

## 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](http://rreda.ru))

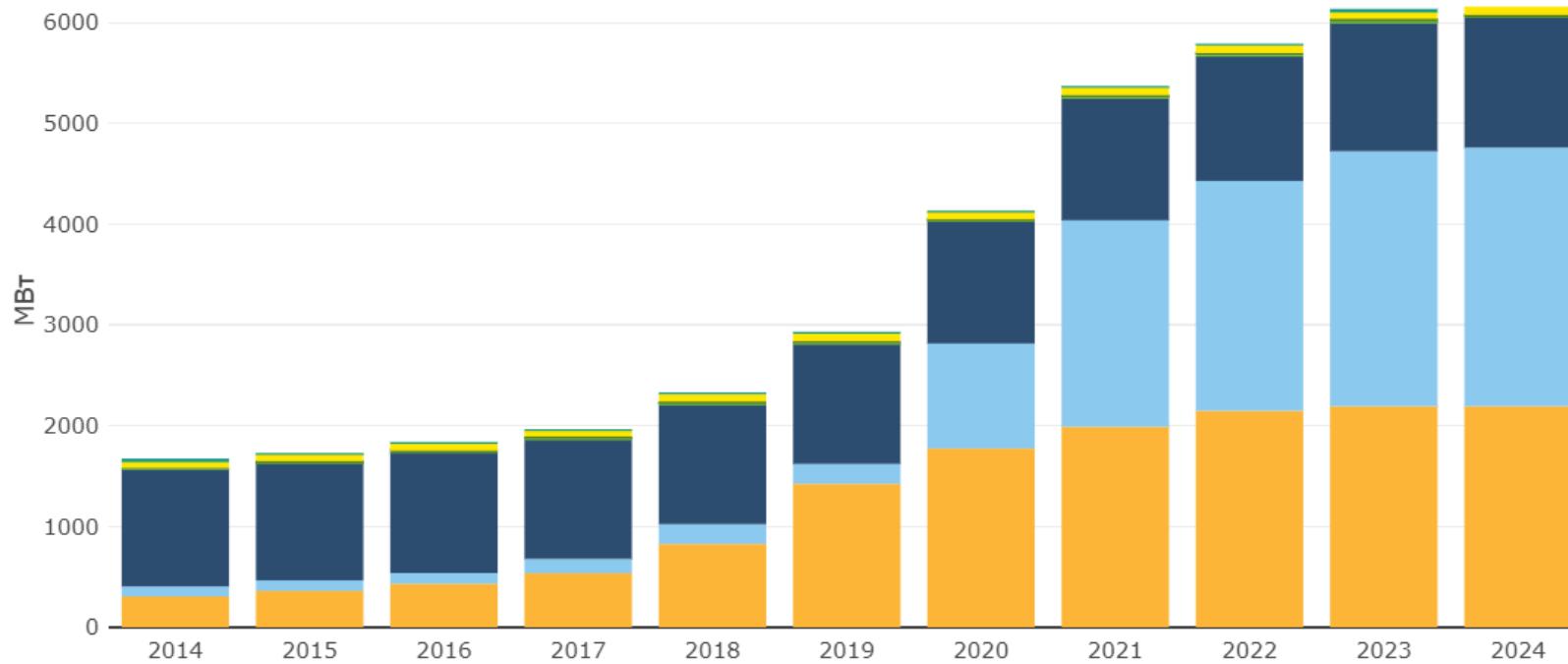
# ВИЭ в России

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



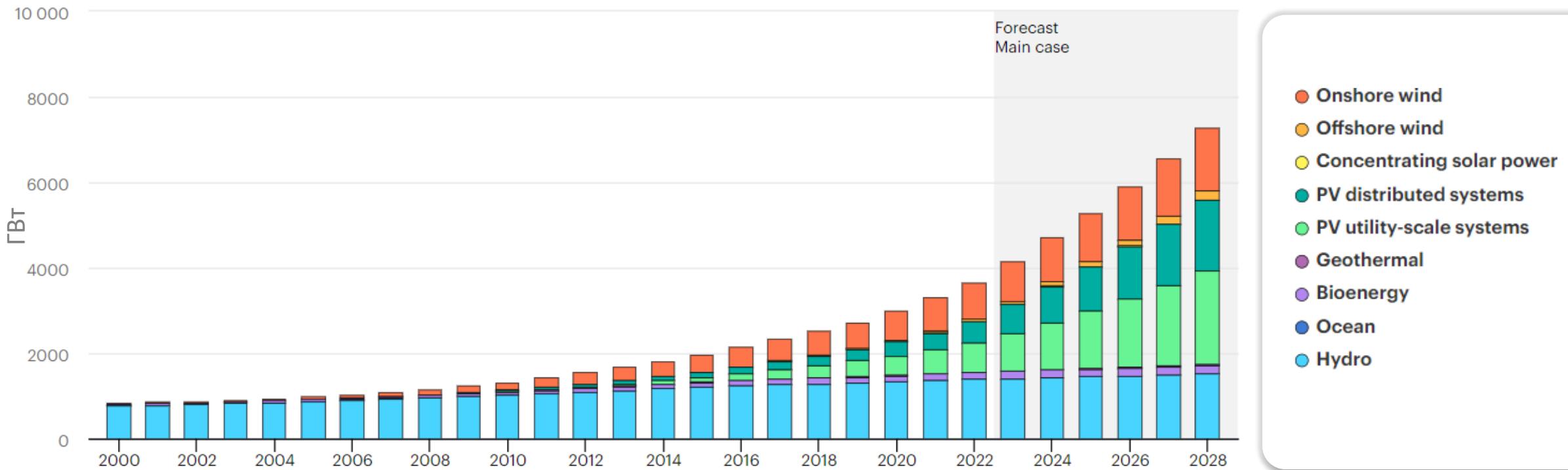
Динамика совокупной установленной мощности объектов ВИЭ-генерации в России

- СЭС
- ВЭС
- мГЭС
- БиоЭС (биогаз)
- БиоЭС (биомасса)
- БиоЭС (свалочный газ)
- ГеоЭС
- ПЭС

Источник: Ассоциация развития возобновляемой энергетики ([rreda.ru](http://rreda.ru))

# ВИЭ в мире

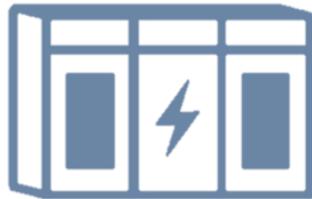
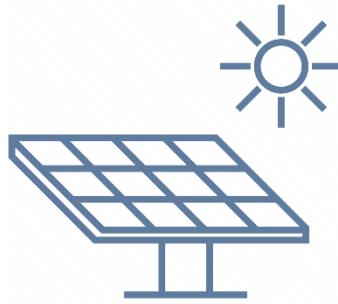
## Динамика совокупной установленной мощности объектов ВИЭ-генерации



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

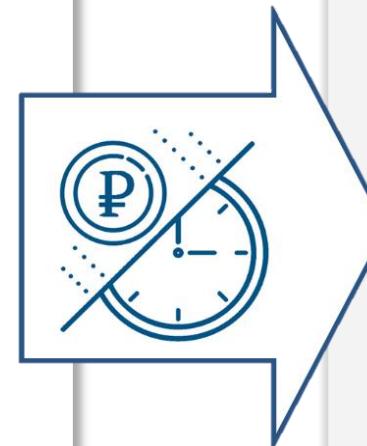
## РЗиА:

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).



Первый российский ПАК РВ с 2017 г.

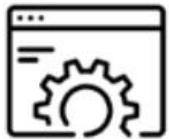
Более 20 предприятий в России используют КПМ РИТМ.

Активное применение в электроэнергетике:

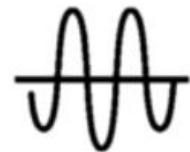
- ✓ **Разработка:** НПП «ЭКРА», НПО «Фарватер»
- ✓ **Обучение:** НГТУ(г. Новосибирск), ЮГУ(г. Ханты-Мансийск),  
ДальГАУ (г. Благовещенск)
- ✓ **Исследования:** Коми НЦ УрО РАН



# Моделирование в реальном времени на КПМ РИТМ



ОС реального времени  
для обеспечения  
жесткого РВ



Интерфейсы связи  
"Медь", МЭК61850, С37.118,  
Aurora и т.д.



