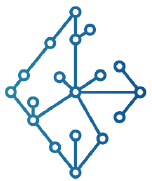


**ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

7–8 октября 2025 года,
Новосибирск



**ЦЕНТР КОМПЕТЕНЦИЙ НТИ
на базе НИУ "МЭИ"**

ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ



РЗА

КАФЕДРА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИЗАЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА
ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ И
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ
МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО
ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Авторы доклада:
Астахов Е.С. Яковлев Д.П.

Цель и задачи



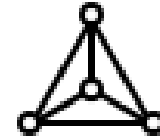
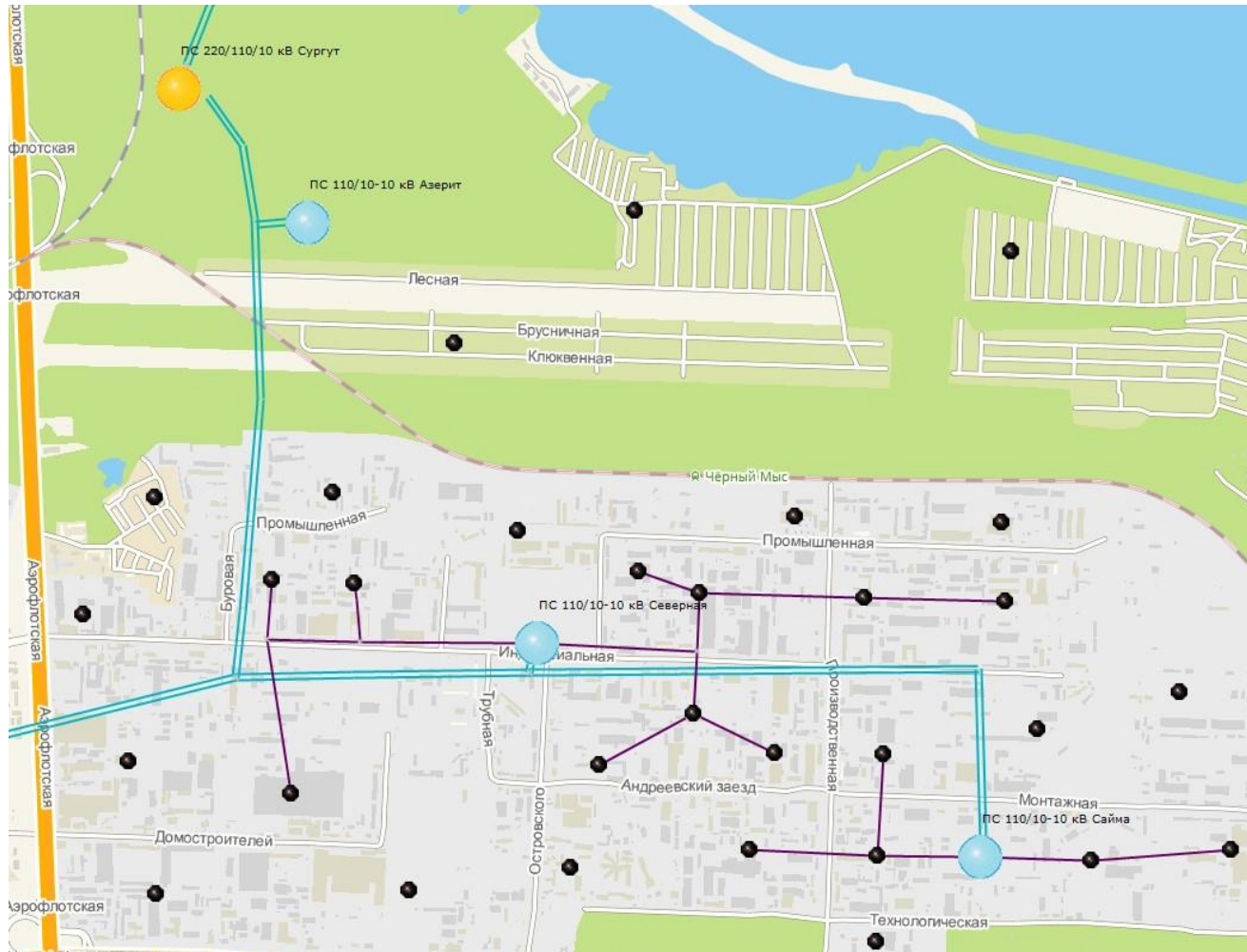
Цель работы: разработать программный сервис, позволяющий автоматически синтезировать оптимальные решения для структуры и параметров энергосистемы с использованием метода динамического программирования на основании географического расположения объектов электроснабжения с учетом наличия локальных генерирующих установок, для обеспечения заданных показателей качества электроэнергии при минимизации капитальных затрат.



