

## **ЦИКЛ СЕМИНАРОВ «ВЫСШЕЕ ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В НГТУ: ВЫЗОВЫ, ПРОБЛЕМЫ, НАПРАВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ»**

**Тематика семинара: «Информационные технологии и основы программирования при реализации инженерных образовательных программ»**

**Тема доклада: «Цифровые двойники в обучении студентов и переподготовке специалистов»**

**Спикер: Петрищев Алексей Васильевич, к.т.н., доцент АЭЭС ФЭН НГТУ**

## **Основные положения доклада:**

- 1) Переход электроэнергетики РФ на новый технологический уклад**
- 2) Новые (интеллектуальные) технологии управления энергообъектами**
- 3) Примеры действующих и проектируемых энергообъектов**
- 4) Электродинамические и цифровые двойники**
- 5) Технологические и цифровые модели двойника**
- 6) Информационные технологии и основы программирования цифровых двойников при реализации образовательных программ ФЭН НГТУ**

# 1) Переход электроэнергетики РФ на новый технологический уклад



## 2) Новые (интеллектуальные) технологии управления энергообъектами

«Стратегическим направлением развития системы управления является существенное повышение степени автоматизации контроля и управления (в качестве «асимптотической» цели рассматривается полная автоматизация управления режимами энергосистем) с увеличением степени адаптивности автоматического управления и соответствующим развитием алгоритмов и технических средств управления.»

[Концепция ИЭЭС с ААС, Версия 5.0]

## Возможные направления применения интеллектуального управления в ЭЭС

- Микросеть GRID
- Диагностика неисправностей и уведомление в реальном времени

### • Автоматическая реконфигурация сети при КЗ

- Локализация неисправности оборудования в энергосистеме
- Управление спросом
- Экономические механизмы управления спросом

### • Распределенная когенерация с использованием сетевых технологий

- Прогноз вероятности аварий на основе технологий искусственного интеллекта и баз знаний
- Мониторинг состояния энергосистемы по его предистории из базы знаний в реальном времени
- Мониторинг запаса статической устойчивости в реальном времени
- Ситуационное ассоциативное управление режимом с использованием предистории состояния энергосистемы
- Интеллектуальные системы управления спросом на основе MAC технологий
- Распределенные технологии моделирования, оптимизации и управления на основе вычислительных GRID-сетей

### • «Самовосстановление» автоматизированного энергетического комплекса

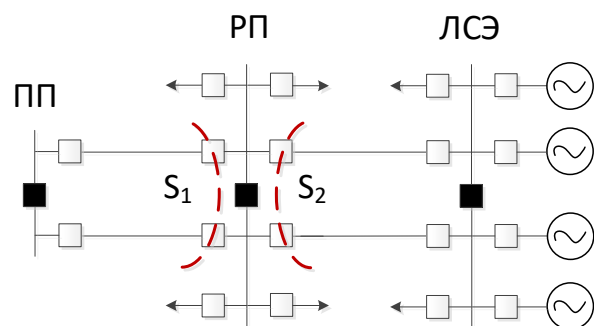
- Интеллектуальные методы защиты от киберугроз и техногенных аварий

### • Интеллектуальные системы управления ТЭК города

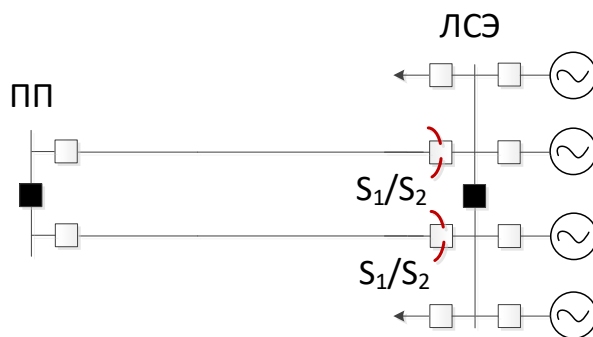
## 2) Новые (интеллектуальные) технологии управления энергообъектами

Технология интеллектуального управления режимами самобалансирующихся локальных интеллектуальных энергосистем на основе синхронной малой генерации (Минигрид), интегрированных в существующие электрические сети централизованного энергоснабжения, разработанная в НГТУ.

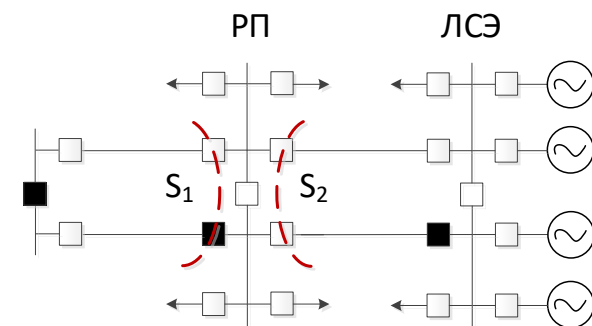
## Обобщённый объект Минигрид



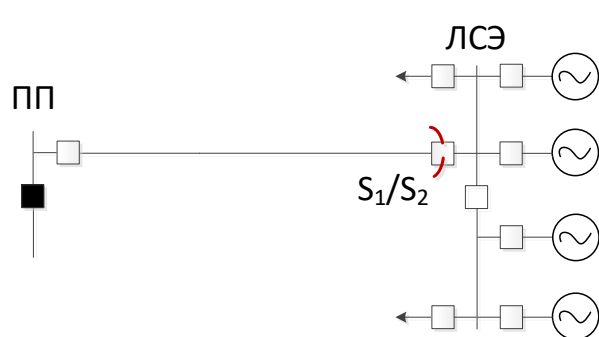
а)



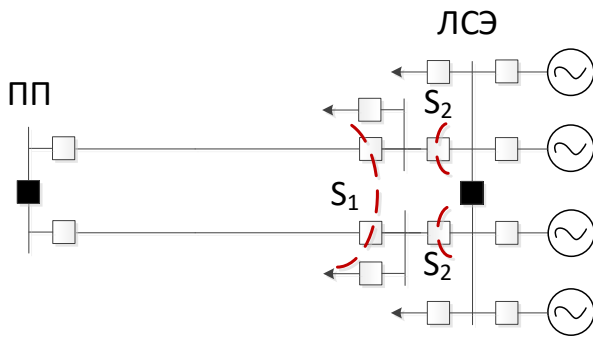
б)



в)



г)



д)