Многоядерный ЦПУ  
для моделей ЭЭС и  
алгоритмов (от 50 мкс)

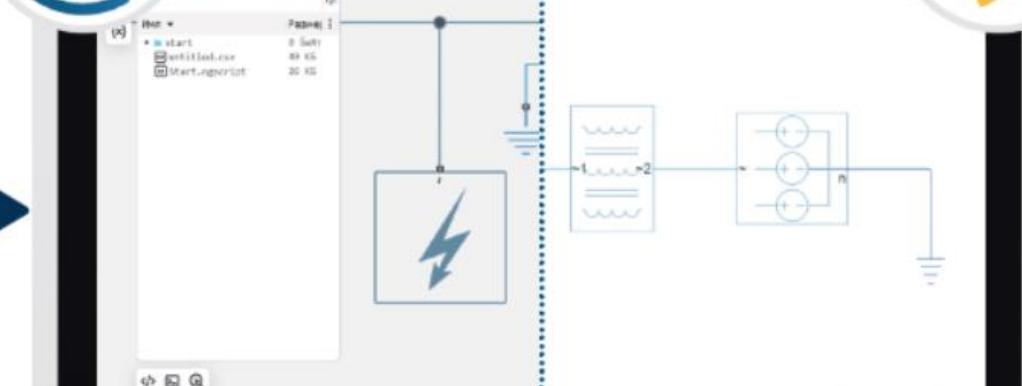


ПЛИС  
для модели силовой  
электроники (от 20 нс)

Российская среда  
моделирования Engee



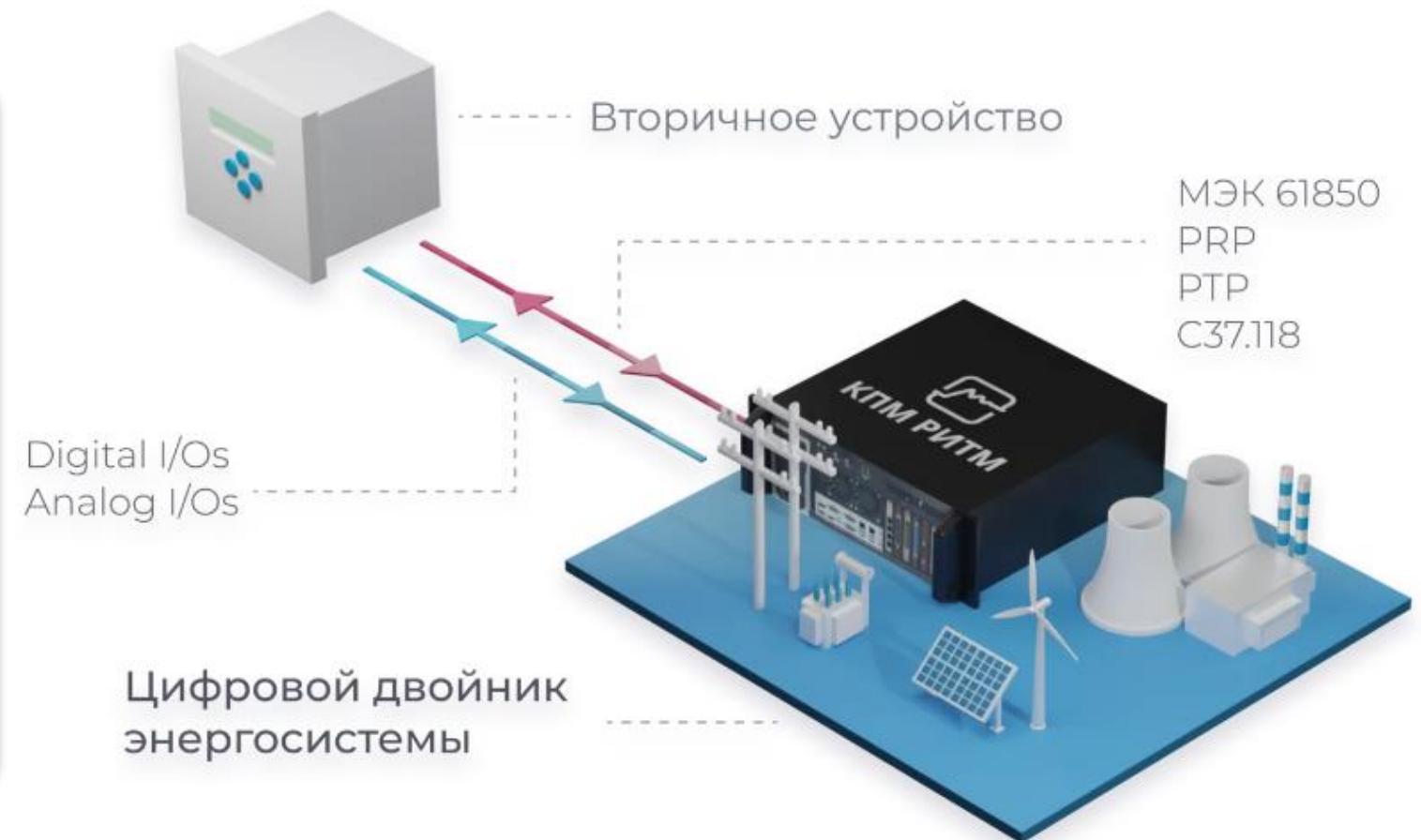
Среда моделирования  
**MATLAB/Simulink**



# Сценарии использования КПМ РИТМ

## Тестирование вторичных устройств

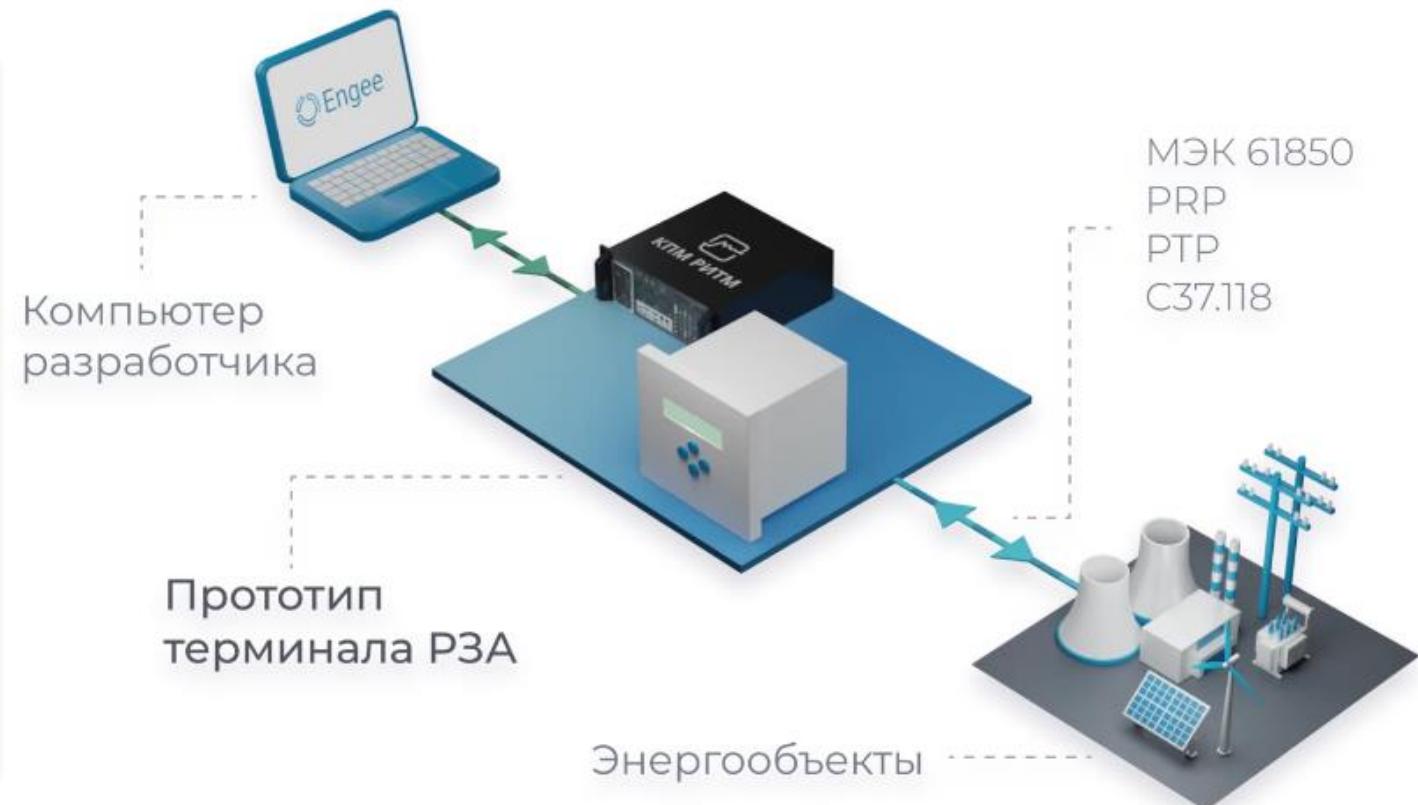
Предварительное испытание и отладка разрабатываемого устройства, подготовка устройства к сертификации. Полунатурные испытания вторичного устройства, например, терминала РЗА, на цифровой модели энергосистемы в режиме жесткого реального времени. В рамках сценария можно подключить терминал по различным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