Задачи:

- ✓ Проанализировать методы оптимизации;
- ✓ Разработать алгоритм синтеза оптимальных решений;
- ✓ Создать сервис на основе разработанного алгоритма;
- ✓ Провести вычислительные испытания разработанного модуля.

Постановка задачи



Задача: осуществить техническое присоединение новых точек нагрузки к сети



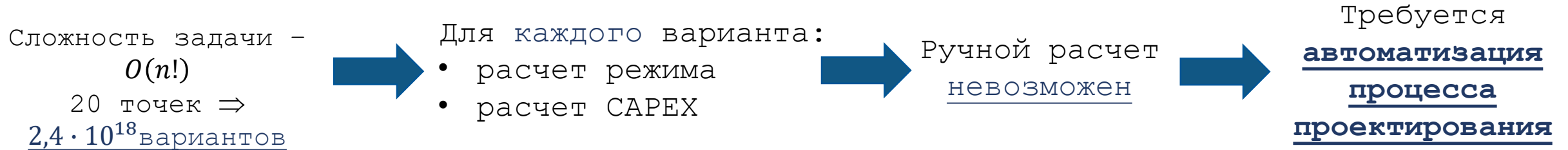
Критерий поиска оптимального решения: минимизация капиталовложений на сооружения сети $CAPEX \Rightarrow \min$



Решение должно обеспечивать: требуемое по ГОСТ 32144-2013 качество напряжения на шинах потребителя

Сложность задачи

Многокритериальная задача



Пути решения



Полный перебор всех вариантов:

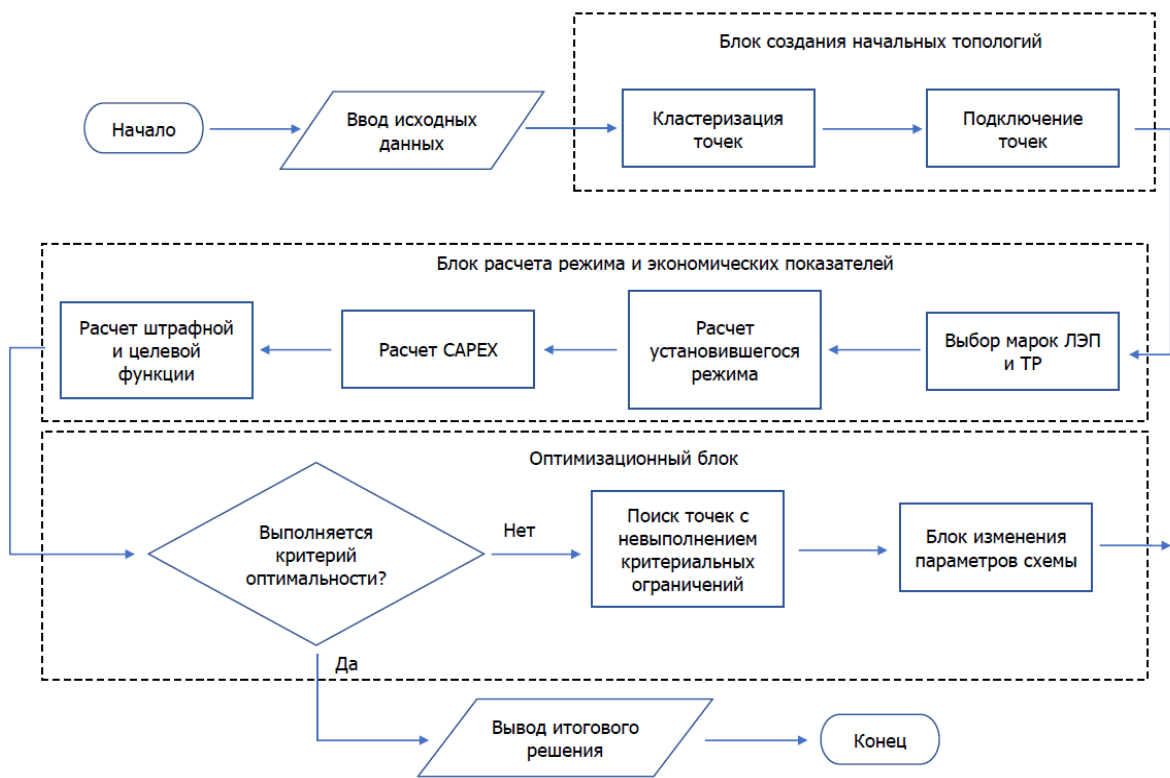
- ограниченное количество подключаемых точек
- длительное время расчета
- требует вычислительных ресурсов



Алгоритмы оптимизации:

- неограниченное количество точек
- быстрый расчет
- позволяет найти оптимальное решение

