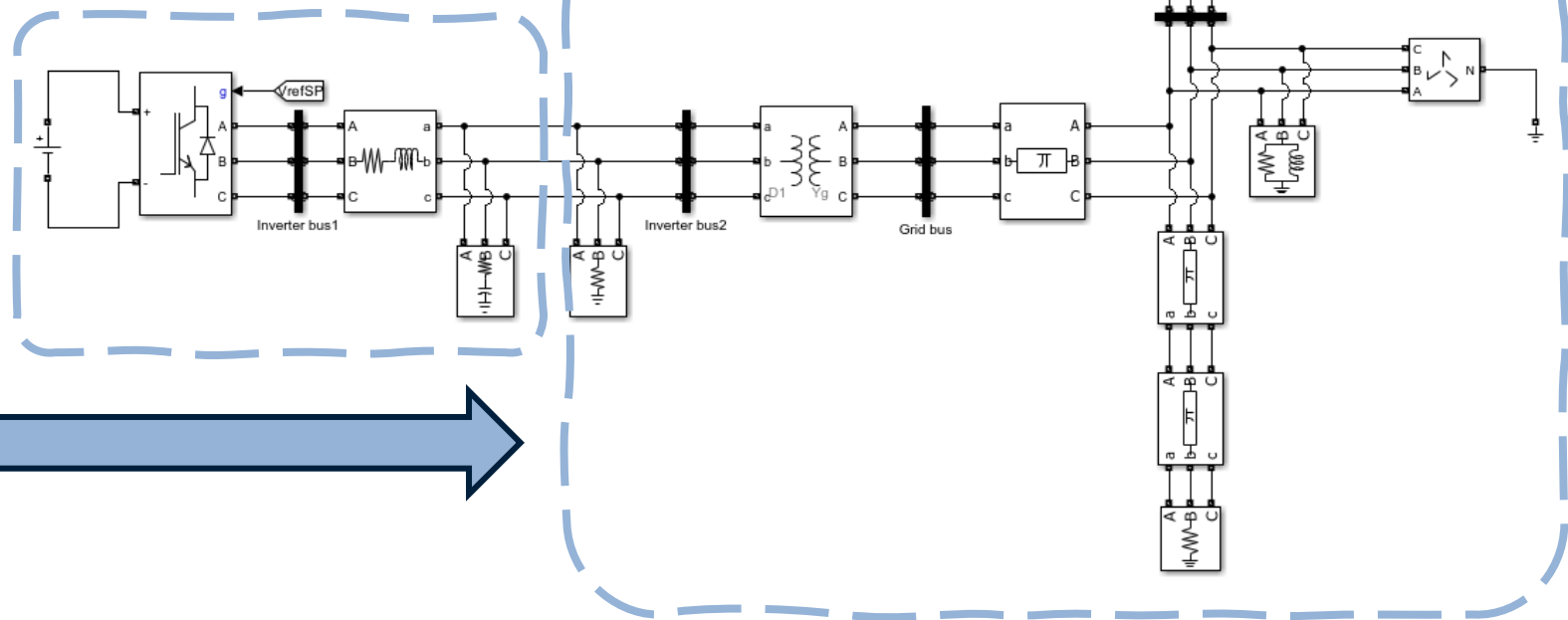
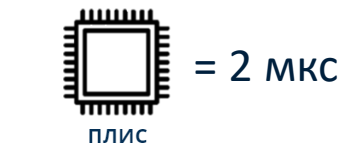
# Демонстрационный пример

## Модель сети с элементами силовой электроники

Модифицированная модель 2-MW PV Farm Connected to a 25-kV Distribution System из документации с:

сетевым инвертором

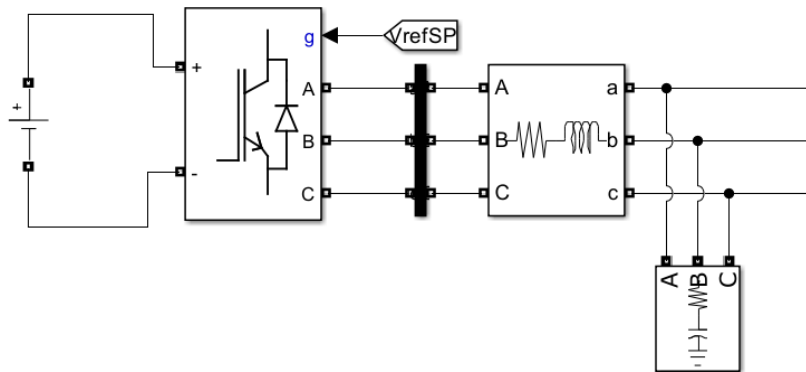
электроэнергетической сетью



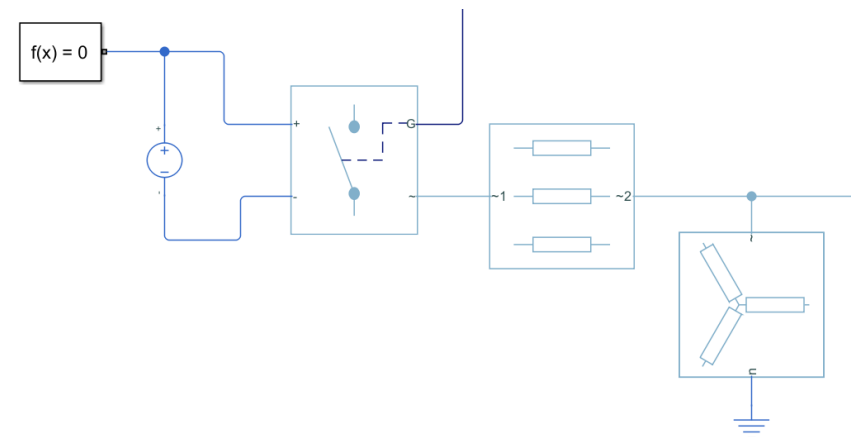
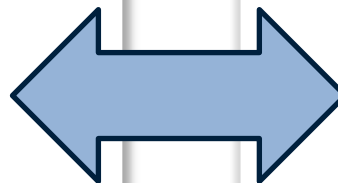
# Запуск на ПЛИС

## Переход к реализации элементов в Simscape Electrical

Библиотека блоков в электрическом домене **Simscape Electrical** позволяет генерировать HDL код для запуска на ПЛИС в автоматическом режиме



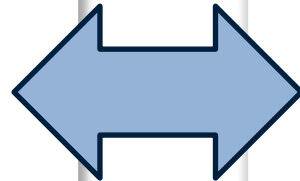
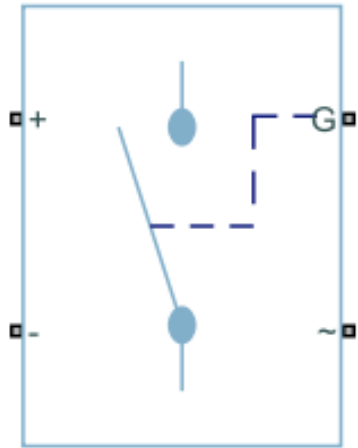
Модель в Specialized Power Systems



