

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ УМНОЙ МИКРОСЕТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЫ

Выполнил:

Веделё Павел Михайлович

Научный руководитель:

д-р техн. наук, доцент

Французова Галина Александровна



**НГТУ
НЭТИ**

Новосибирский
государственный
технический
университет

nstu.ru

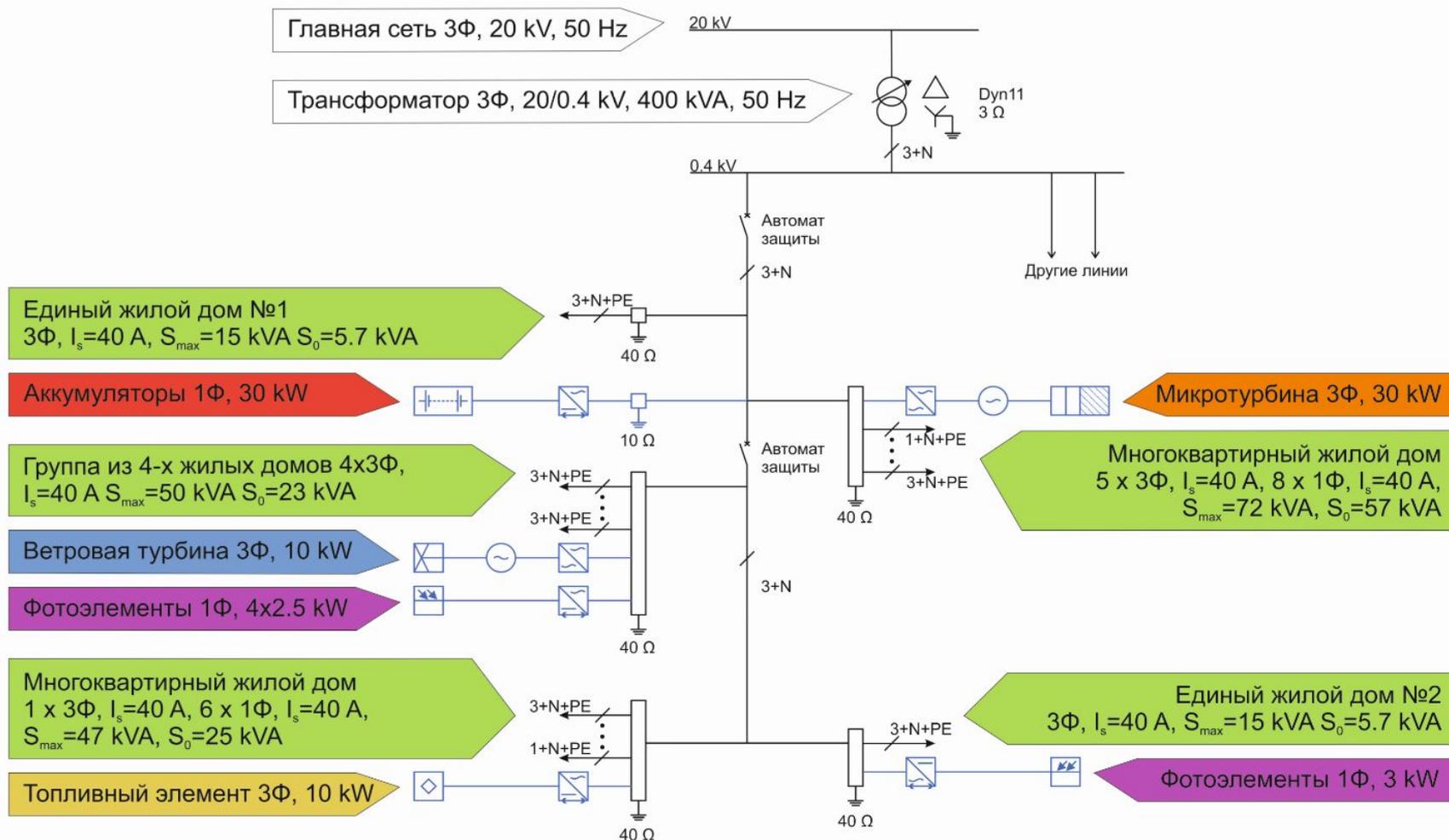
ЗАДАЧИ УМНЫХ МИКРОСЕТЕЙ

- В широком смысле – поддержание баланса энергосистемы;
- В узком смысле – минимизация затрат конечных пользователей.