**Синхронная электрогенерация**

**Когенерация (электроэнергия и тепло)**

**Газопоршневые установки (ГПУ) или газотурбинные установки (ГТУ)**

**Установленная мощность генераторов  $\sim (10 - 50)$  МВт**

## Необходимость технологии интеллектуального управления режимами Минигрид

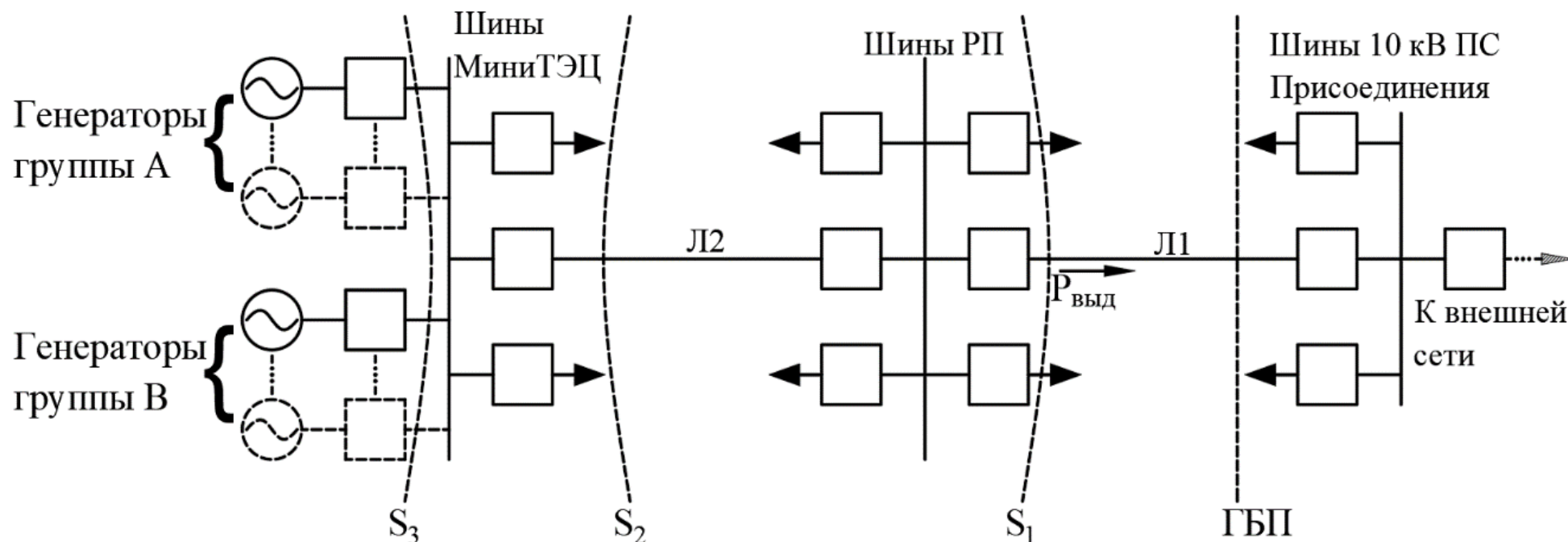
### Изолированный режим Минигрид:

Надёжность	1. Частые отключения энергоблоков автоматикой при сбросах или набросах нагрузки, в режимах минимальной нагрузки. 2. Погашение нагрузки на время восстановления.
Экономичность	1. Низкий КИУМ генерации ввиду высокой неравномерности суточного профиля нагрузки, 2. Повышенный расход газа и ресурса ГПУ ввиду непрерывного регулирования частоты.
Качество	Нестабильность частоты
Экологичность	Повышенный расход газа при непрерывном поддержании баланса активной мощности путем регулирования частоты

Интеграция Минигрид с внешней энергосистемой преследует цели получения положительных системных эффектов по надежности энергоснабжения, качеству электрической энергии, экономичности и экологичности работы электростанции Минигрид, а также создания положительных системных эффектов для внешней сети.



## Основная идея технологии интеллектуального управления режимами Минигрид



Минигрид предполагает параллельную работу с внешней сетью в одном из трех режимов:

1. Избыточный – с выдачей значимой мощности во внешнюю сеть ( $P_{\text{выд}} = P_{\text{зад}}$ );
2. Сбалансированный – без выдачи значимой мощности во внешнюю сеть ( $P_{\text{выд}} = 0$ );
3. Дефицитный – с потреблением значимой мощности из внешней сети ( $P_{\text{выд}} = -P_{\text{зад}}$ ).

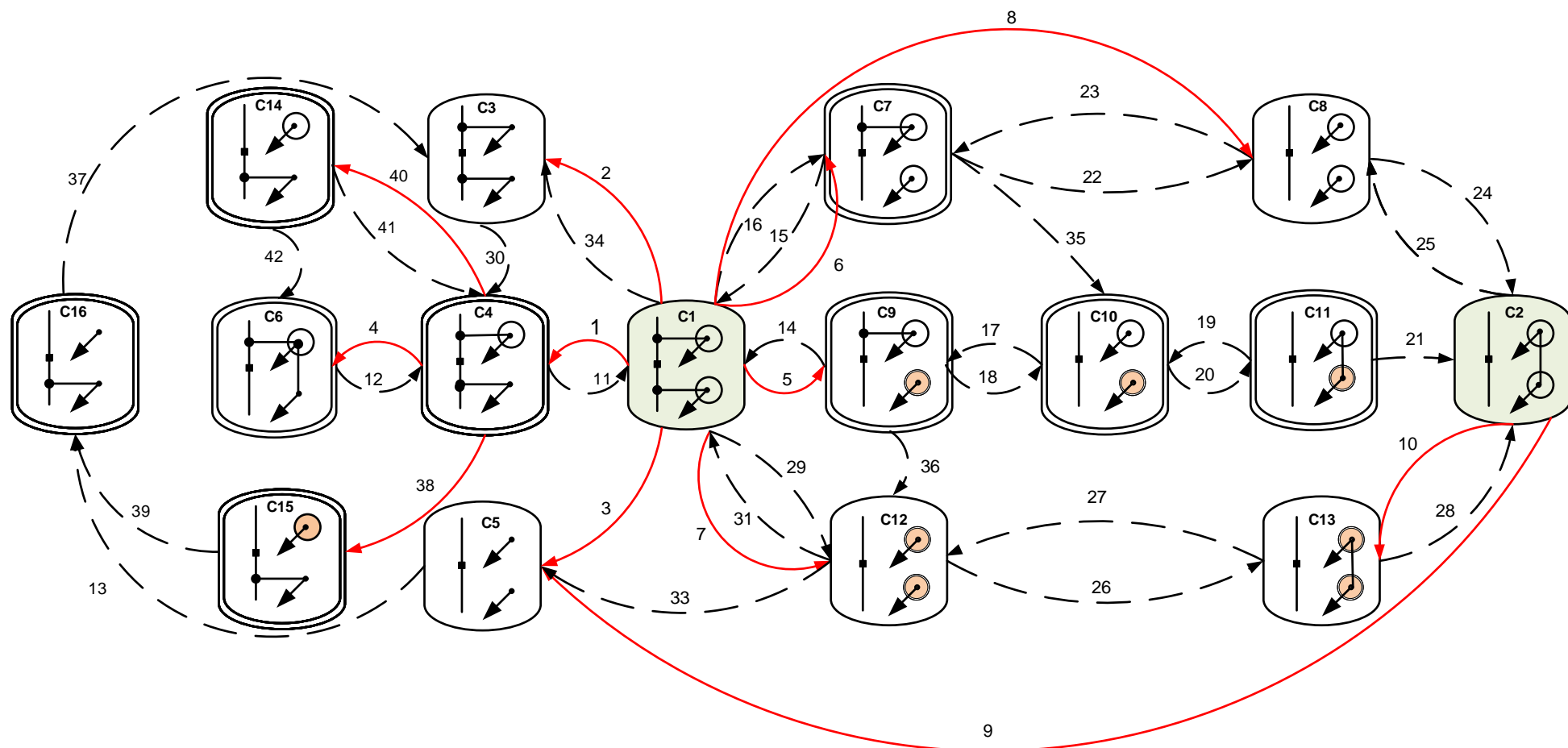
Энергоблоки Минигрид в зависимости от общего баланса активной мощности динамически делятся на две группы:

1. Группа А или «Балансирующие энергоблоки» – состоит из минимального числа энергоблоков, достаточного для поддержания баланса мощности собственной нагрузки в текущем режиме.
2. Группа В или «Свободные энергоблоки» – состоит из энергоблоков с избыточной для покрытия собственной нагрузки мощностью, что позволяет направлять их мощность во внешнюю электрическую сеть.

## Специальные способы управления режимами Минигрид

- Экстренное противоаварийное сбалансированное отделение Минигрид от внешней сети при угрозах нарушения устойчивости параллельной работы или возникновения опасных ударных моментов на валах генераторов электростанции.
- Поддержание постоянной готовности к спорадическому противоаварийному сбалансированному отделению Минигрид от внешней электрической сети путем совместного выбора состава работающего генерирующего оборудования и сечения для отделения.
- Создание наиболее благоприятных режимов для генерирующего оборудования электростанции Минигрид по экономичности и использованию эксплуатационного ресурса.
- Автоматическое восстановление нормального режима параллельной работы Минигрид с внешней сетью при возникновении соответствующих ему условий.
- Специализированное автоматическое регулирование частоты и обменной мощности.

# (Автооператорная) сеть переходов между классами состояния Минигрид



## Технология интеллектуального управления режимами Минигрид (патенты)

1. Патент RU 2662728 C2. Способ противоаварийного управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях: заявл. 06.12.2016; опубл. 30.07.2018. Фишов А.Г., Мукатов Б.Б., Марченко А.И.; заявитель Фишов А.Г.; патентообладатель Новосибирский государственный технический университет.
2. Патент RU 2697510 C1. Способ управления составом и загрузкой генераторов электростанции с собственными нагрузками, работающей изолированно и параллельно с приемной энергосистемой: заявл. 10.04.2018; опубл. 15.08.2019. Фишов А.Г., Семендяев Р.Ю., Ивкин Е.С.
3. Патент RU 2686079 C1. Способ синхронизации частей электрической сети: заявл. 30.11.2017; опубл. 24.04.2019. Фишов А.Г., Армеев Д.В., Сердюков О.В.
4. Патент RU 2752248 C1. Способ управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях: заявл. 07.12.2020; опубл. 23.07.2021. Фишов А.Г., Какоша Ю.В.
5. Патент RU 2752693 C1. Способ удаленной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами: заявл. 28.09.2020; опубл. 30.07.2021. Фишов А. Г., Гуломзода А. Х.

### 3) Примеры действующих и проектируемых энергообъектов (Минигрид)

Действующий Минигрид жилмассива «Берёзовый» г. Новосибирск:

1. Пять газопоршневых установок (ГПУ) Caterpillar по 2 МВт.
2. Две резервных дизель-генераторных установки (ДГУ) по 1,6 МВт.
3. Суммарная мощность теплогенерации за счет когенерации тепла и газовых котлов ~ 50 МВт.