# Сценарии использования КПМ РИТМ

## Быстрое прототипирование

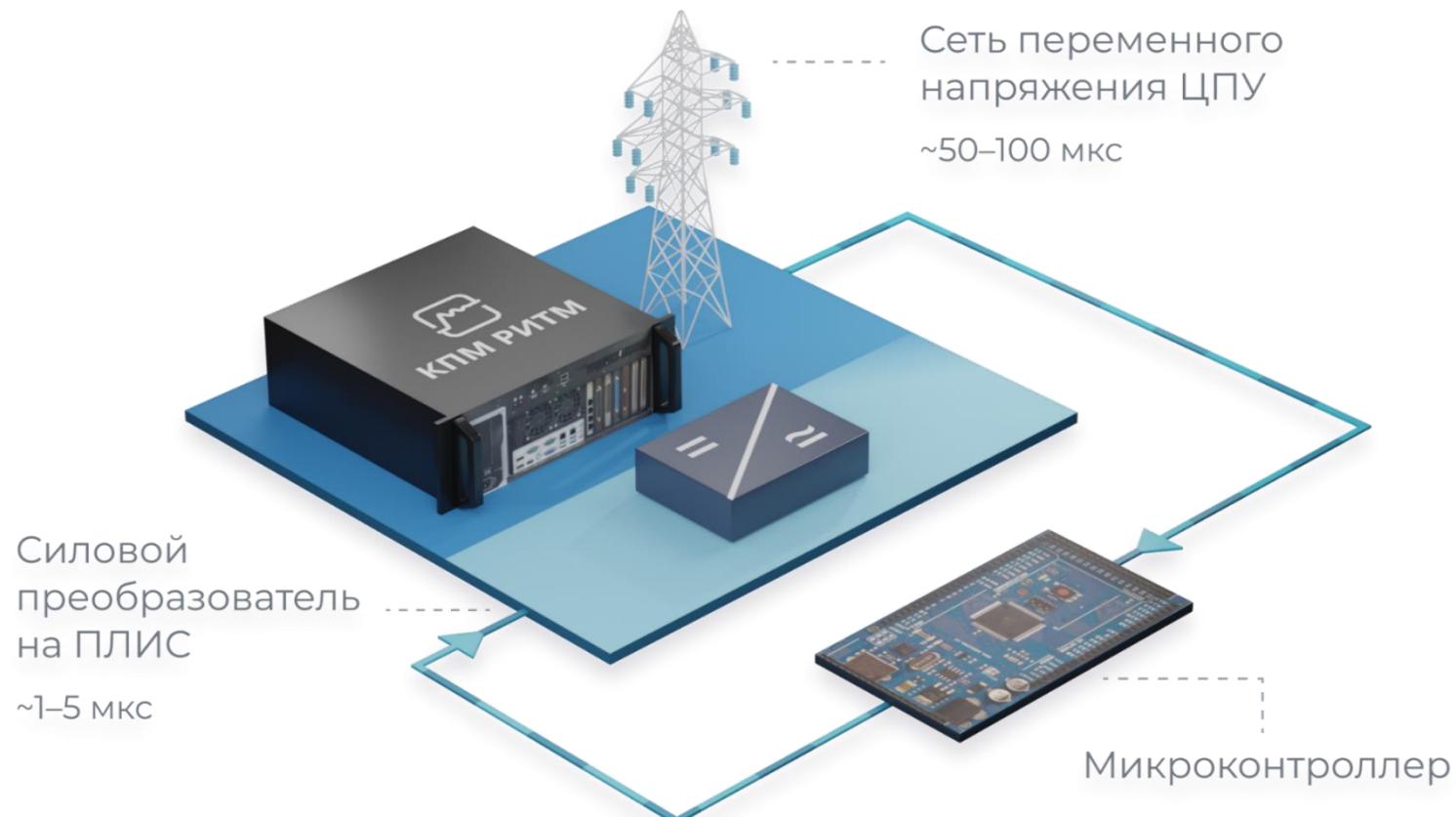
Реализация алгоритма с определенной частотой расчета для быстрого прототипирования. КПМ РИТМ с алгоритмом работы терминала РЗА подключается к испытываемой системе вместо реального терминала, который на данный момент еще не произведен. Таким образом можно убедиться, что выбранный алгоритм работает корректно.



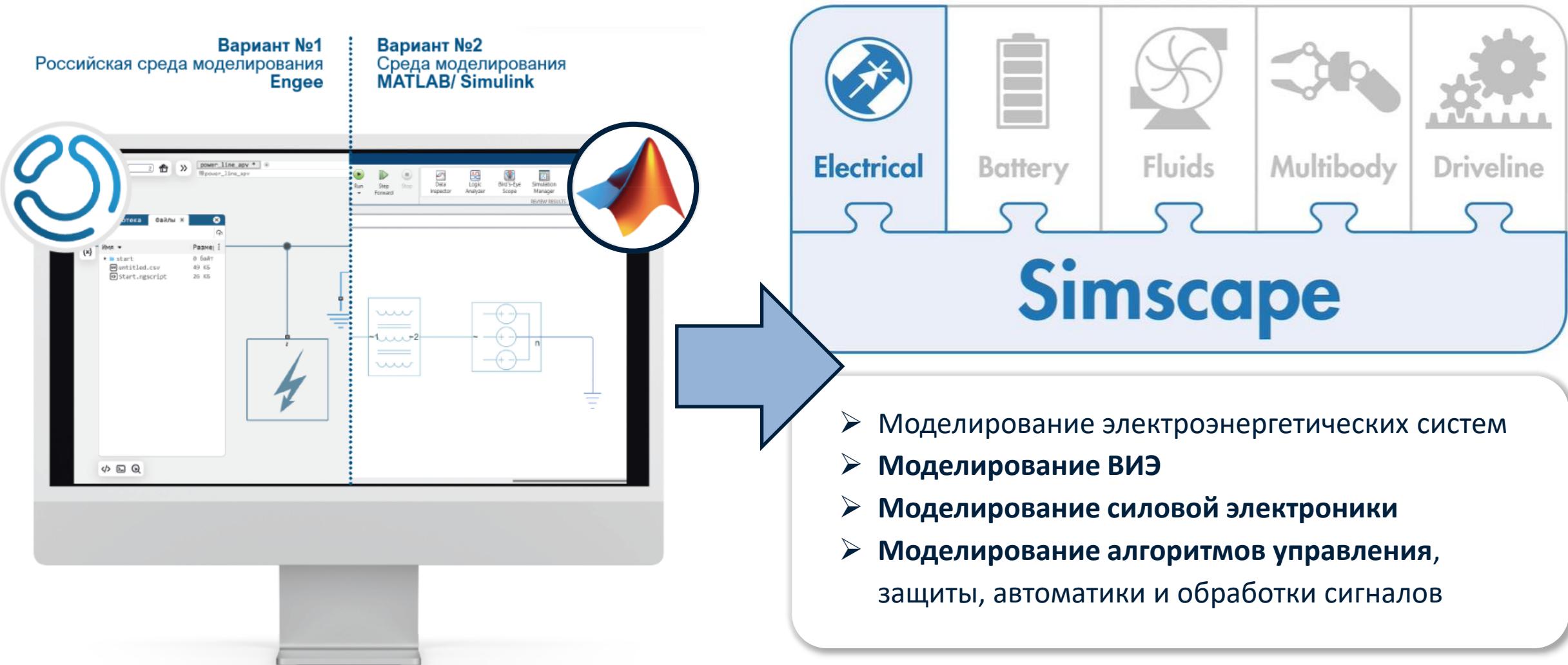
# Сценарии использования КПМ РИТМ

## 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

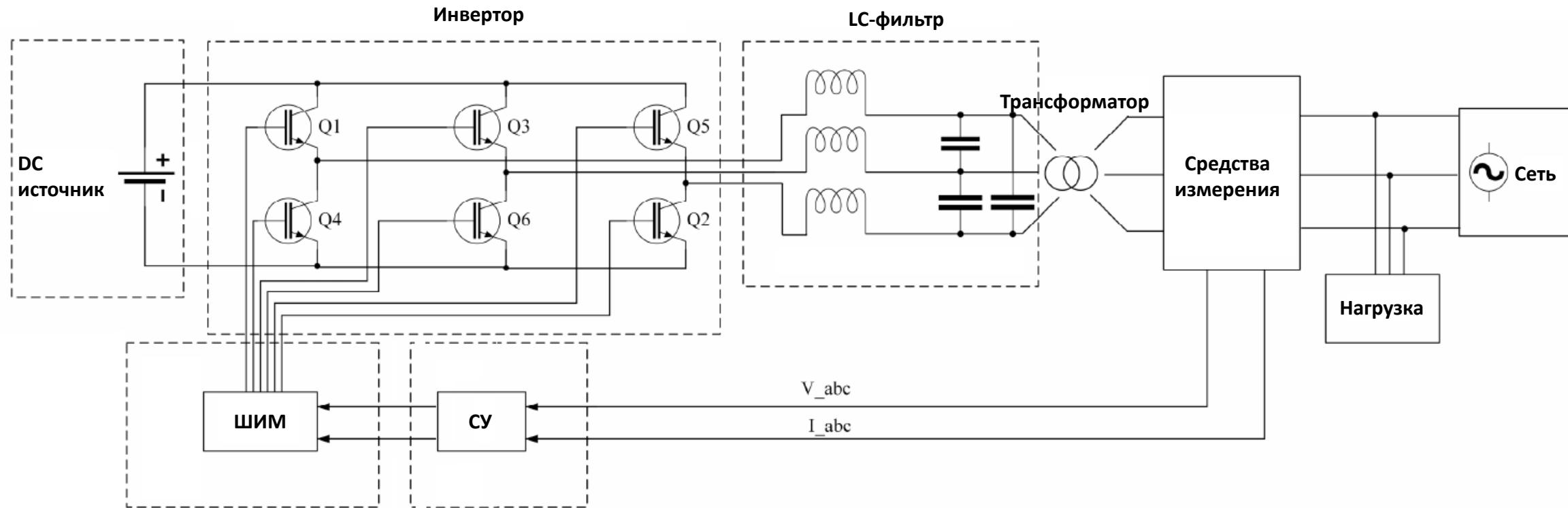


# Моделирование элементов силовой электроники

## Пример №1:

Сетевой инвертор подключенный  
через трансформатор к внешней сети.