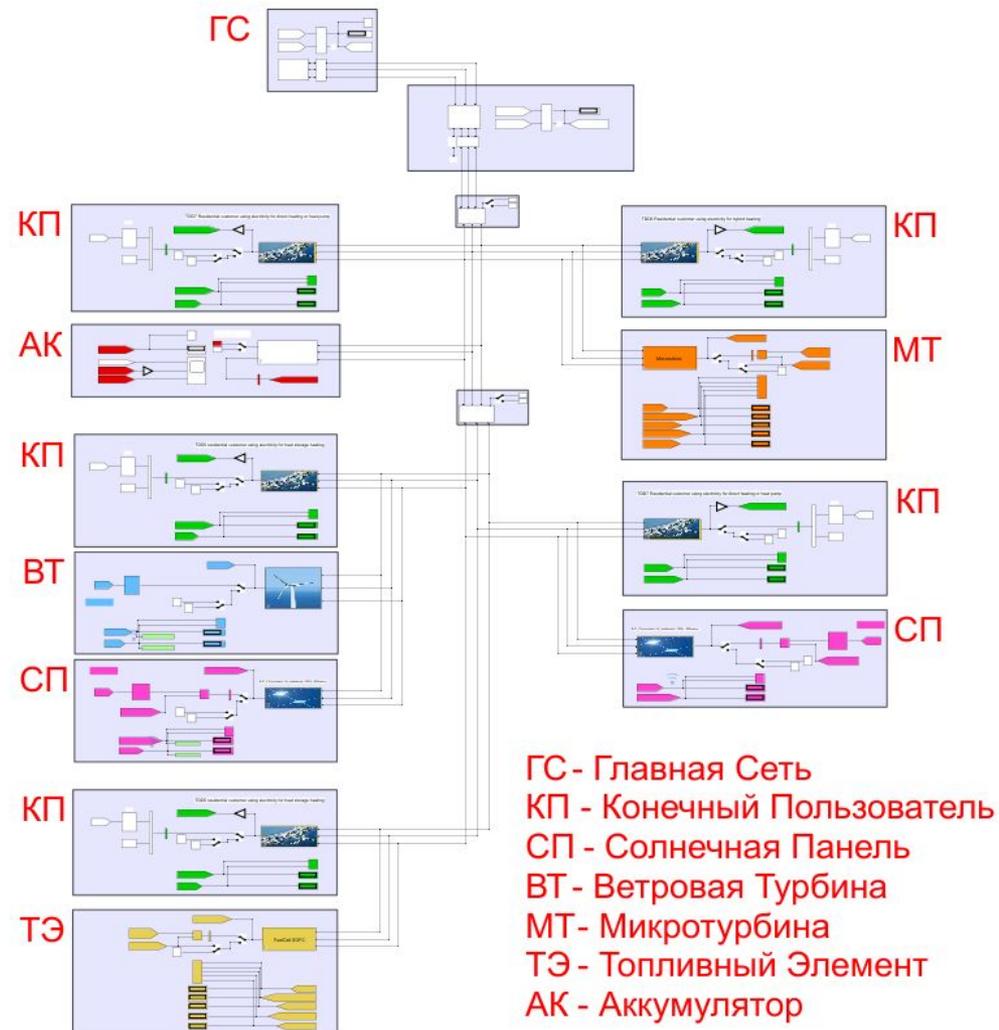
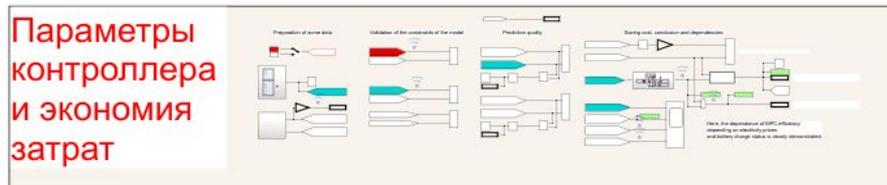
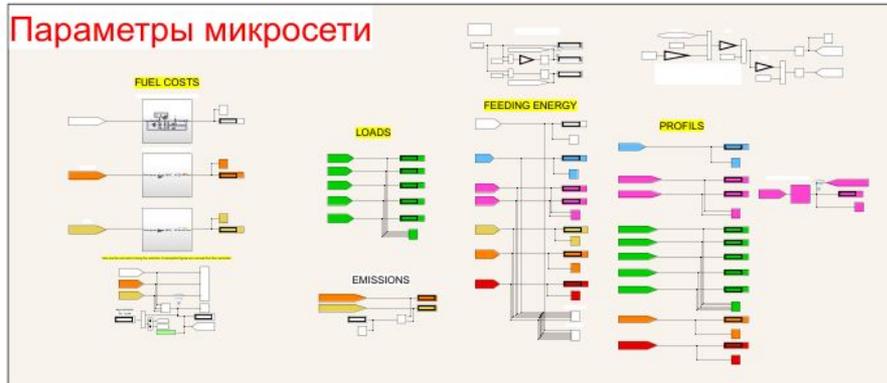
ВЛИЯНИЕ ДИСБАЛАНСА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ЦЕНООБРАЗОВАНИЕ