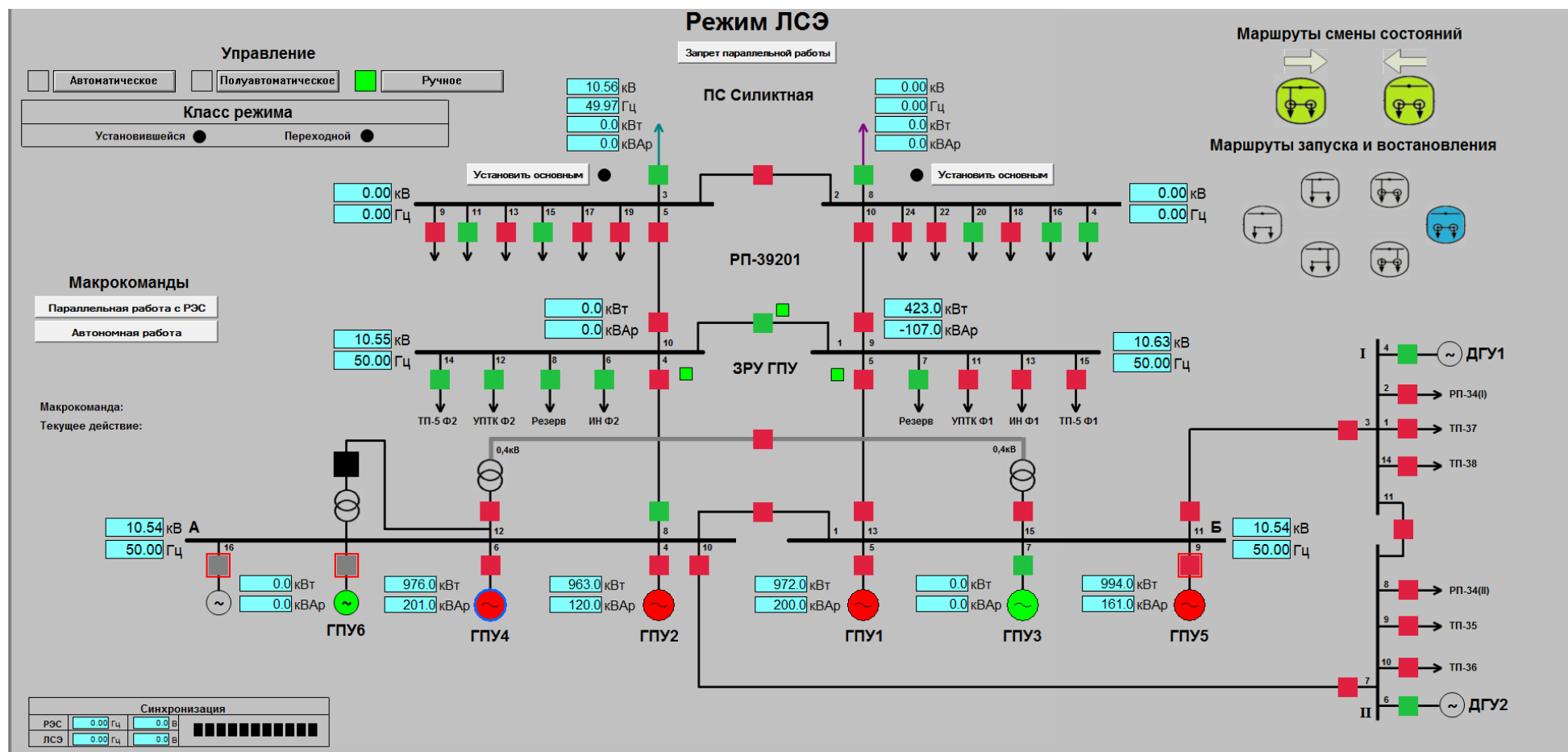


Этап	Длительность	Наименование	Содержание
1	2015 – 2019	Островной режим	Создание системы энергоснабжения жилмассива. Минигрид полностью изолирована от внешней сети.
2	2019 – 2021	Островной режим с резервированием от внешней сети	Подключение Минигрид к внешней сети. Параллельная работа генераторов Минигрид с внешней сетью запрещена.
3	2021 – н.в.	Режим параллельной работы с правом выдачи мощности	Параллельная работа генераторов Минигрид с внешней сетью и обмен мощностью разрешены.

# Минигрид «Берёзовое». АРМ диспетчера Минигрид (ЛСЭ) ПТК «Smart Торнадо»

## Возможность автооператорного управления

## Видеокадр «Режим ЛСЭ»





## Проектируемый энергообъект (Минигрид)

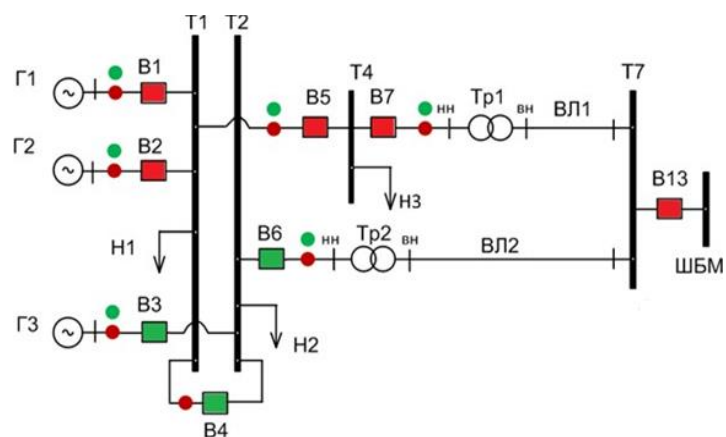
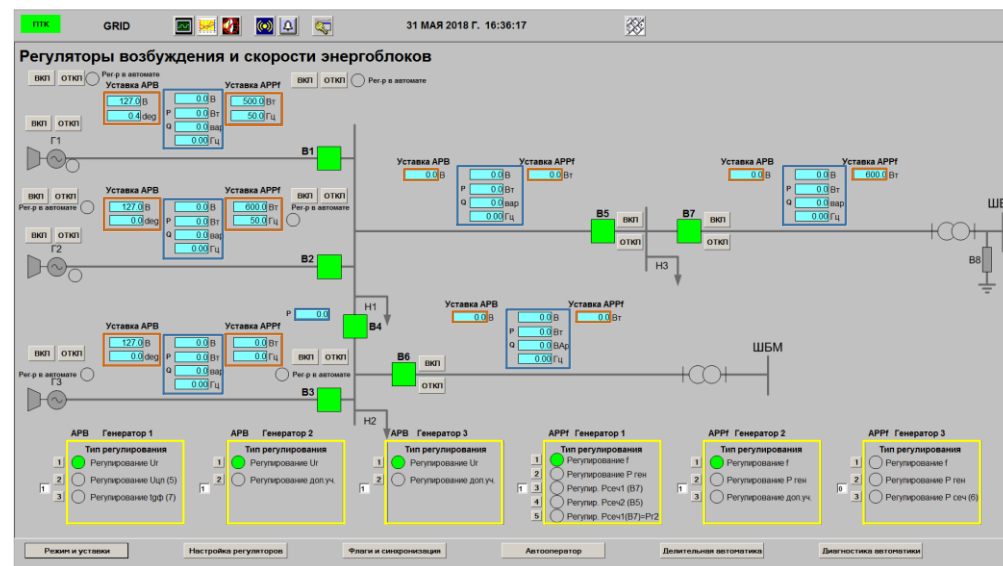
Минигрид строящегося жилмассива «Радуга Сибири»

Установленная мощность электрогенераторов 24 МВт



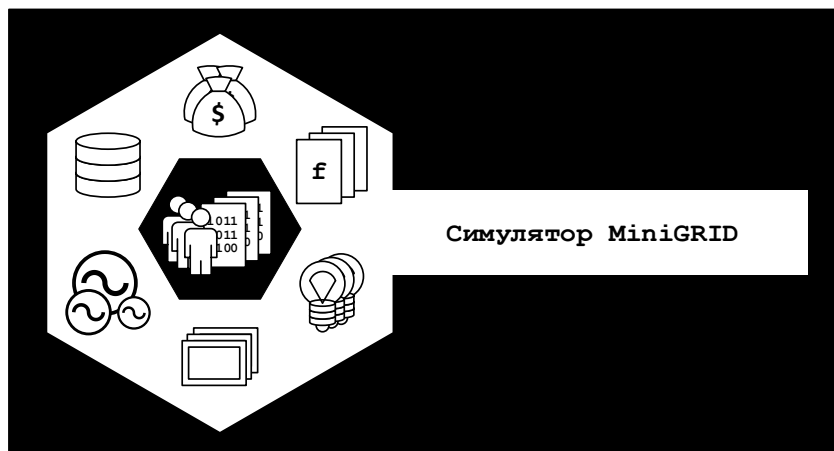
## 4) Электродинамические и цифровые двойники

### Электродинамическая модель Минигрид НГТУ с ПТК «Smart Торнадо»





## Цифровой двойник Минигрид. Общий доступ, защита, коммерциализация



Симулятор размещен на терминальном сервере Math.

Файл подключения к серверу

<https://cloud.nstu.ru/files/Cloud-Math.rdp?v6>.