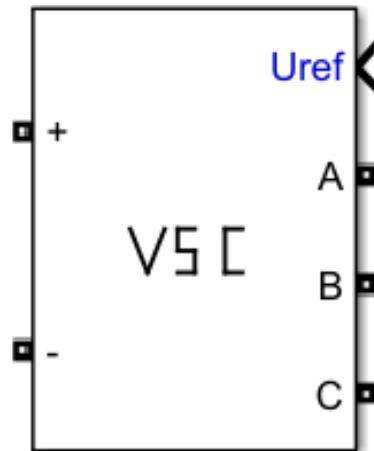
В MATLAB/Simulink соберем небольшую систему с сетевым  
инвертором (grid-tie), с сопутствующими фильтрами и  
системой векторного управления.



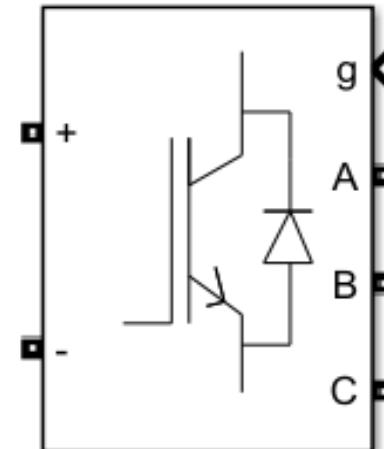
# Методы моделирования преобразовательной техники

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

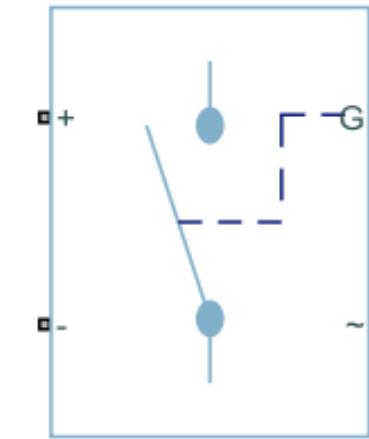
**Усредненная**  
модель силового  
преобразователя



Модель силового  
преобразователя  
**Specialized Power  
Systems**



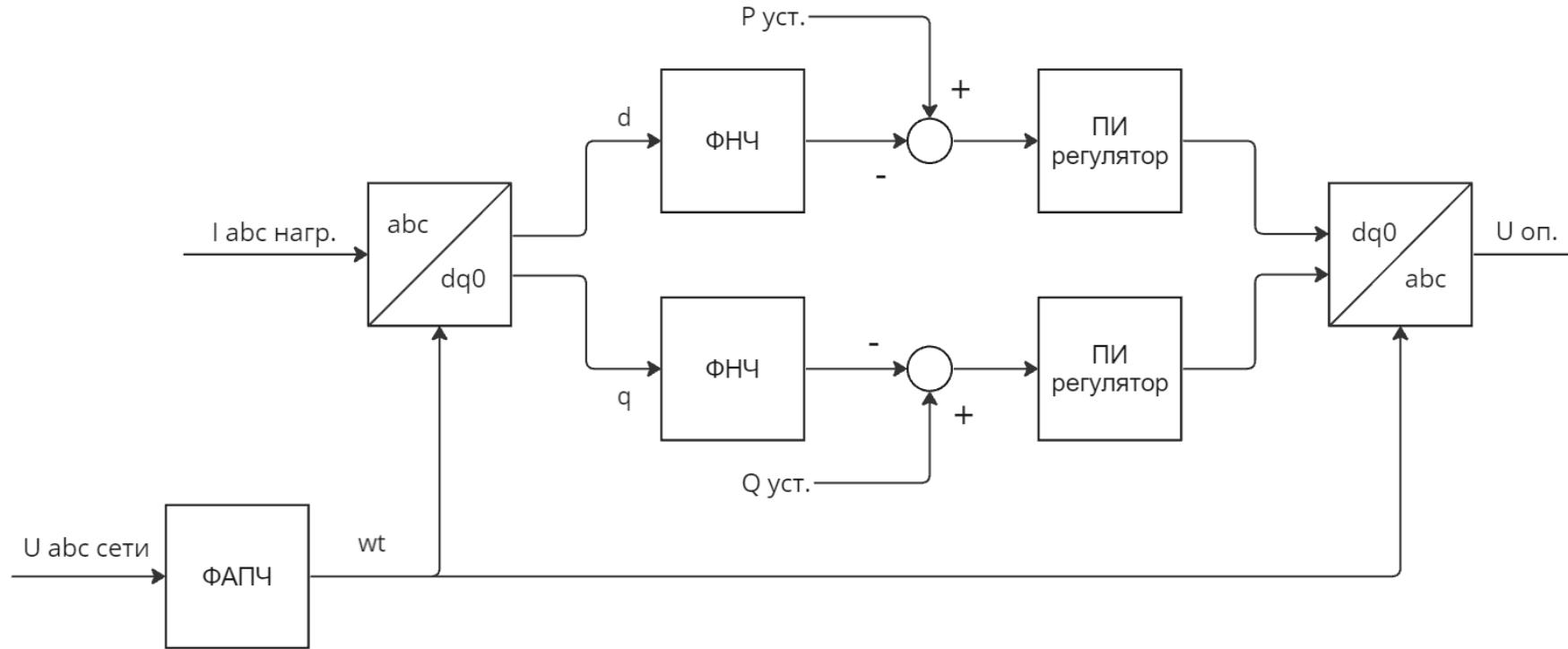
Модель силового  
преобразователя  
**Simscape Electrical**



# Моделирование элементов силовой электроники

Структурная схема простейшей системы управления

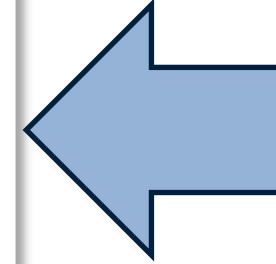
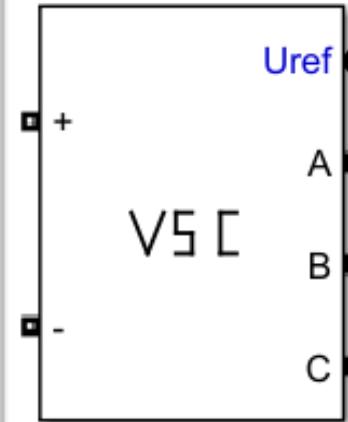
С помощью библиотеки блоков математического моделирования MATLAB/Simulink соберем dq-систему управления выдаваемой мощности сетевого инвертора.



# Моделирование элементов силовой электроники

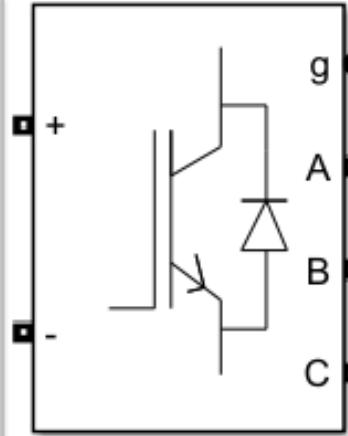
Усредненная модель

Требует только опорного напряжения на управляющий вход.

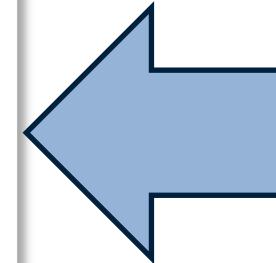


Полная модель

Требует ШИМ-сигнала для переключения элементов.