Суммарное потребление энергосистемы	Генерация электроэнергии возобновляемыми источниками энергии	Значение конечной цены за электроэнергию
Высокое	Высокая	Среднее
Высокое	Низкая	Высокое
Низкое	Высокая	Низкое
Низкое	Низкая	Среднее

ЭТАЛОННАЯ МОДЕЛЬ ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЫ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ SIGRÉ

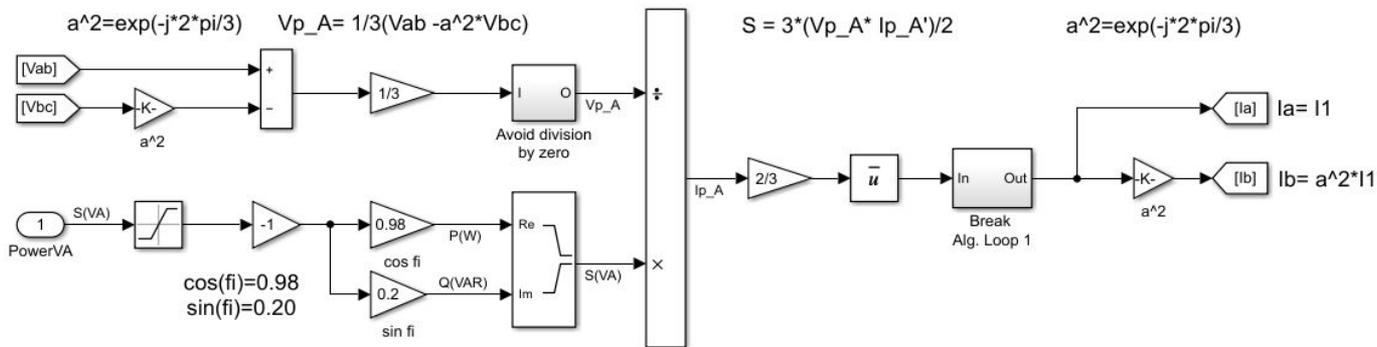
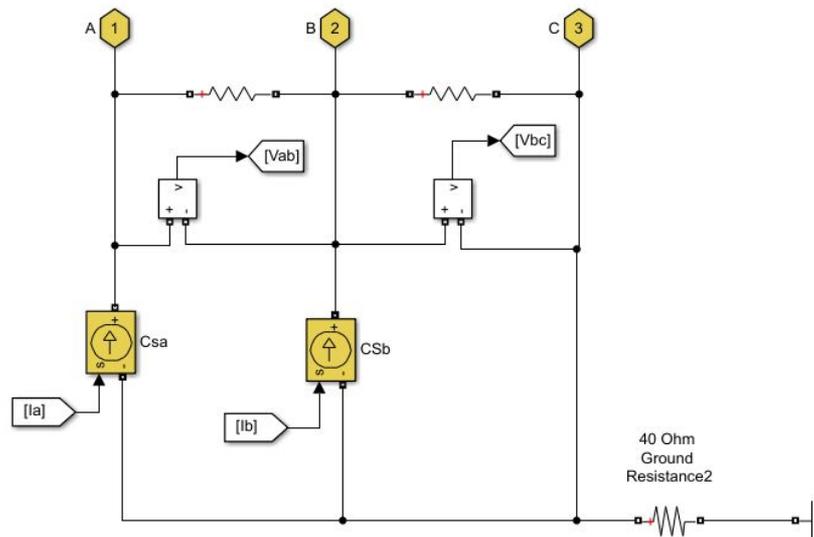