Алгоритм поиска оптимальных решений



Блок схема алгоритма

Целевая функция

$$Target(X) = CAPEX + Penalty \Rightarrow \min$$

Капитальные затраты

Штрафная функция

$$CAPEX = \sum_{i=0}^n CAPEX_i$$

$$Penalty = \sum_{i=0}^m A \cdot e^{\alpha \cdot \Delta U_i}$$

n – количество установленного оборудования

m – количество точек нагрузки;

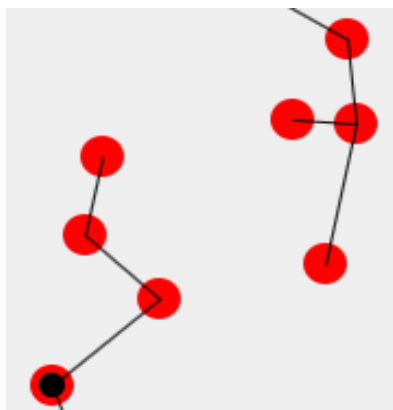
A – амплитуда штрафной функции;

α – показатель экспоненты штрафной функции

Алгоритм реализован на языке программирования **Java**, визуализация полученных решений реализована с помощью пакета **javax.swing**.

Модуль начальных топологий

Присоединение без кластеризации, по наименьшему расстоянию



Условные обозначения:

- точка энергосистемы
- точки принадлежащие одному кластеру
- центр кластера
- распределительный пункт

Метод кластеризации: DBSCAN		Определение центра кластера		
		Ближайшая точка к энергосистеме	Точка с наибольшей потребляемой мощностью	Создание распределительного пункта
Присоединение в рамках кластера	По наименьшему расстоянию			
	Радиально к центру кластера			

Модуль расчёта режимов и экономических показателей



1 Расчёт предварительного
потокораспределения
мощности по ветвям графа
созданной топологии сети

2 Расчёт необходимого числа
трансформаторов и цепей ЛЭП
на основании категории
надежности потребителя

3 Выбор марки проводов ЛЭП
и трансформаторов из
библиотеки оборудования

4 Расчёт установившегося
режима работы электрической
сети

5 Определение значения
штрафной и целевой функций

Модуль изменения параметров сети

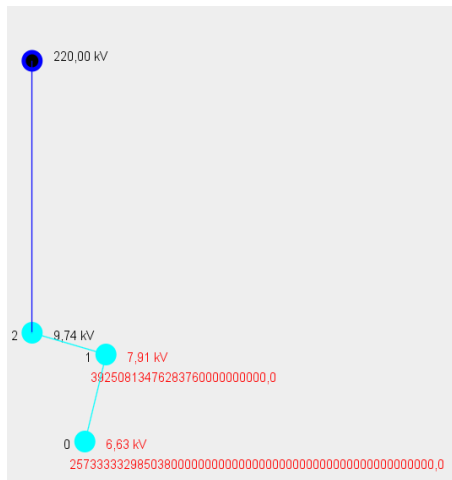
Способы улучшения сети

1 группа – изменение топологии сети:

- увеличение цепности линии
- изменение номинального напряжения линии
- переподключение точки к ближайшей точке питания
- переподключение точки к точке с наименьшей длиной электропередачи

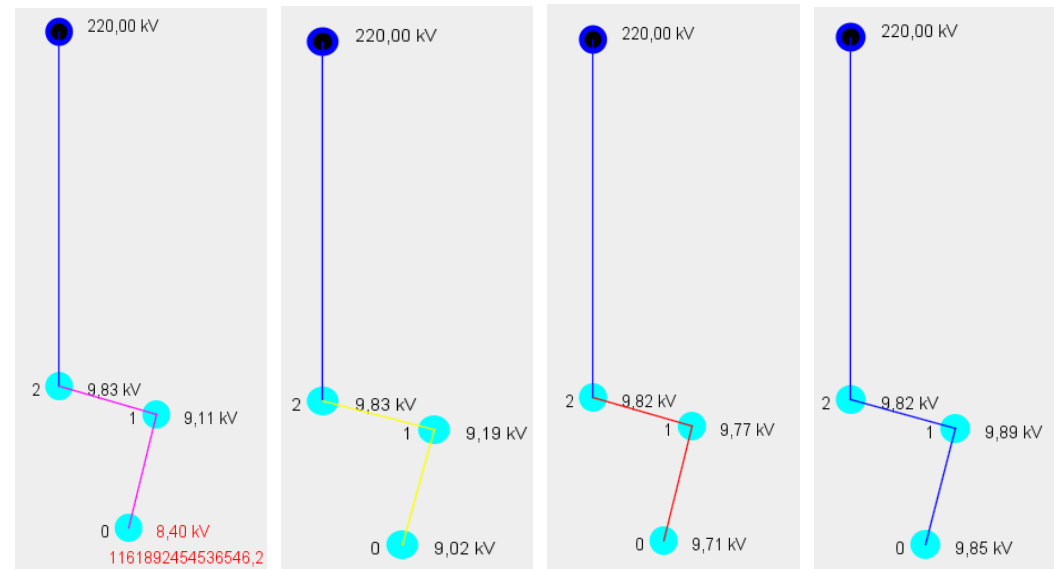
2 группа – добавление локальной генерации:

- полная или частичная компенсация реактивной мощности
- установка локальных генерирующих установок (ДГУ, СЭС, ВЭС)



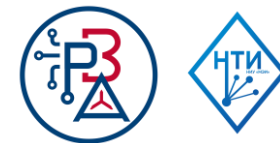
Пример сети до улучшений

Изменение номинального напряжения на 20, 35, 110 и 220 кВ



330.0 кВ
220.0 кВ
110.0 кВ
35.0 кВ
20.0 кВ
10.0 кВ
6.0 кВ
0.38 кВ

Оптимизационный модуль



Рост штрафной функции

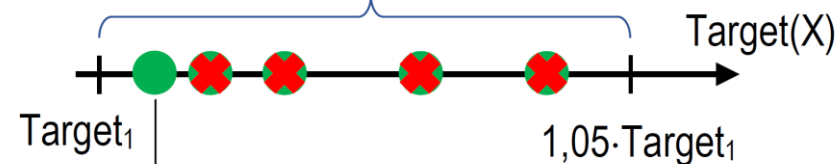
Основная идея: исключение **заведомо неоптимальных** решений на каждом слое

Методика исключения решений:

- **Target (X)** должно уменьшаться на каждом слое
- **CAPEX** каждого последующего слоя меньше чем **Target (X)** предыдущего слоя

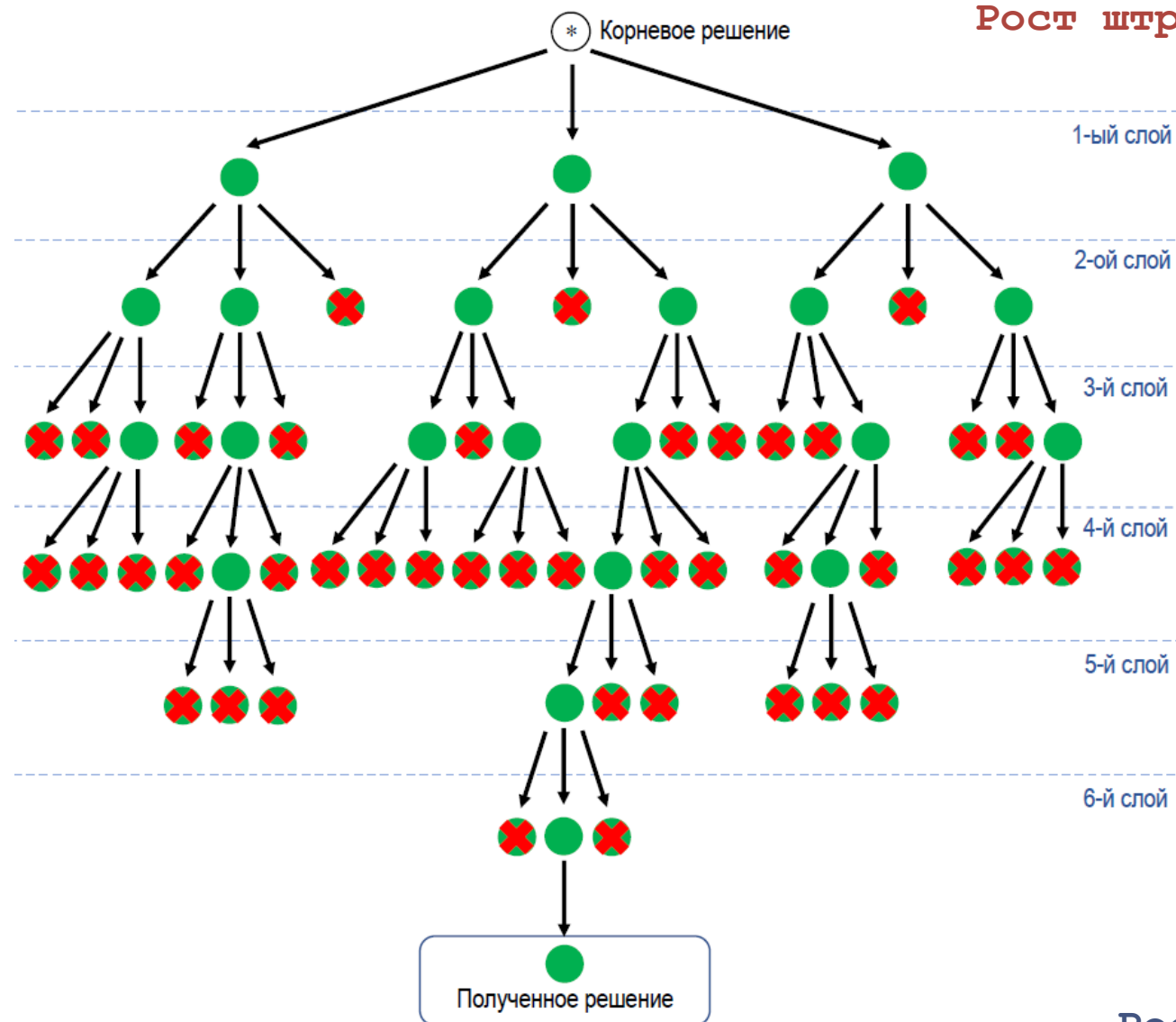
Модификация алгоритма: «схлопывание» решений на каждом слое