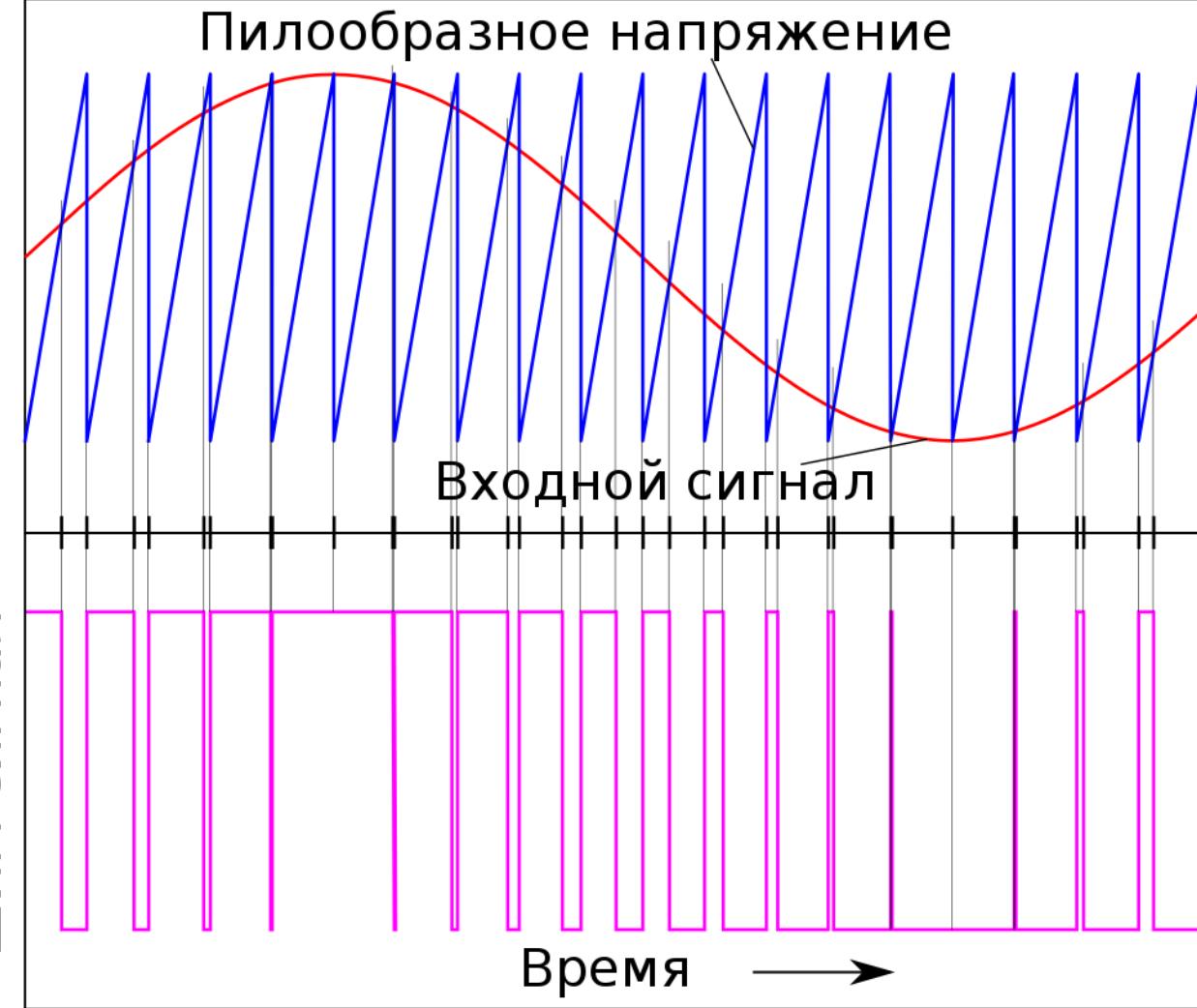
ШИМ-сигнал



Пилообразное напряжение

Входной сигнал

Время

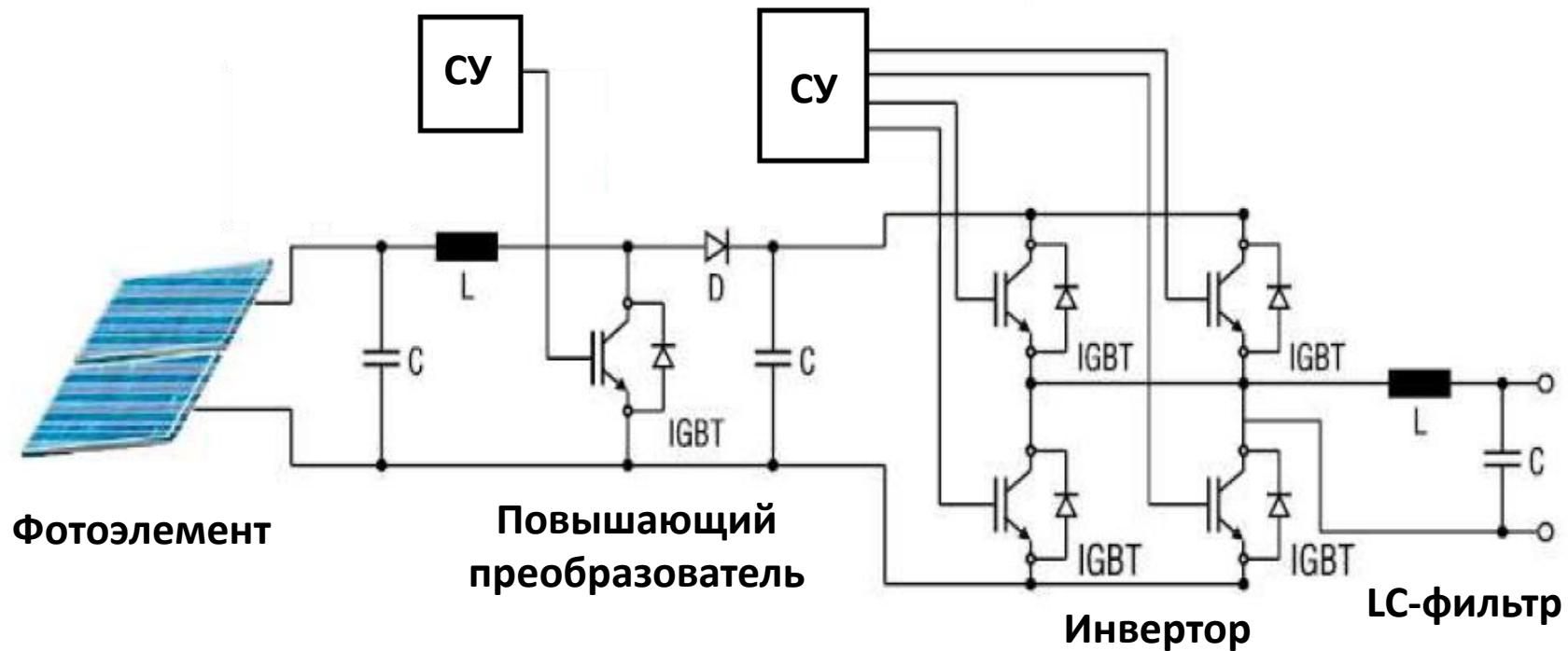


# Моделирование элементов силовой электроники

## Пример №2:

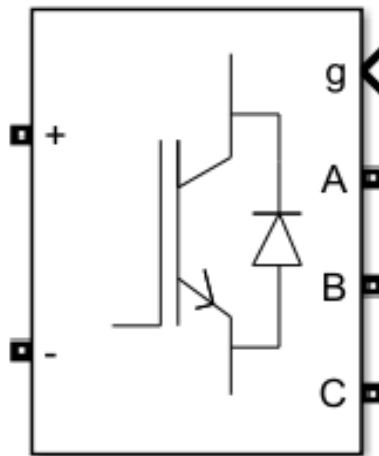
Схема солнечного инвертора с MPPT-контроллером.

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



# Полная модель

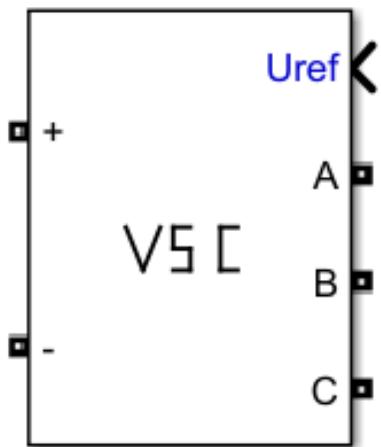
## Полная модель силового преобразователя



- 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 выше 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**