МОДЕЛЬ УМНОЙ МИКРОСЕТИ

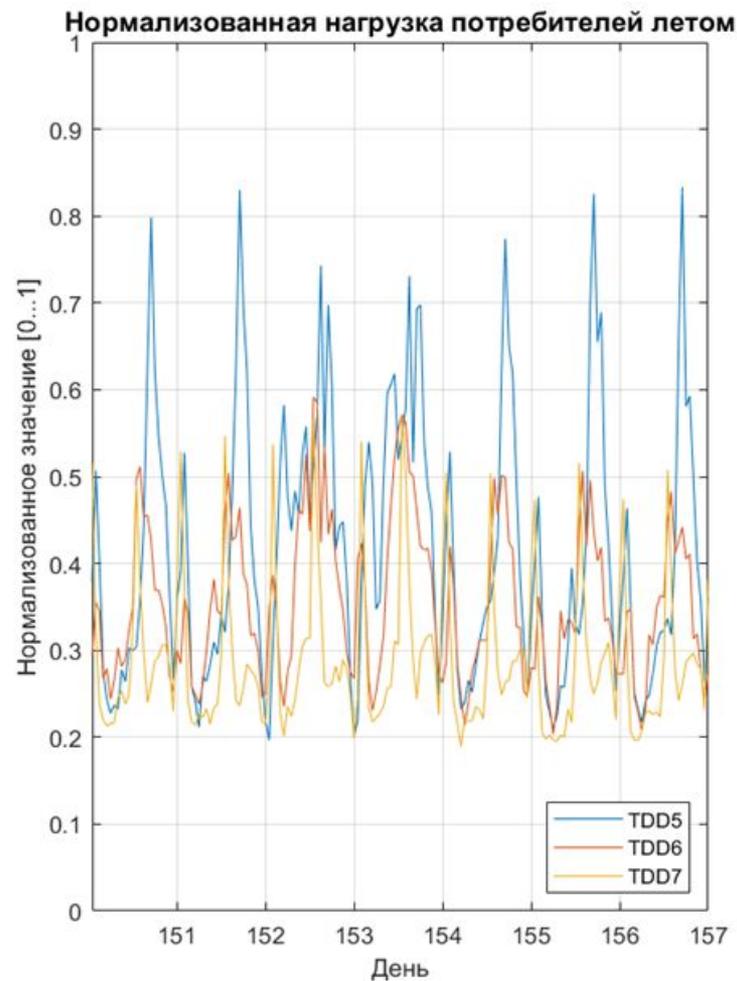
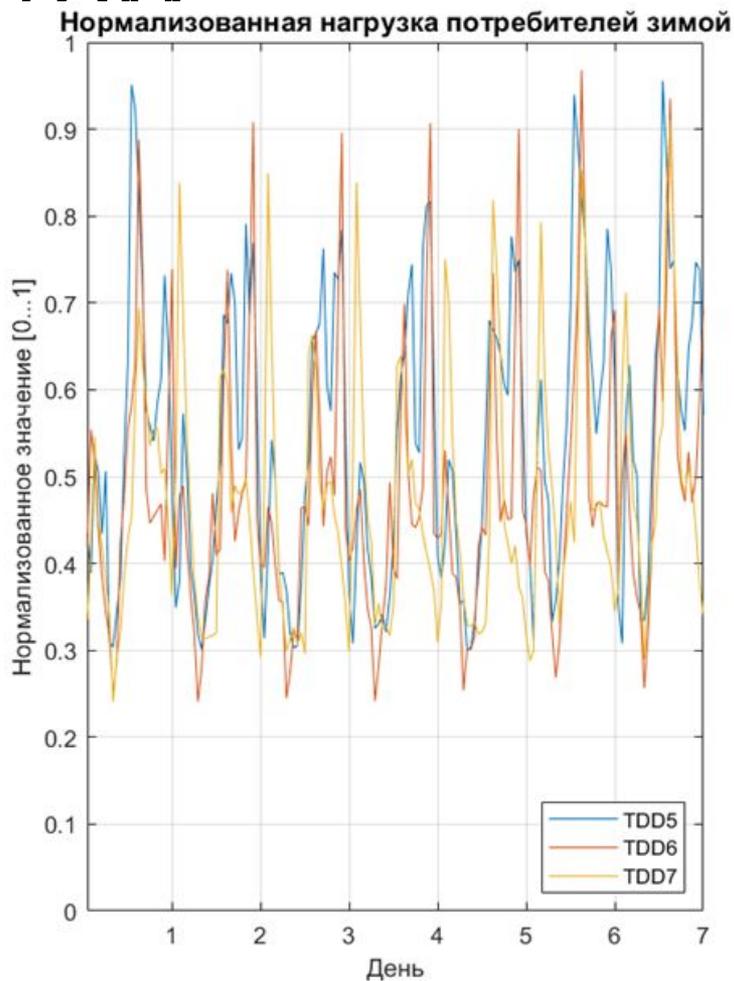