Диапазон равноэкономичности – 5%

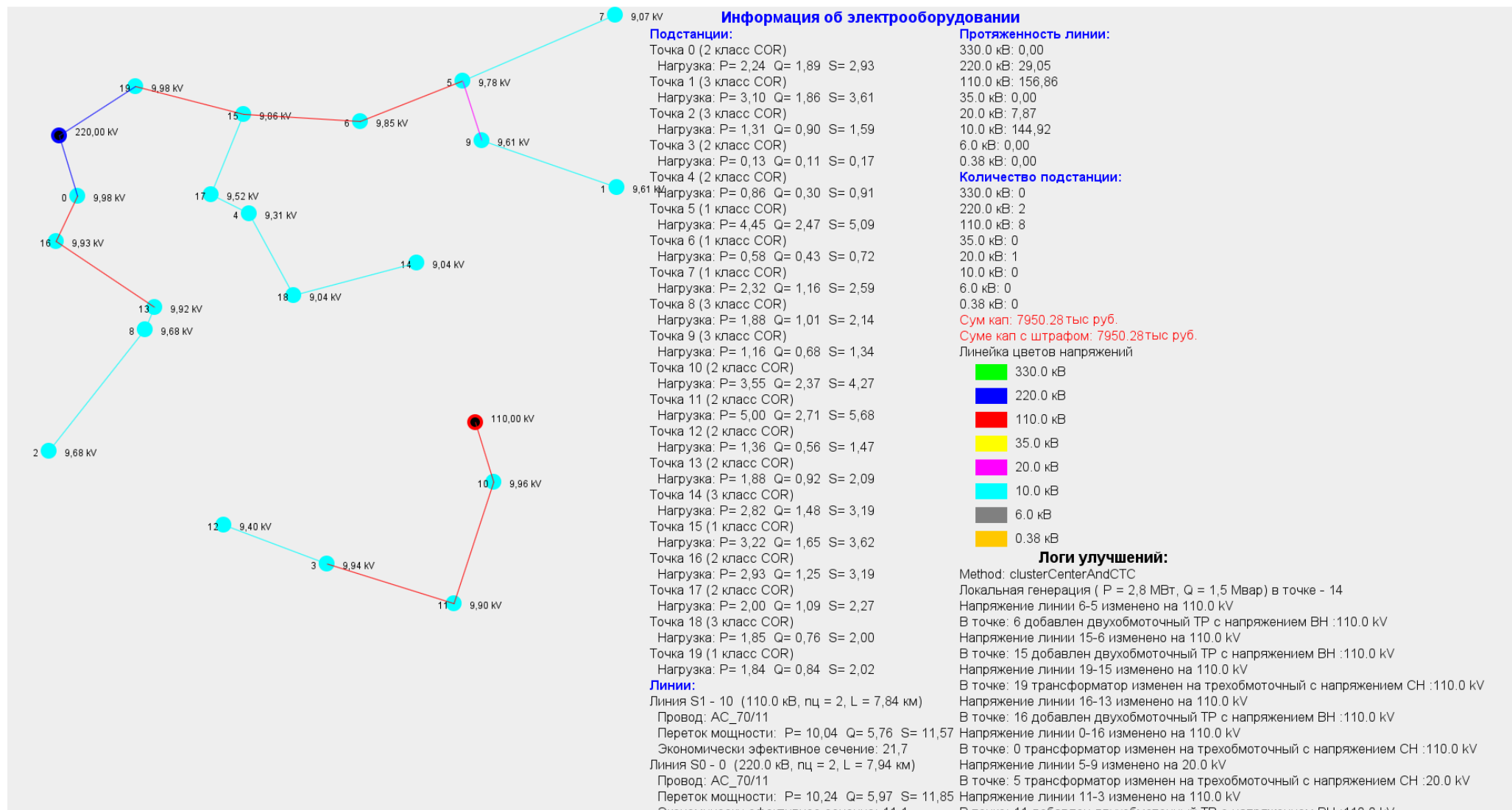


В следующий слой

Рост CAPEX



Пример работы сервиса

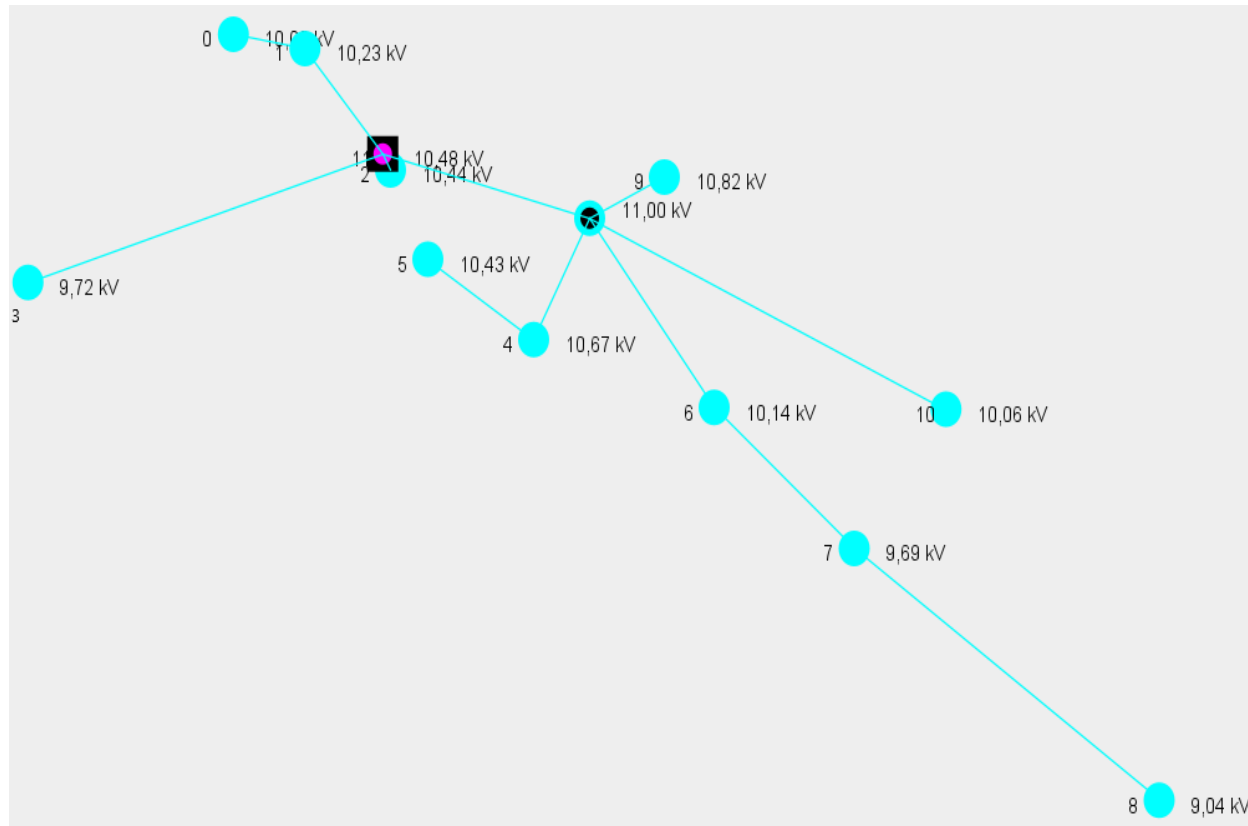


САРЕХ = 7950,3 тыс. руб.

Время расчета: 17 минут 23

Программа испытаний сервиса : ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