**HIL-тестирование**



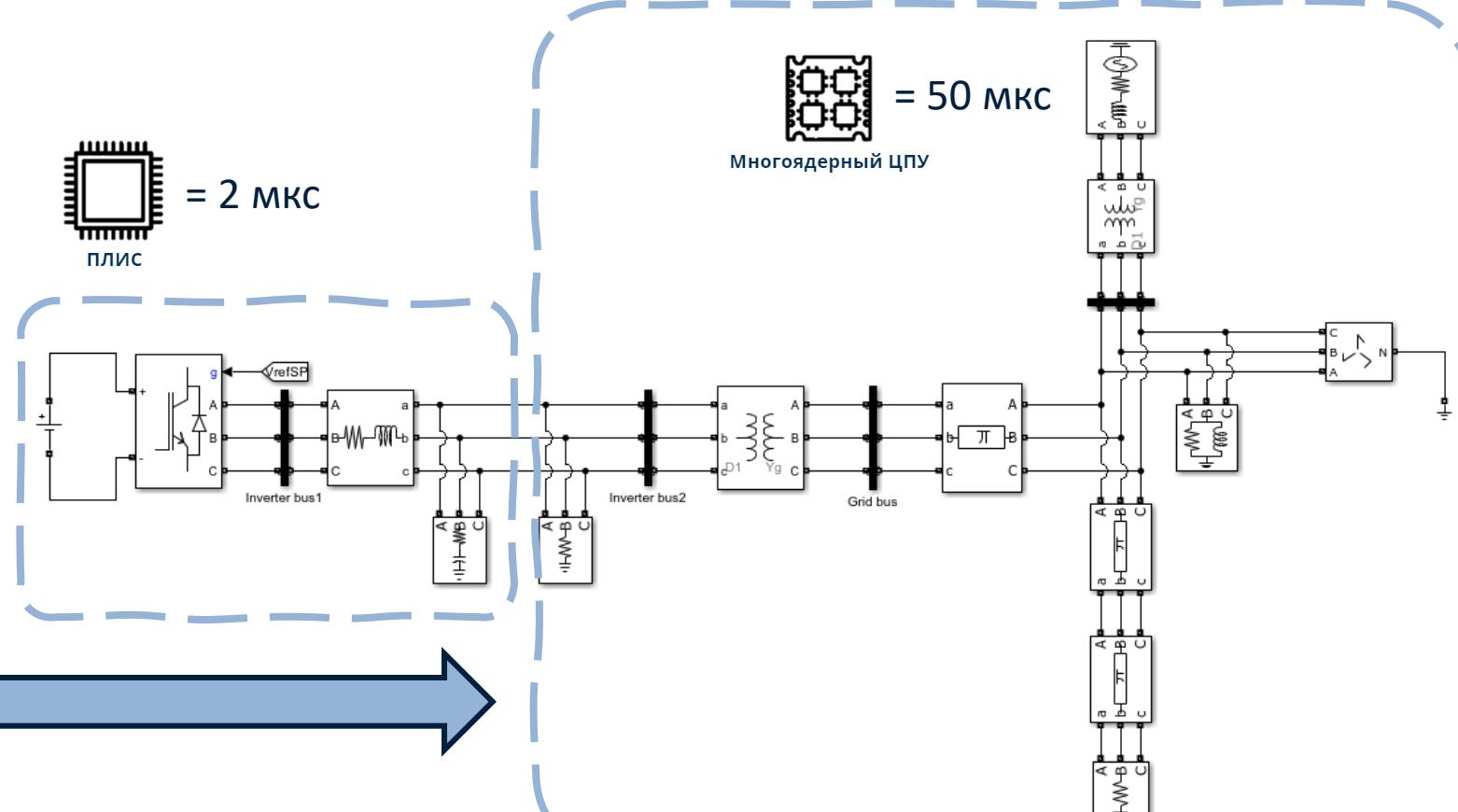
# Демонстрационный пример

## Модель сети с элементами силовой электроники

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

сетевым инвертором

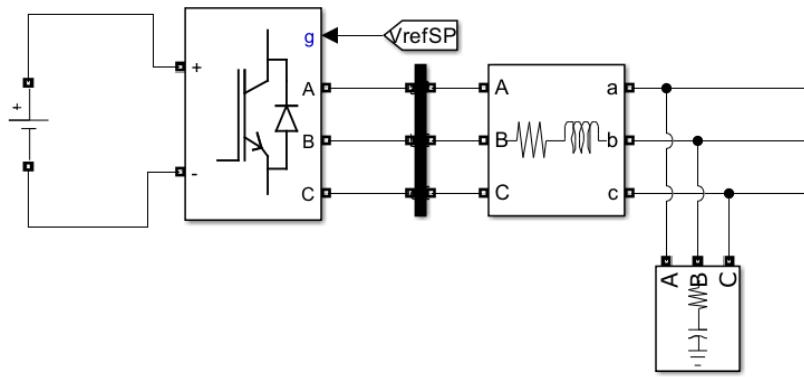
электроэнергетической  
сетью



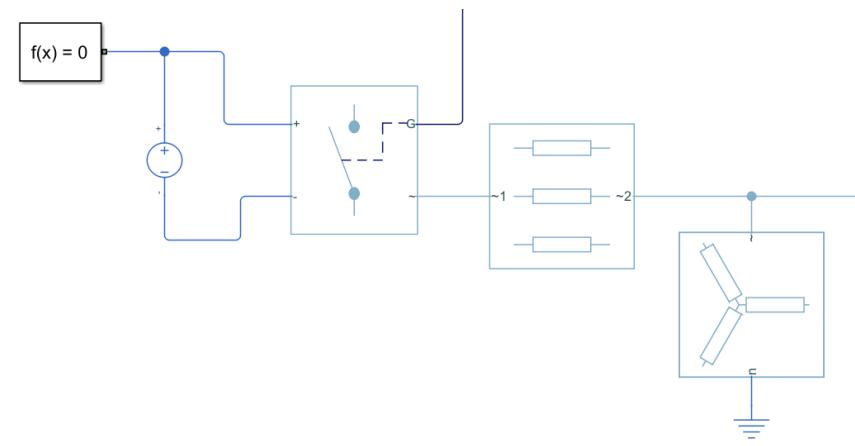
# Запуск на ПЛИС

## 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



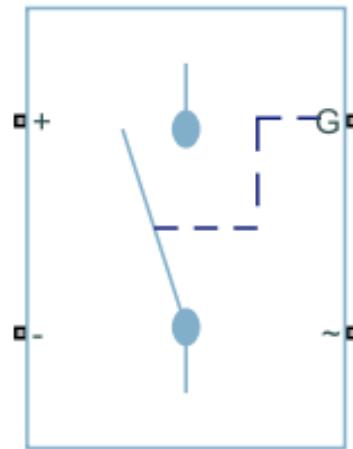
Модель в Specialized Power Systems



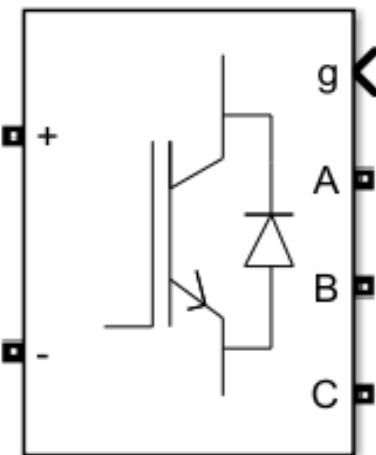
Модель в Simscape Electrical

# Запуск на ПЛИС

Модель силового  
преобразователя  
**Simscape Electrical**

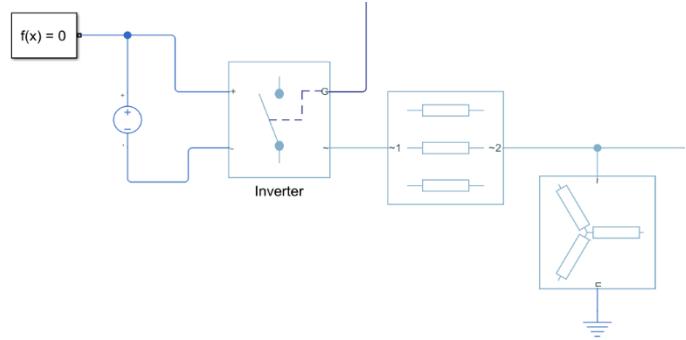


Полная модель  
силового  
преобразователя



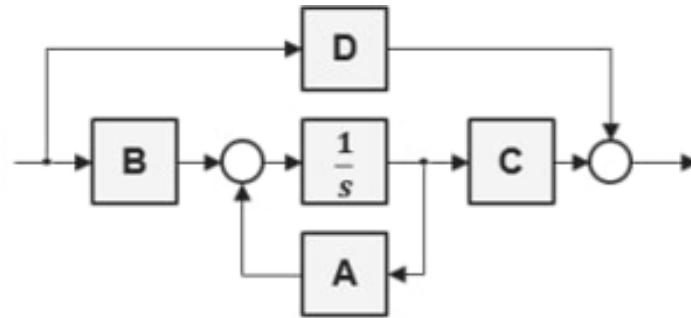
По функционалу  
модели похожи,  
однако **Simscape  
Electrical** имеет  
возможность  
генерации HDL-кода

# Запуск на ПЛИС



## Модель Simscape

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



## Модель в пространстве состояний

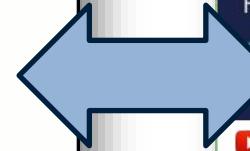
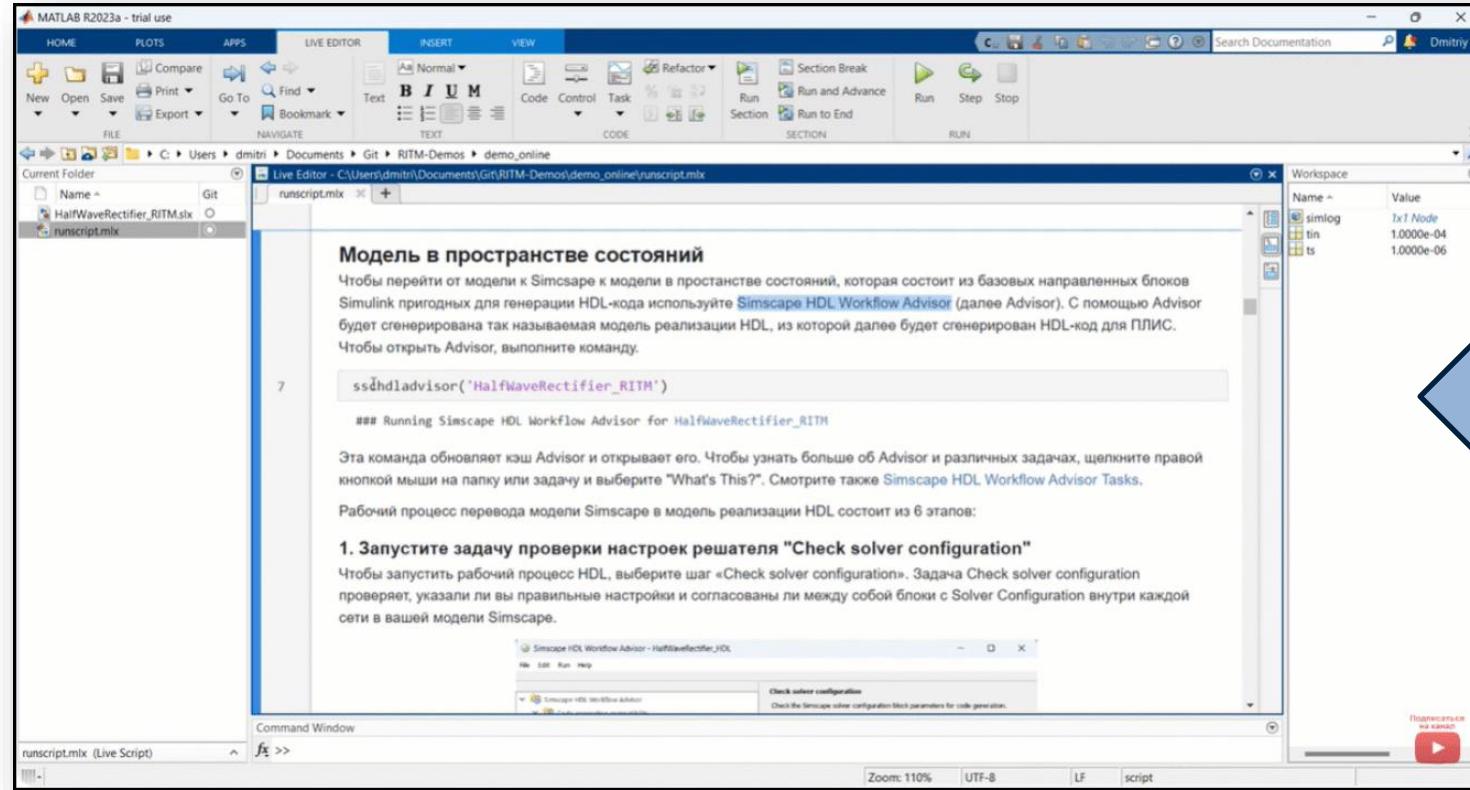
Математическое представление системы в виде набора входов и выходов и переменных состояния