ГС - Главная Сеть
 КП - Конечный Пользователь
 СП - Солнечная Панель
 ВТ - Ветровая Турбина
 МТ - Микротурбина
 ТЭ - Топливный Элемент
 АК - Аккумулятор

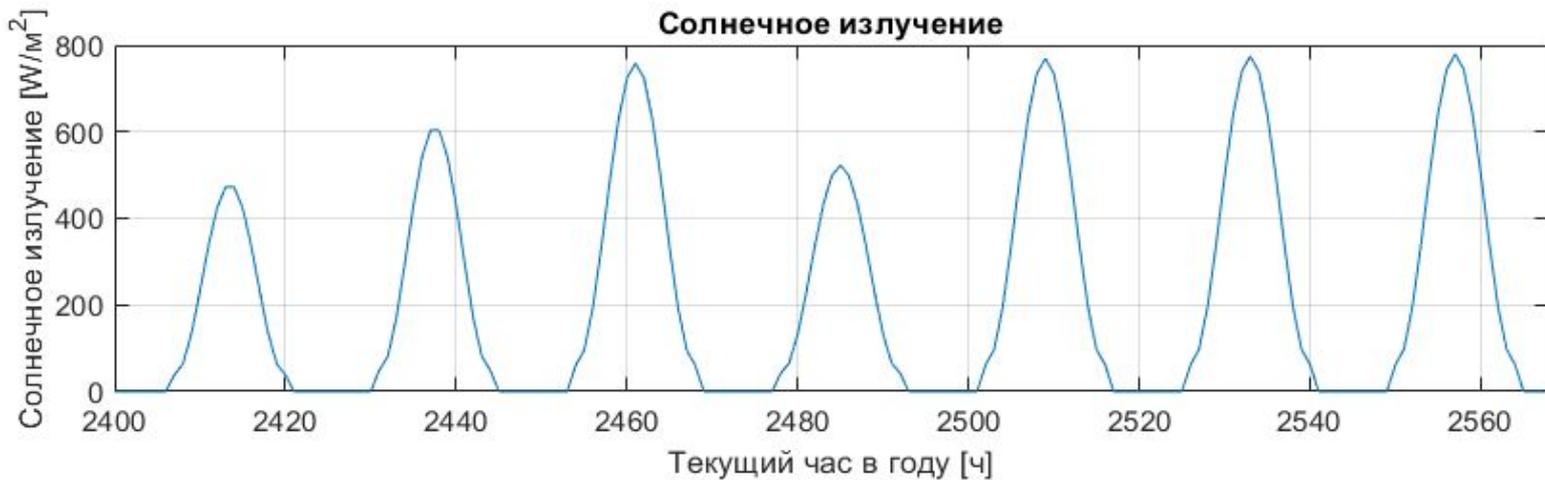
ТИПОВАЯ СТРУКТУРА ПОТРЕБИТЕЛЯ / ГЕНЕРАТОРА