13-ти узловая схема РЭС 10 кВ



Суммарная **протяженность** ЛЭП – 154 км



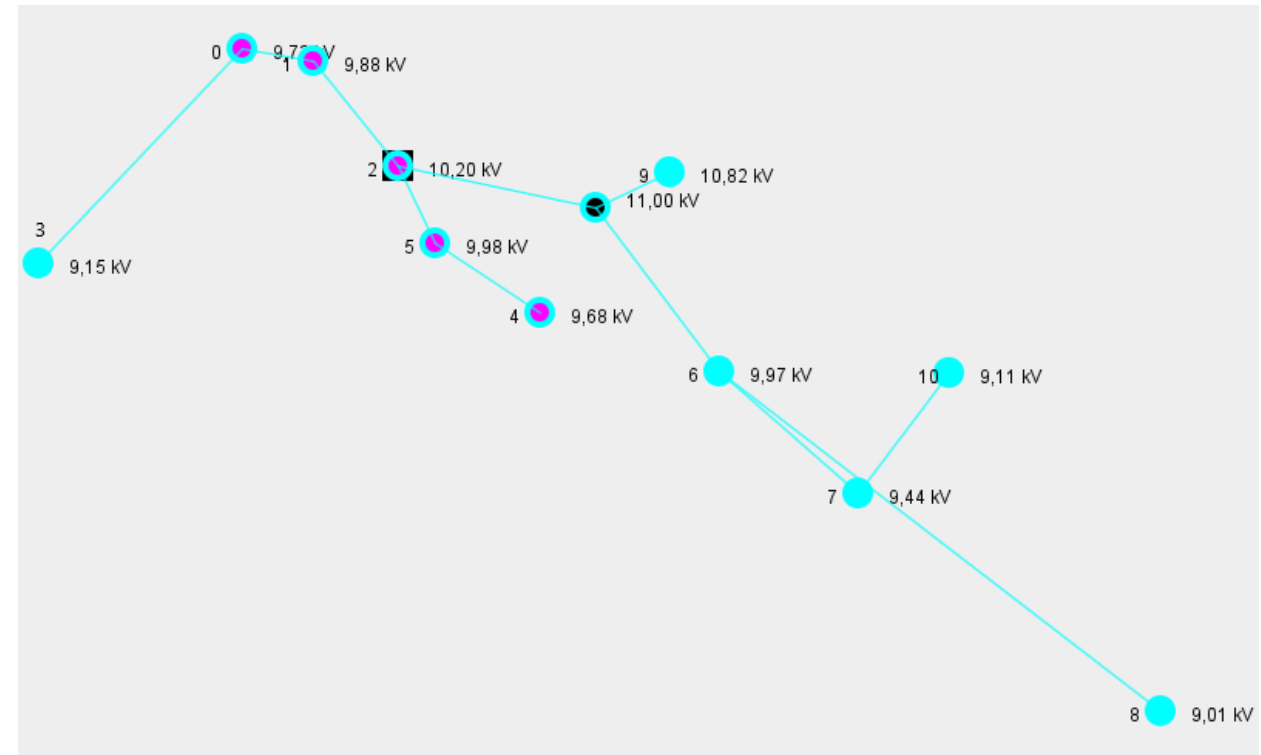
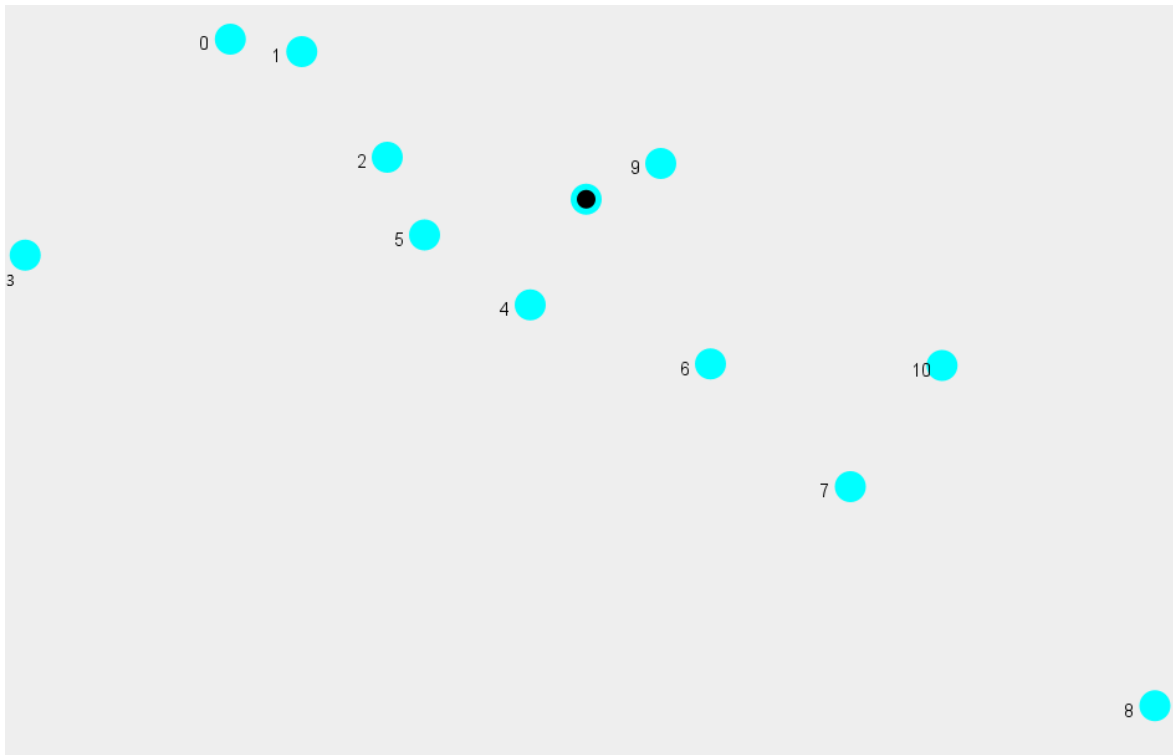
Капитальные затраты – 11 млн. руб.