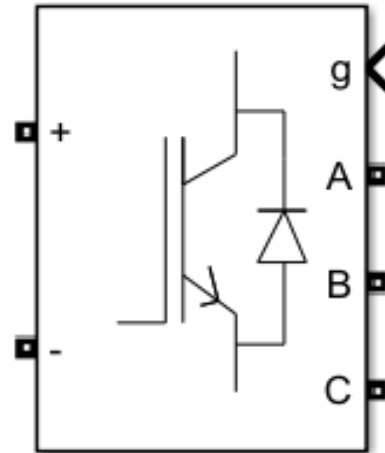
Модель в Simscape Electrical

# Запуск на ПЛИС

Модель силового преобразователя  
**Simscape Electrical**

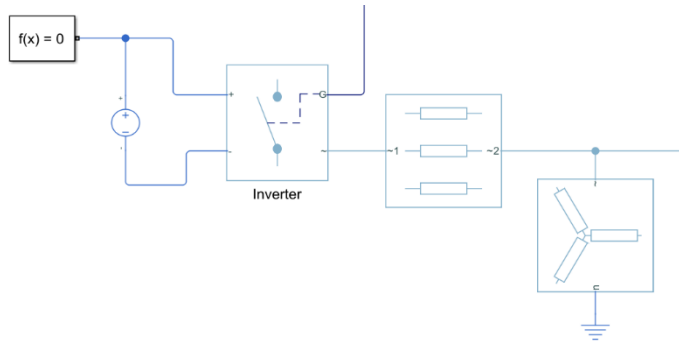


**Полная модель**  
силового  
преобразователя



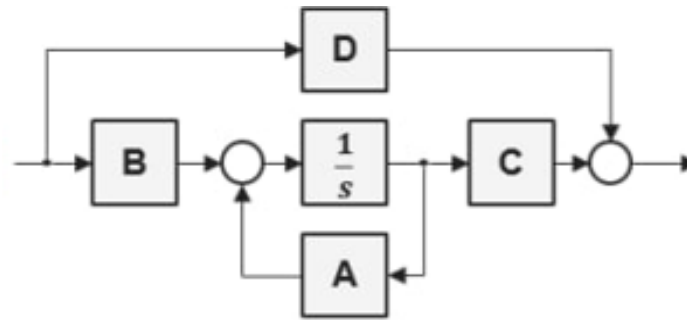
По функционалу  
модели похожи,  
однако **Simscape  
Electrical** имеет  
ВОЗМОЖНОСТЬ  
генерации **HDL-кода**

# Запуск на ПЛИС



Модель Simscare

Система из блоков, которые взаимодействуют друг с другом путем обмена энергией через порты



Модель в пространстве состояний

Математическое представление системы в виде набора входов и выходов и переменных состояния