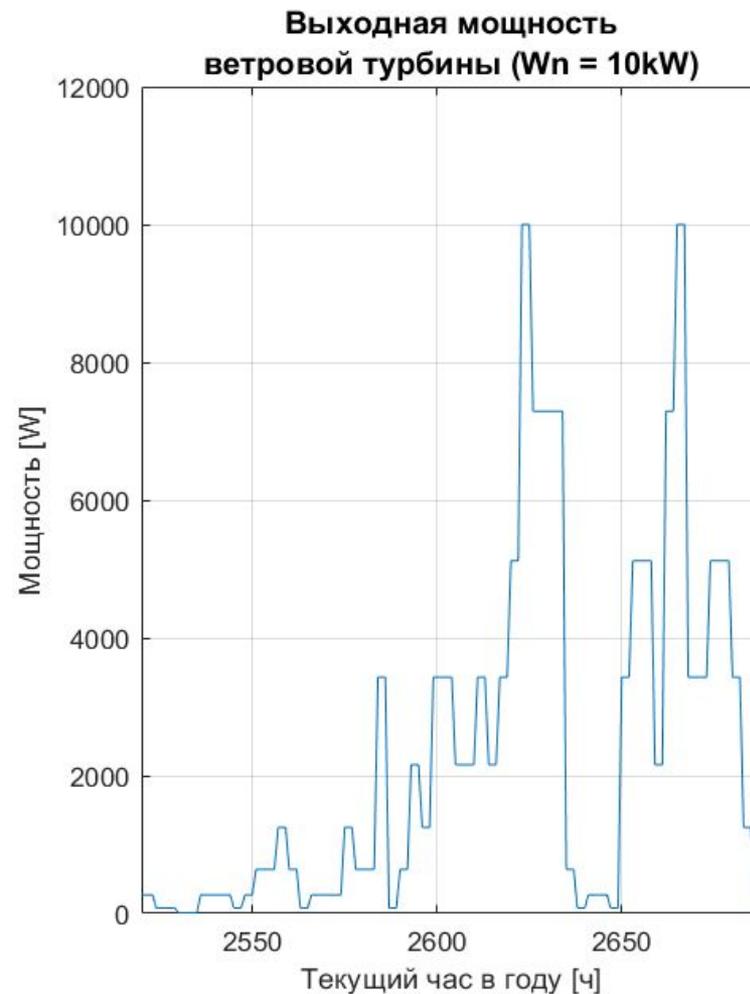
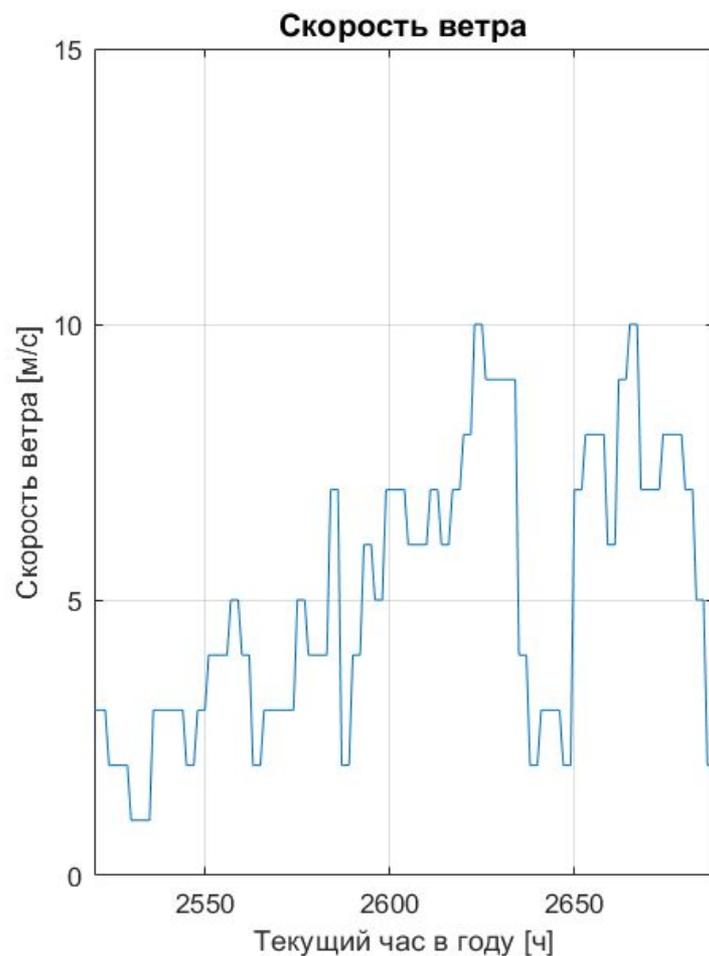
НОРМАЛИЗОВАННАЯ НАГРУЗКА КОНЕЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ЗИМОЙ И ЛЕТОМ