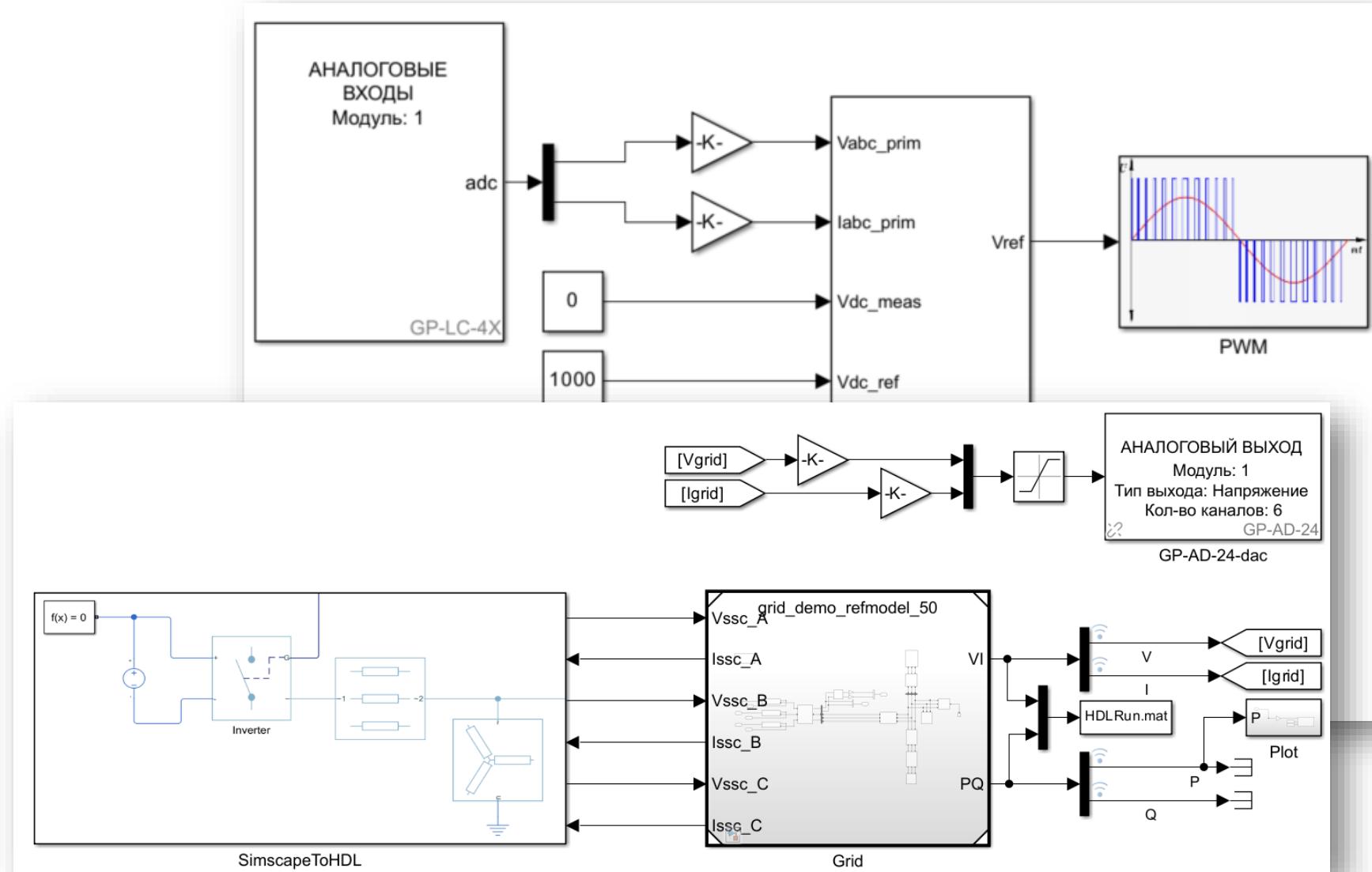
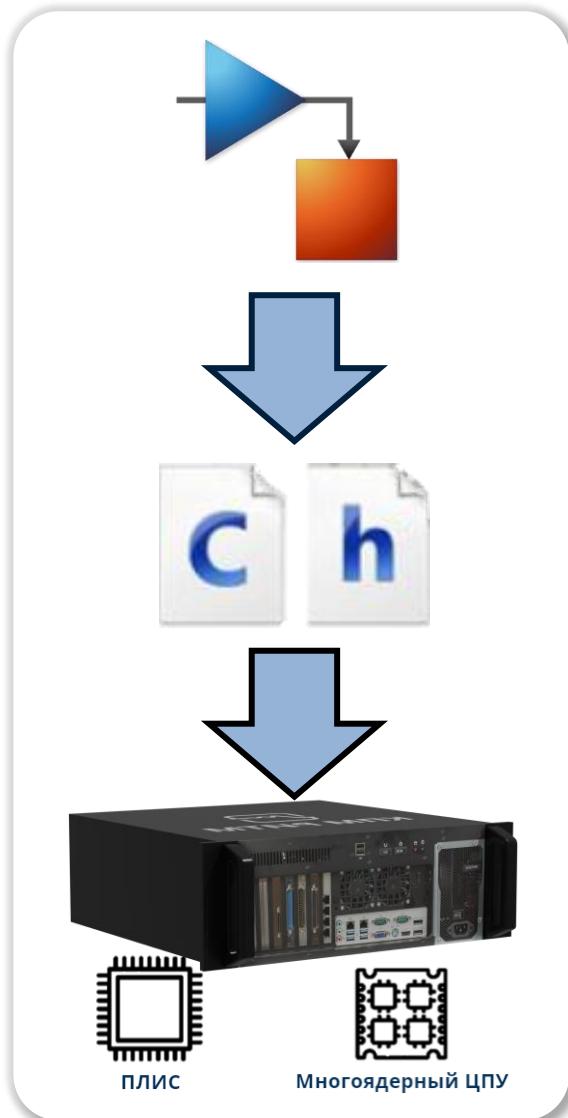
## Генерация HDL-кода