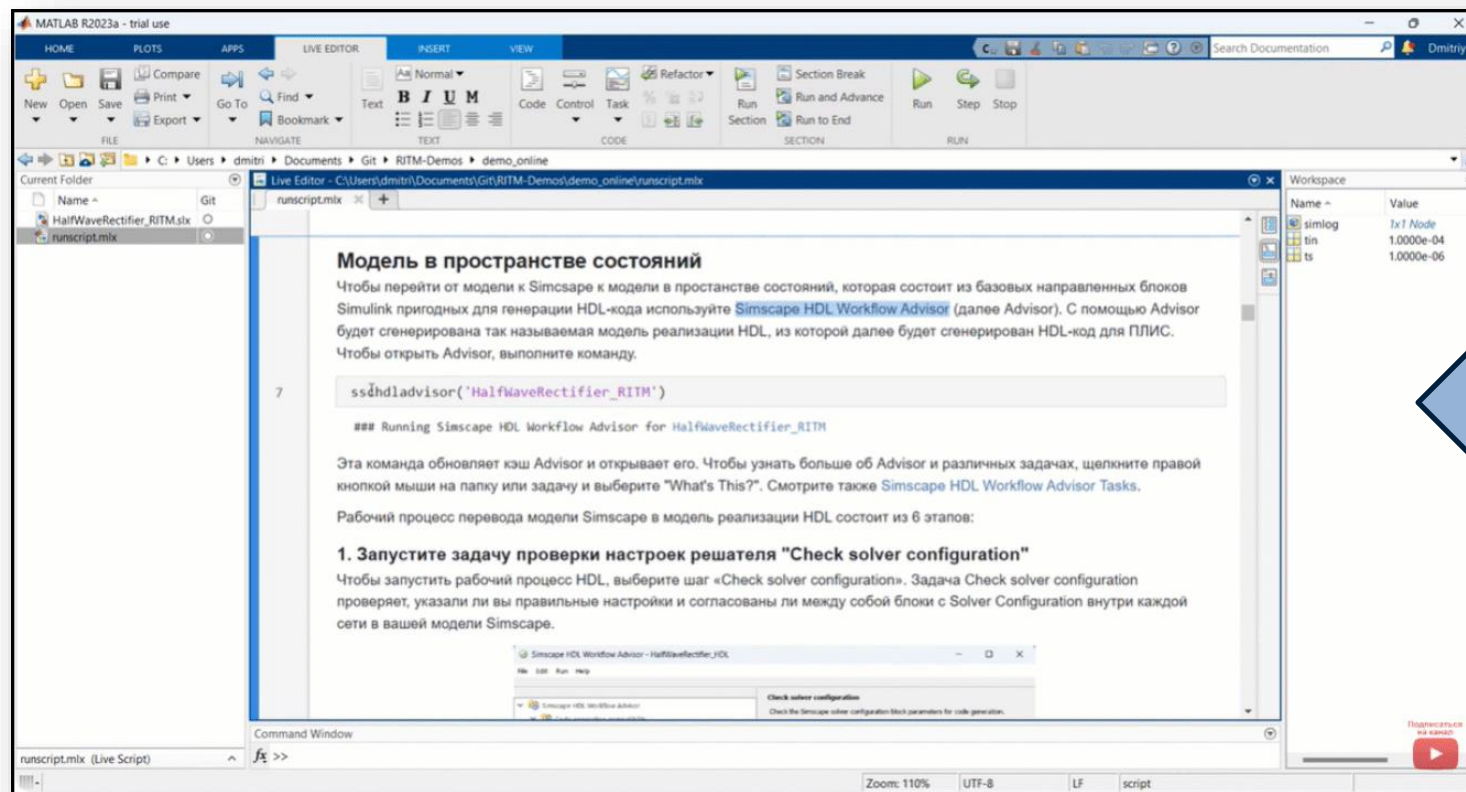


Генерация HDL-кода

Проверка модели на совместимость и автоматическое исправление настроек



# Создание модели пространства состояний и генерация кода



Экспонента Электроэнергетика

**ЭКСПОНЕНТА**

**Моделирование силовой электроники в реальном времени на КПМ РИТМ**

Смотрите вебинар в записи

Выкладываем запись вебинара по моделированию силовой электроники на КПМ РИТМ

Коллеги, рекомендуем к просмотру запись вебинара, который проходил на прошлой неделе. В нем рассказали про:

- сценарии применения КПМ РИТМ;
- мотивацию использования ПЛИС для задач моделирования силовой электроники;
- рабочий процесс запуска модели в реальном времени без единой строки кода.