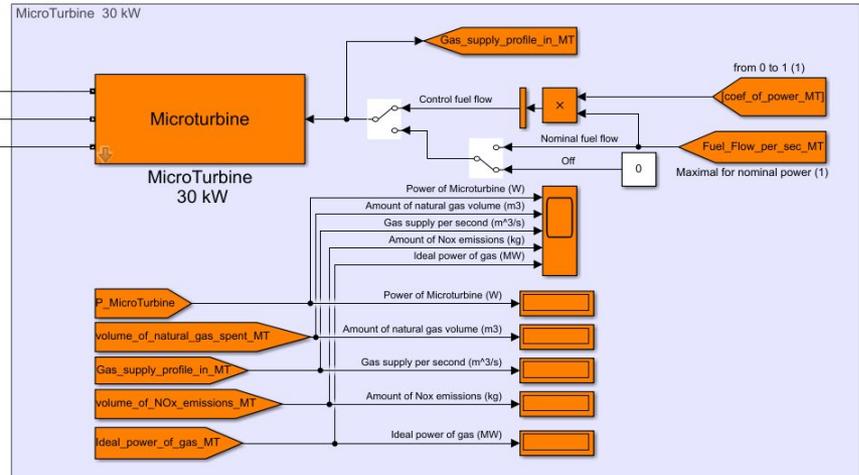
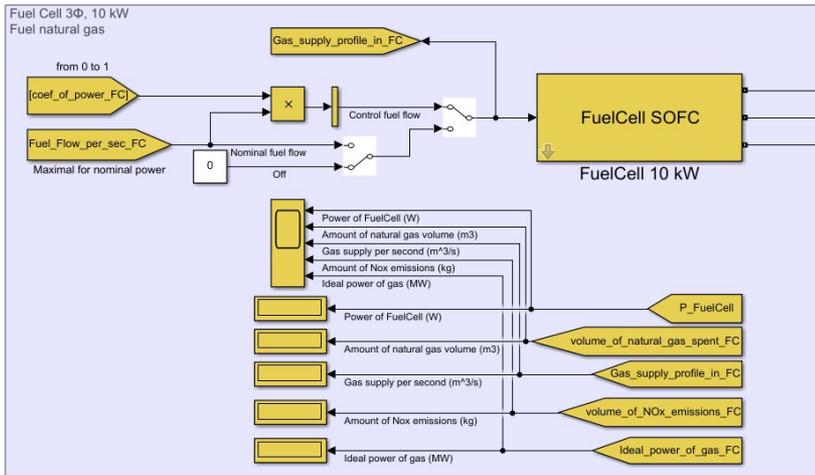
СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ ПА



СКОРОСТЬ ВЕТРА И ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ ВЕТРОВОЙ ТУ