Для входа на сервер укажите данные от своей единой учетной записи НГТУ.

На сервере Симулятор размещен по пути:  
C:\Program Files (x86)\v0.6.5dd.

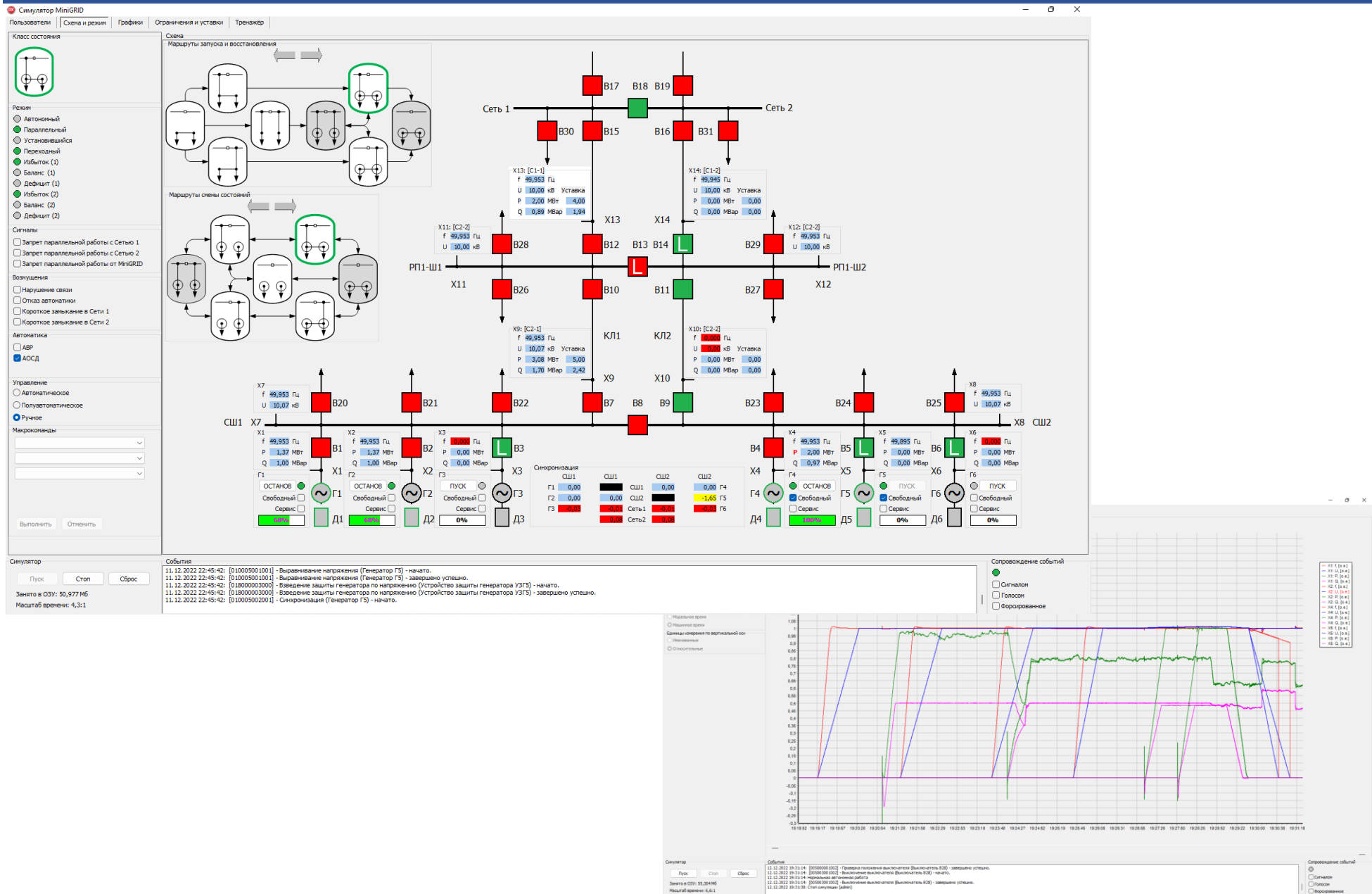
Лицензионная защита обеспечивается аппаратными и программными ключами GUARDANT (АО «АКТИВ-СОФТ»).

## Цифровой двойник Минигрид. Классы решаемых задач

### Классы решаемых задач:

- демонстрация положительных системных эффектов, возникающих при параллельной работе Минигрид с внешней сетью (надёжность, экономичность, качество энергоснабжения);
- демонстрация выполнения специальных способов управления режимами Минигрид:
  - экстренное противоаварийное сбалансированное отделение Минигрид от внешней сети при угрозах нарушения устойчивости параллельной работы или возникновения опасных ударных моментов на валах генераторов электростанции;
  - поддержание постоянной готовности к спорадическому противоаварийному отделению Минигрид от внешней электрической сети путем совместного выбора состава работающего генерирующего оборудования и сечения для деления;
  - создание наиболее благоприятных режимов для генерирующего оборудования Минигрид по экономичности и использованию эксплуатационного ресурса;
  - автоматическое восстановление нормального режима параллельной работы Минигрид с внешней сетью при возникновении соответствующих ему условий;
  - специализированное автоматическое регулирование частоты и обменной мощности.