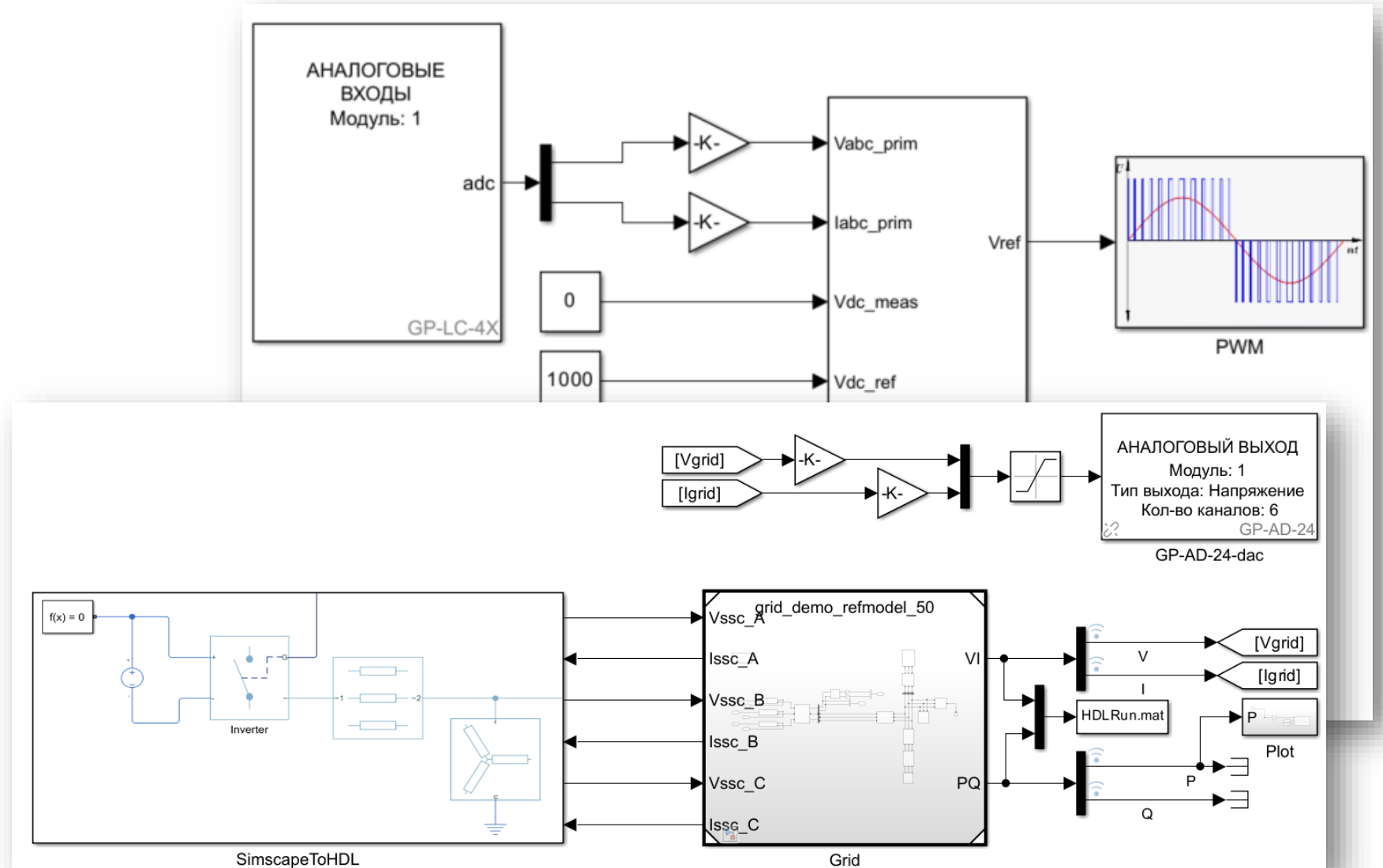
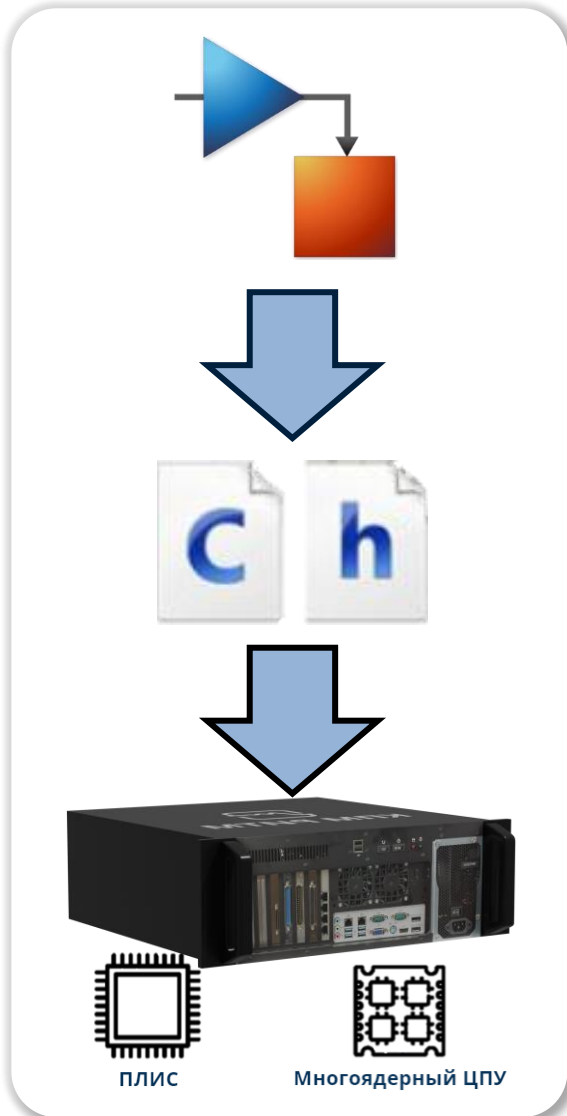
Переходите по [ссылке](#) и задавайте вопросы в комментариях к этому посту