Проверка модели на совместимость и автоматическое исправление настроек

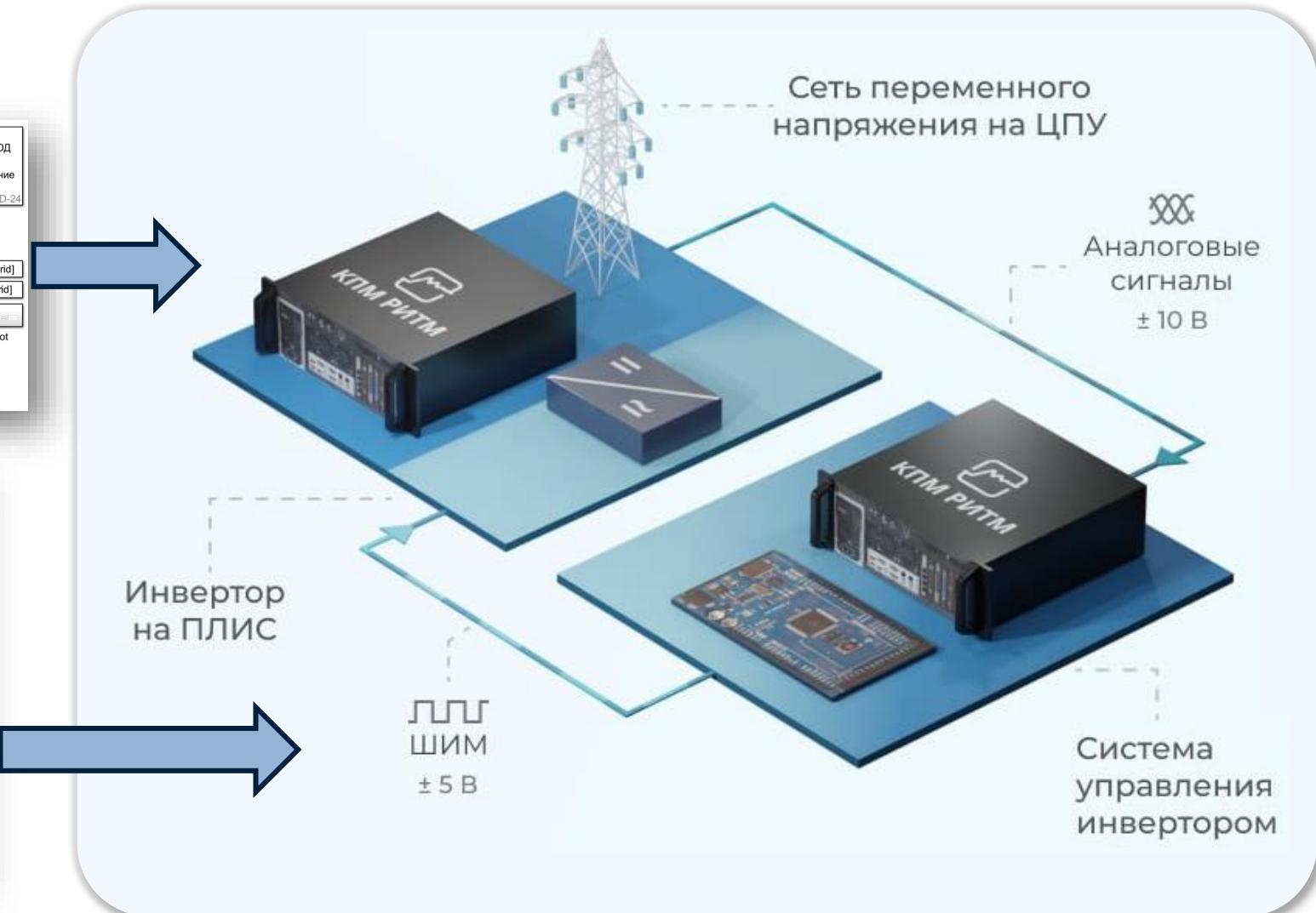
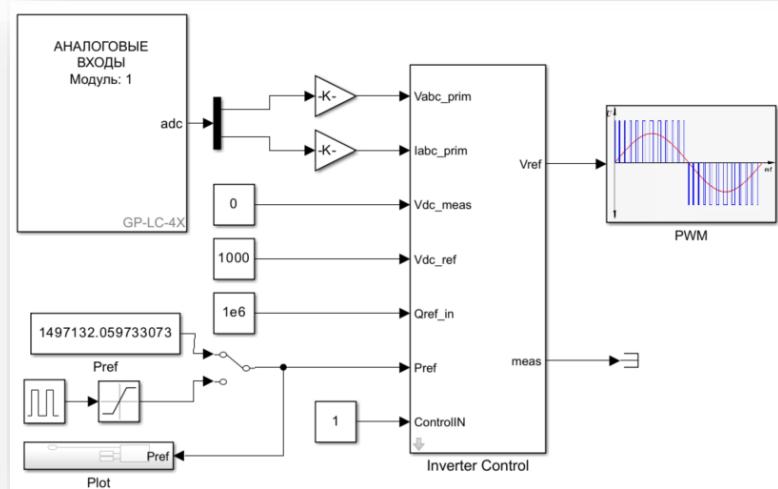
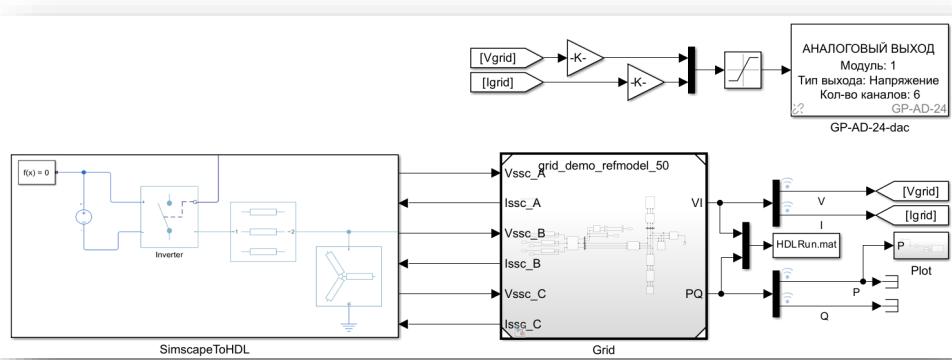
# Создание модели пространства состояний и генерация кода



# Одновременный запуск на ПЛИС и ЦПУ



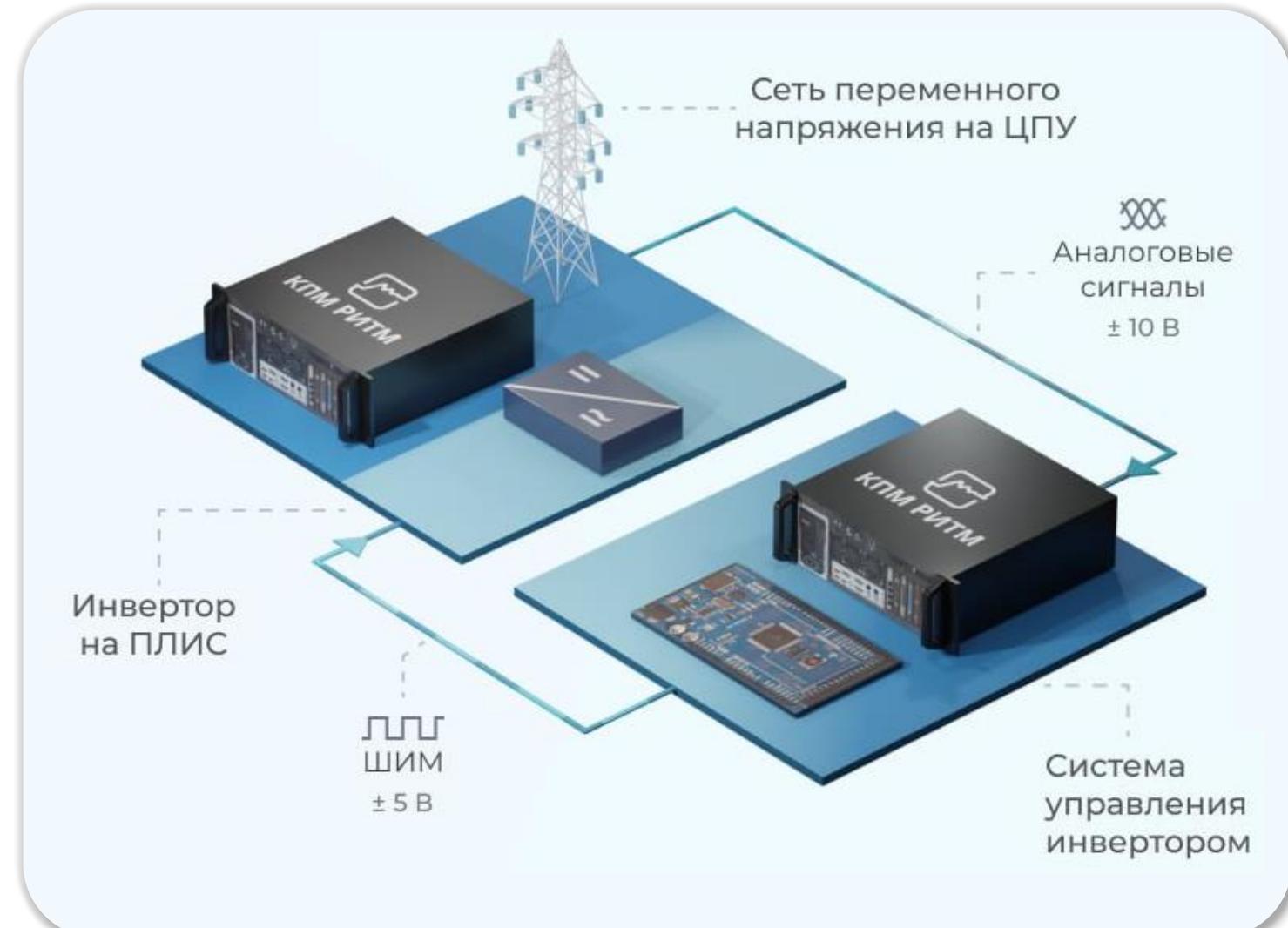
# Сценарий использования КПМ РИТМ



# 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 быстродействующих 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](mailto:tech@exponenta.ru)  
[exponenta.ru](http://exponenta.ru)



**ЭКСПОНЕНТА**  
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ



**Спасибо за внимание!**

Задавайте Ваши вопросы