# Цифровой двойник Минигрид (Примеры видеокадров)

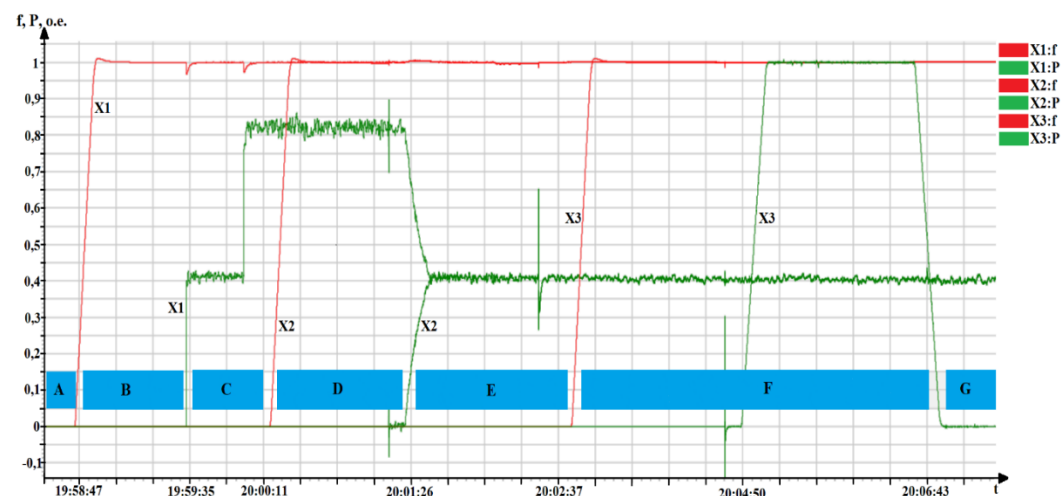
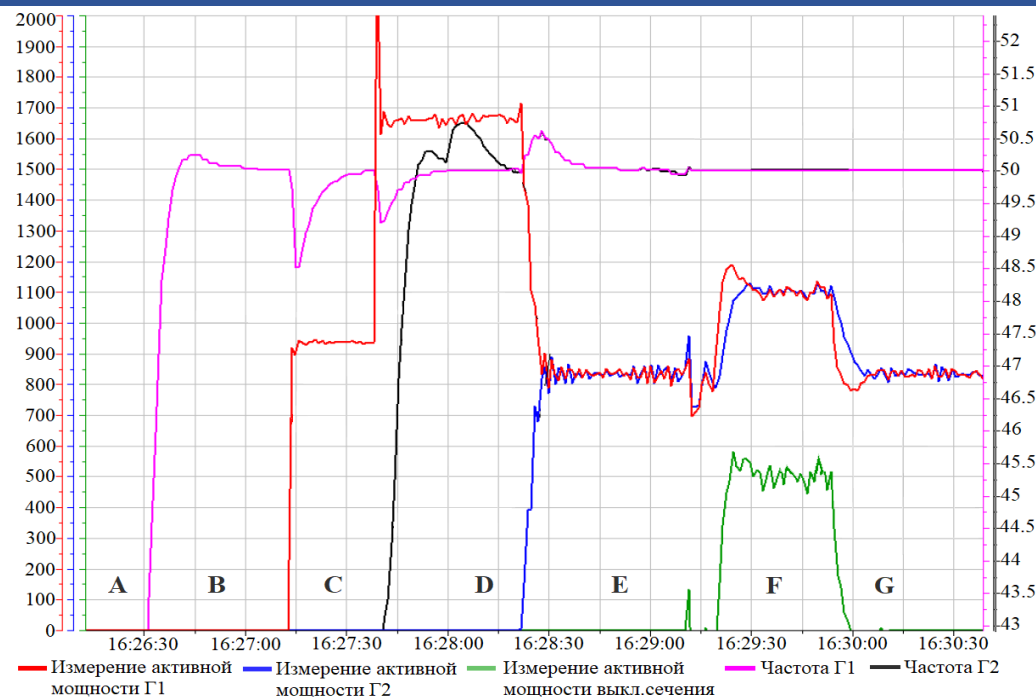


## Сопоставление цифрового двойника с электродинамической и технологической моделями

«Представленный цифровой двойник Минигрид с инновационным режимном и противоаварийном управлении позволяет во всех эксплуатационных режимах качественно и количественно с достаточной для подготовки оперативного персонала степенью достоверности моделировать поведение такой энергосистемы.

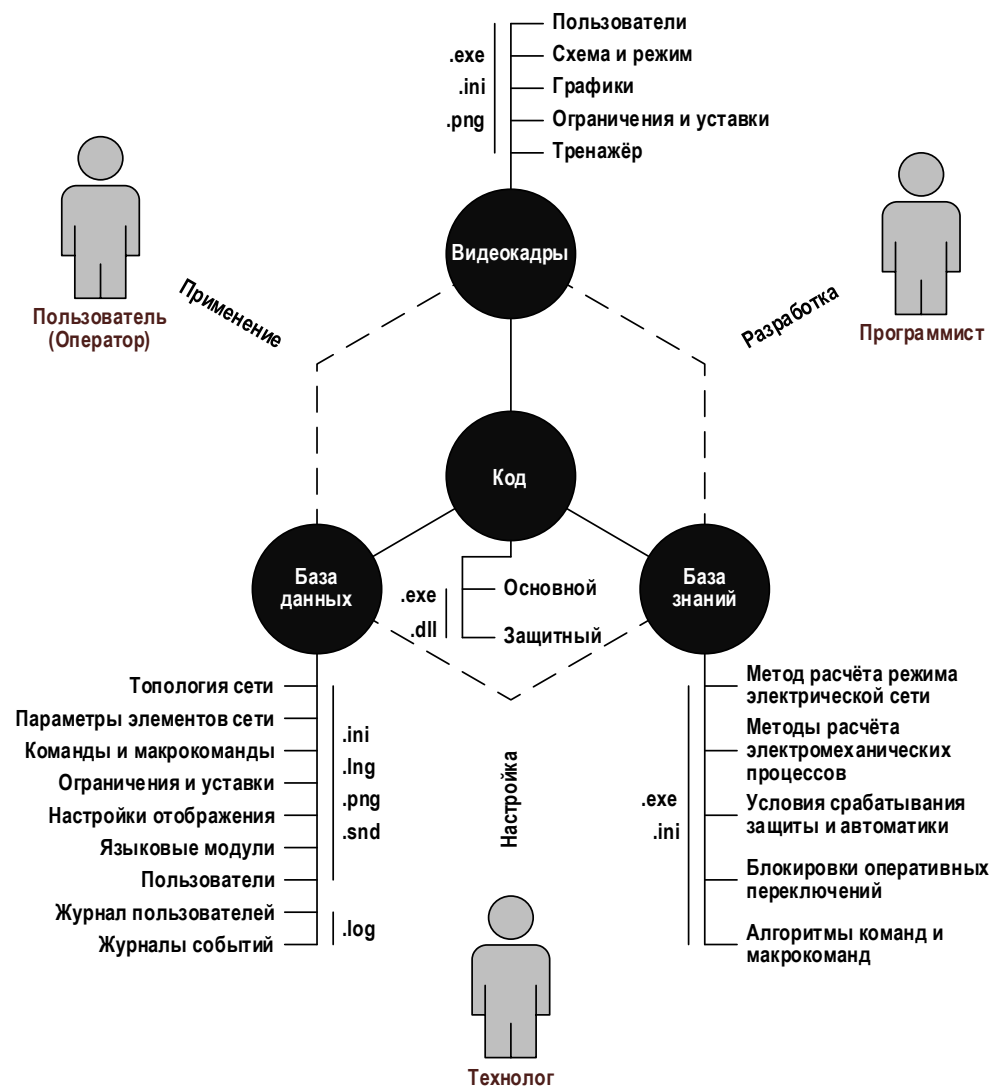
Опыт применения цифрового двойника Минигрид для подготовки и аттестации дежурного персонала реального объекта, а также обучения магистрантов подтвердил его эффективность.»

[Статья сдана в издательство, 2023 г.]