🔥 8 👍 5 ⚡ 2 🧐 1

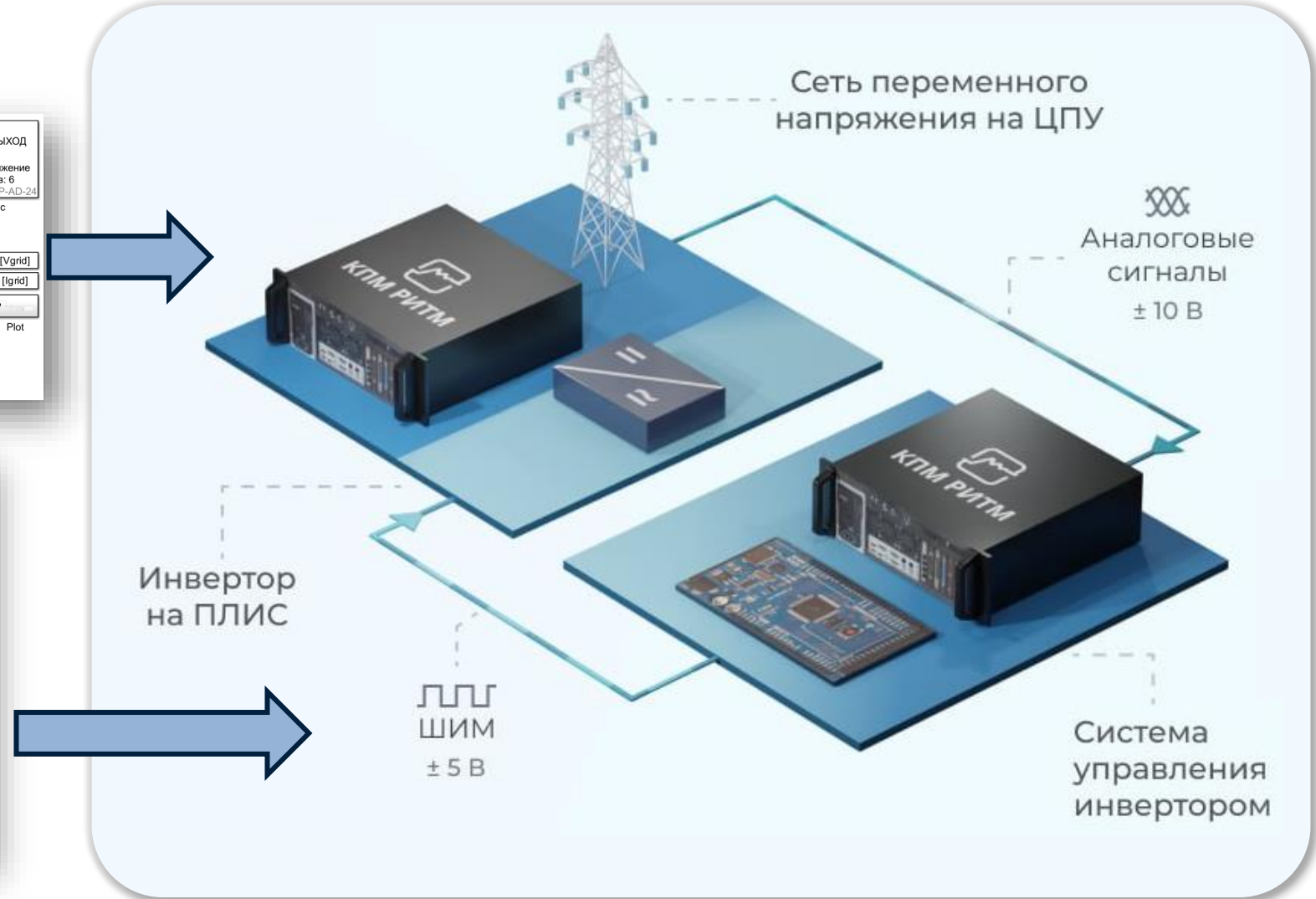