Напряжение на шинах потребителей обеспечивается в диапазоне $U = 90 \div 110 \%$ от номинального значения

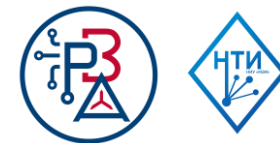
Решение задачи проектирования сети

Исходные данные для проектирования \longrightarrow Результат синтеза оптимального решения



Капитальные затраты для решения задачи проектирования – **9,5 млн. руб.**

Результаты испытаний сервиса



Набор способов улучшения	Капитальные затраты, тыс. руб.	Протяженность ЛЭП, км	Выполняются технические ограничения?	Процентное отношение к исходной схеме
Задача проектирования новой сети				
1 группа: $U = 90 \div 110$ % от номинального значения				
Все способы улучшения	9510	136	✓ Да	88,3 %
Без локальной генерации	9510	136	✓ Да	88,3 %
Исходная схема	10770	154	✓ Да	100 %
2 группа: $U = 100 \div 110$ % от номинального значения				
Все способы улучшения	16630	238	✓ Да	154,4 %
Без локальной генерации	19700	147	✓ Да	182,9 %
Исходная схема	10770	154	✗ Нет	100 %

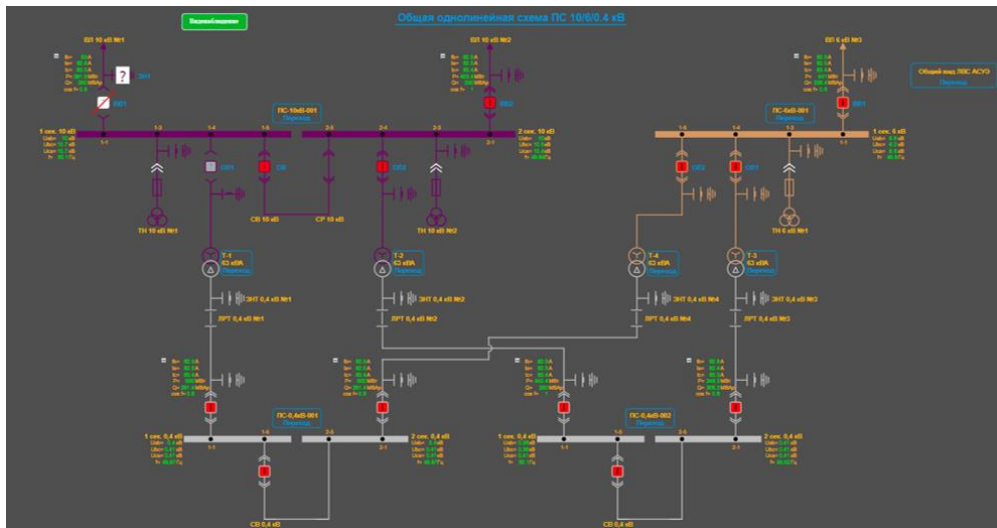
Перспективы развития идеи



Техническое решение

SmartSCADA – интегрированная платформа для управления энергосетями с GIS-подложкой и ИИ

- ⚙️ **Online-оптимизация** режима работы сети
- ⚙️ Визуализация данных на цифровой карте
- ⚙️ **Прогнозирование** нагрузки и генерации
- ⚙️ **«Умное управление»** электрической сетью



Научная новизна

- 💡 Первая SCADA-система с **гибридным анализом** (AI + GIS)
- 💡 Система **поддержки принятия решений** на базе ИИ:
 - ✓ снижает ошибки операторов
 - ✓ сокращает ОРЕХ за счет оптимизации режимов
 - ✓ прогнозирует режим работы сети на сутки вперед
- 💡 Использование технологии MLOps для **online актуализации параметров** моделей ИИ

Заключение



В ходе исследования был разработан **программный сервис** автоматического синтеза оптимальных решений для энергосистем. Предложенный алгоритм на базе метода динамического программирования со «схлопыванием» позволил за короткое время находить решение, удовлетворяющее всем ограничениям, с близким к оптимальному значением целевой функции.

Разработанный сервис позволяет:

- ✓ Синтезировать оптимальные решения для задач **проектирования новой** сети;
- ✓ Возможность использования сервиса для решения задачи **развития и реконструкции** сети;
- ✓ Получать более **экономически выгодные** решения по результатам экспериментов на 11%;
- ✓ Находить решения с учётом **технических и экономических** аспектов;
- ✓ Учитывать влияние **локальных генерирующих установок**;
- ✓ Осуществлять **быстрый поиск** оптимальных решений.

СПАСИБО За внимание!

E-mail

AstakhovYS@mpei.ru

YakovlevDP@mpei.ru

Телефон

+7 (909) 885 12
05

+7 (937) 011 42
28

Соц.сети

<https://vk.com/astakhovegor>

<https://vk.com/id427310232>