## 5) Технологические и цифровые модели двойника (сокращённый вариант)

### Алгоритм и структура программы



## 6) Информационные технологии и основы программирования при реализации образовательных программ ФЭН НГТУ

**ФГОС ВО – бакалавриат по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

Наименование категории (группы) общепрофессиональных компетенций	Код и наименование общепрофессиональной компетенции выпускника
Информационная культура	ОПК-1. Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности
	ОПК-2. Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения
Фундаментальная подготовка	ОПК-3. Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач
Теоретическая и практическая профессиональная подготовка	ОПК-4. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин
	ОПК-5. Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности
	ОПК-6. Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин применительно к объектам профессиональной деятельности

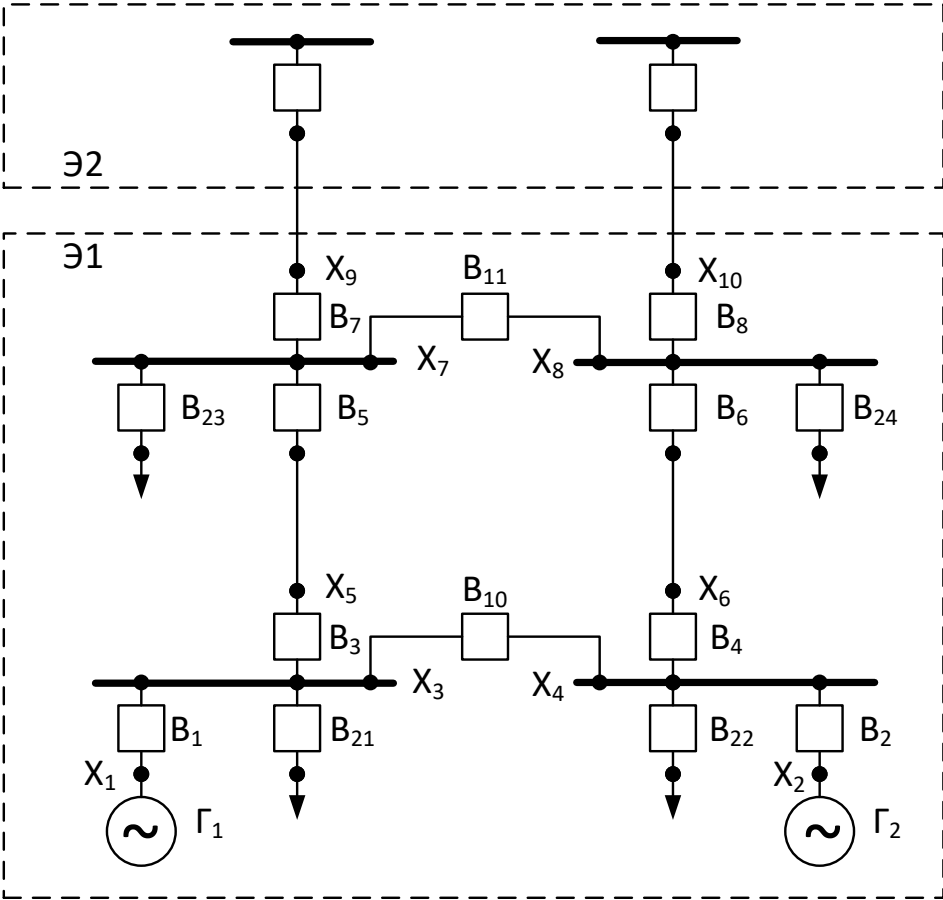
### Разработка:

- структур хранения исходных данных
- вычислительных алгоритмов
- структуры программы
- видеокадров
- реестра сообщений оператору

### Последовательность:

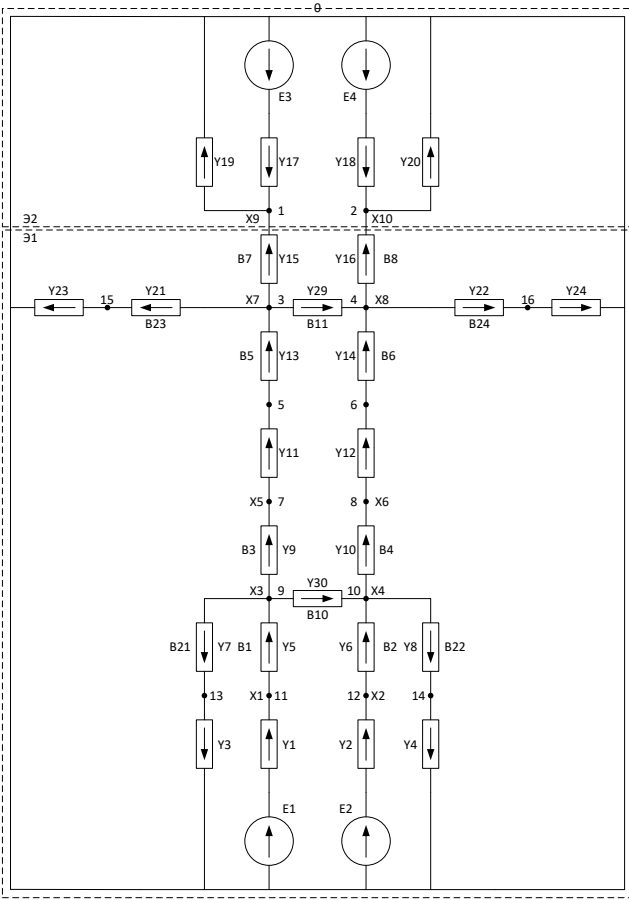
- ...Алгоритмизация
- ...Кодирование
- ...Отладка
- ...Тестирование
- ...Документирование

## Цифровой двойник Минигрид. Адаптация задач. Редукция схемы Минигрид



### Сокращенно число элементов:

- ИСТОЧНИКОВ,
- ПОТРЕБИТЕЛЕЙ,
- СВЯЗЕЙ.



### Схема замещения подготовлена к расчёту:

- представлена в виде схемы,
- пронумерованы ветви, узлы, источники ЭДС,
- выбраны направления тока в ветвях.