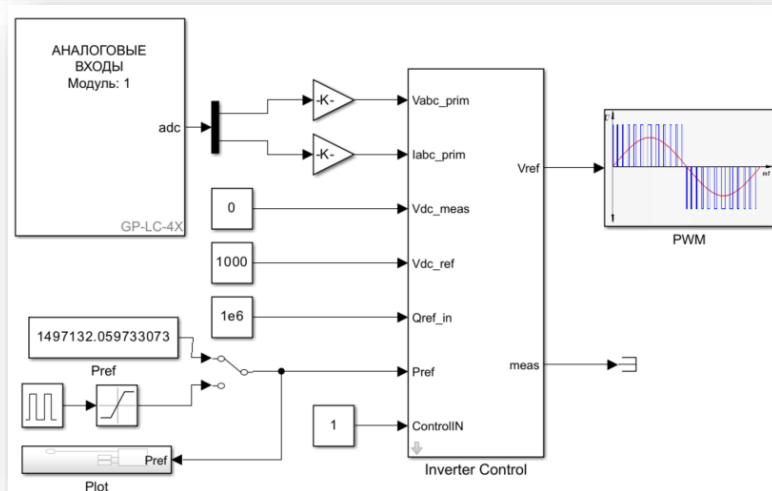
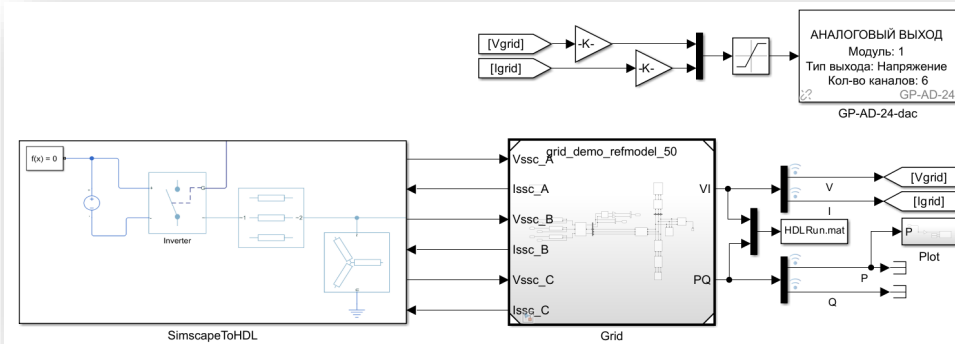
1479 11:15

Прокомментировать

# Одновременный запуск на ПЛИС и ЦПУ



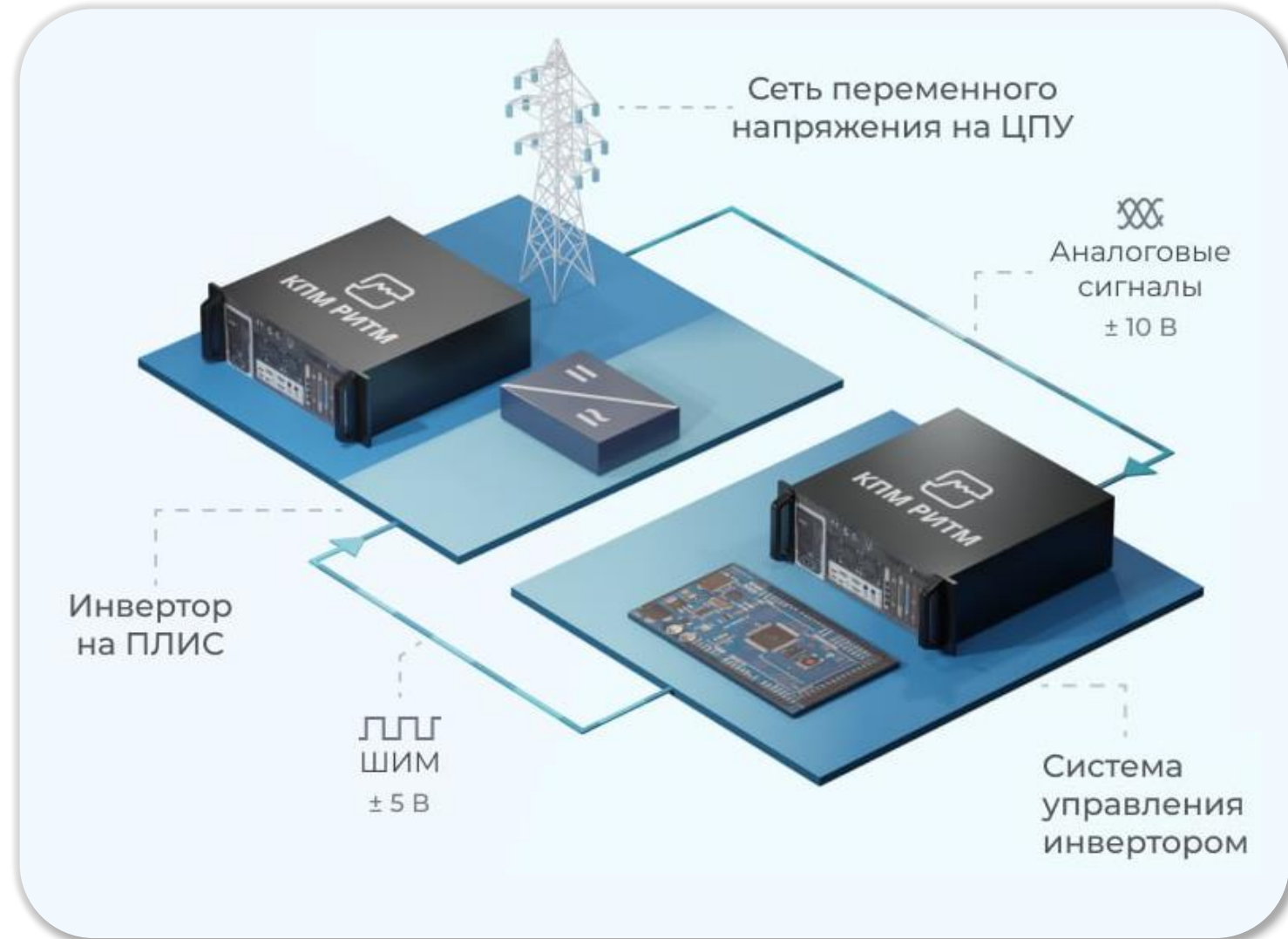
# Сценарий использования КПМ РИТМ



# Сценарий использования КПМ РИТМ

## Быстрое прототипирование + HiL-тестирование

- КПМ РИТМ с имитационной моделью сети имеет модуль ЦАП для передачи измерений из сети, а также модуль быстросействующих цифровых входов для приема ШИМ.
- КПМ РИТМ с СУ имеет АЦП для приема измерений и модуль для формирования ШИМ для управления моделью инвертора.





tech@exponenta.ru  
exponenta.ru



**ЭКСПОНЕНТА**  
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ



@EXPONENTA\_ENERGY

**Спасибо за внимание!**  
Задавайте Ваши вопросы