## Цифровой двойник Минигрид. Адаптация задач. Руководство по оформлению расчётных данных Минигрид

Дано пошаговое руководство по составлению матриц  $A$ ,  $Y$ ,  $E$ ,  $J$ ,  $U$  системы линейных алгебраических уравнений для расчёта установившегося режима сети:

$$AYA^T U_0 = -A(J + YE)$$

## Цифровой двойник Минигрид. Сокращение числа задач

Исключены задачи:

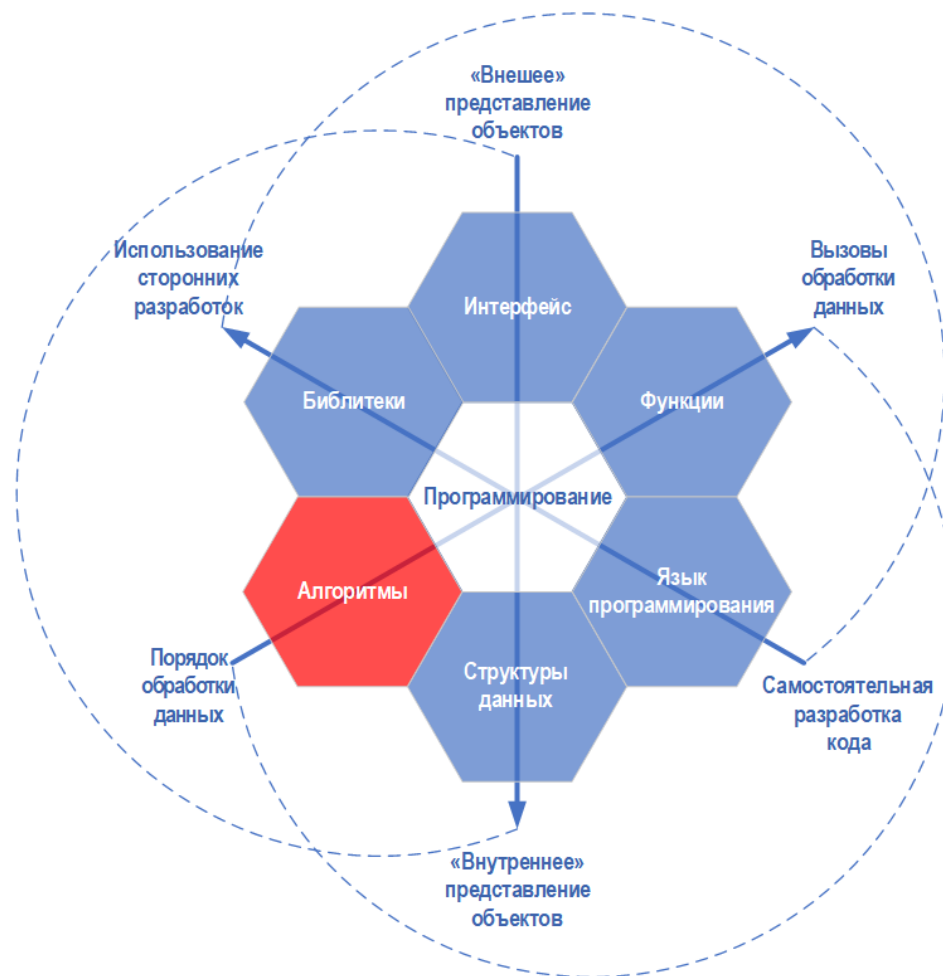
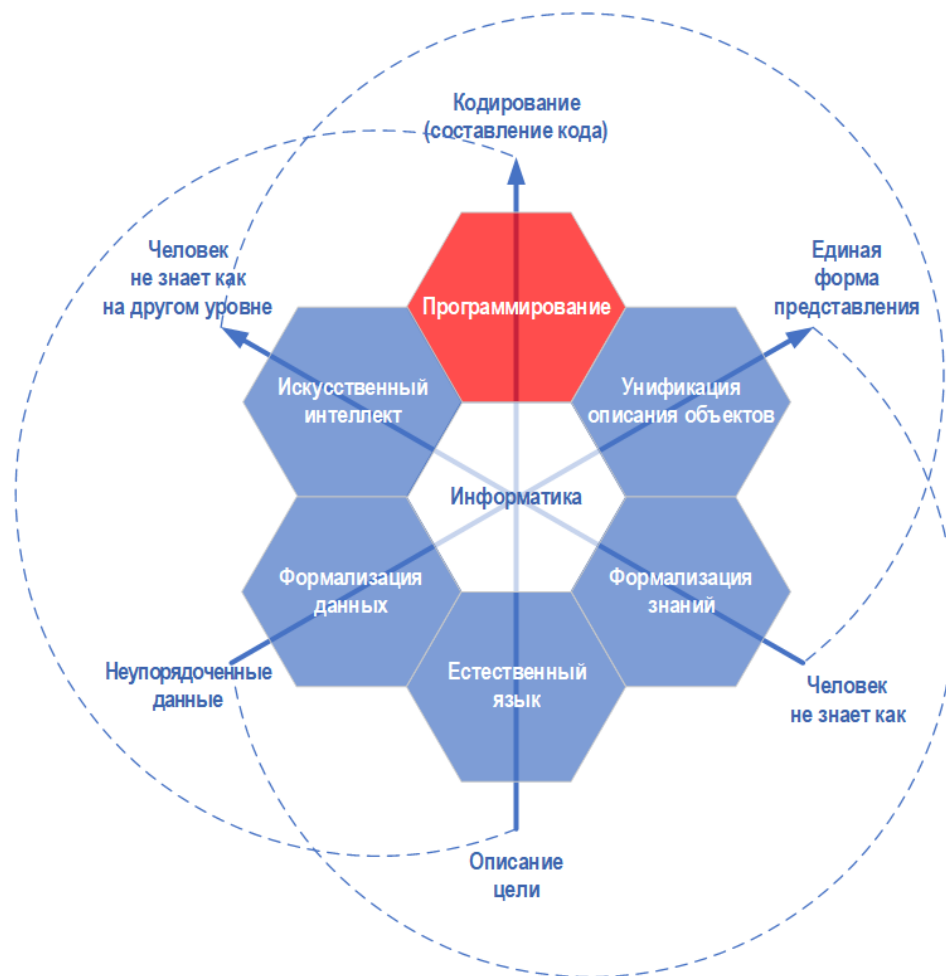
- динамического моделирования (движения ротора генератора, действия системы возбуждения),
- моделирования защиты и автоматики,
- моделирования режимов управления,
- ...

## **Цифровой двойник Минигрид. Адаптация задач. Референсные методы расчётов для тестирования**

**Решение вычислительных задач способами:**

- 1. «эталонный 1» – с использованием встроенных функций «калькулятора» Mathcad,**
- 2. «эталонный 2» – с использованием известных библиотек на изучаемом языке программирования высокого уровня,**
- 2. собственный – создание собственных библиотек вычислительных функций с пошаговым выполнением «прямого» и «обратного» хода по методу Гаусса для СЛАУ, умножения, сложения и транспонирования матриц на языке программирования высокого уровня.**

# Информатика и программирование



## Учебные материалы

**В мае 2023 г. в издательстве НГТУ выходит межкафедральное учебное пособие  
«Информационные технологии и основы программирования в электроэнергетике»**

**В ноябре 2023 г. выходит вторая часть.**

## Исполнители и участники

НГТУ



НЭТИ

TORNADO  
MODULAR SYSTEMS