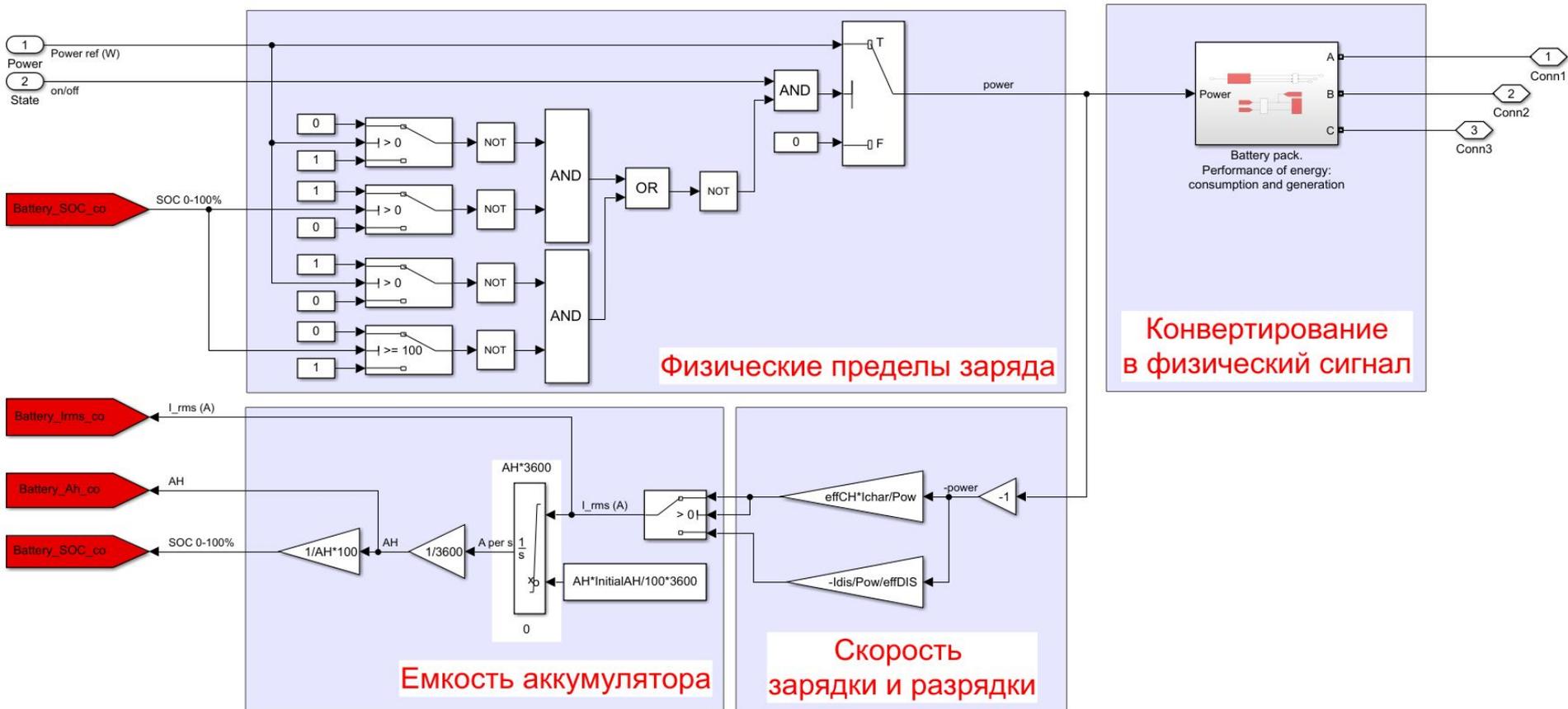


ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ И МИКРОТУРБИНА



Топливный элемент	Микротурбина
Номинальная электрическая мощность: 10 kW	Номинальная электрическая мощность: 30 kW
Электрический КПД: 0.4	Электрический КПД: 0.23
Топливо: природный газ	

СТРУКТУРА МОДЕЛИ АККУМУЛЯТОРА



ВЫЧИСЛЕНИЕ ЗАТРАТ МИКРОСЕТИ

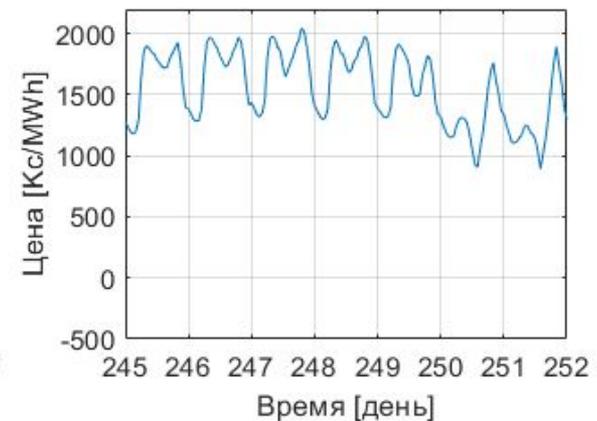
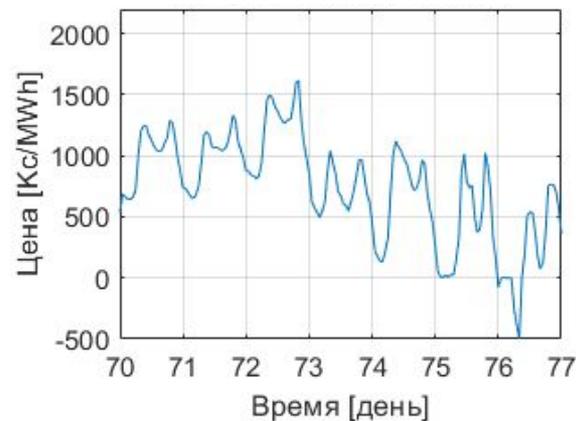
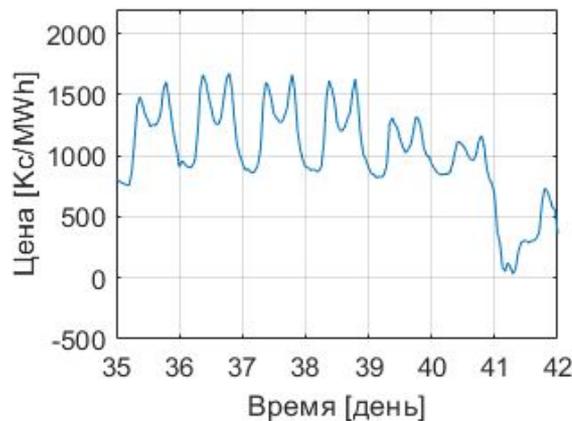
Общая цена за электричество:

$$\text{Cost}^{\text{EL}}(t) = \text{Cost}^{\text{el}}(t) + \text{Cost}_{\text{dist}}^{\text{el}}$$

Цена за дистрибьюцию электричества:

$$\text{Cost}_{\text{dist}}^{\text{el}} = 1000 \text{ Kč/MWh}$$

Цена за электричество $\text{Cost}^{\text{el}}(t)$ взятая с рынка на день вперед (DAM) за 2018



Общая цена за природный газ:

$$\text{Cost}^{\text{gas}} = 800 \text{ Kč/MWh}$$

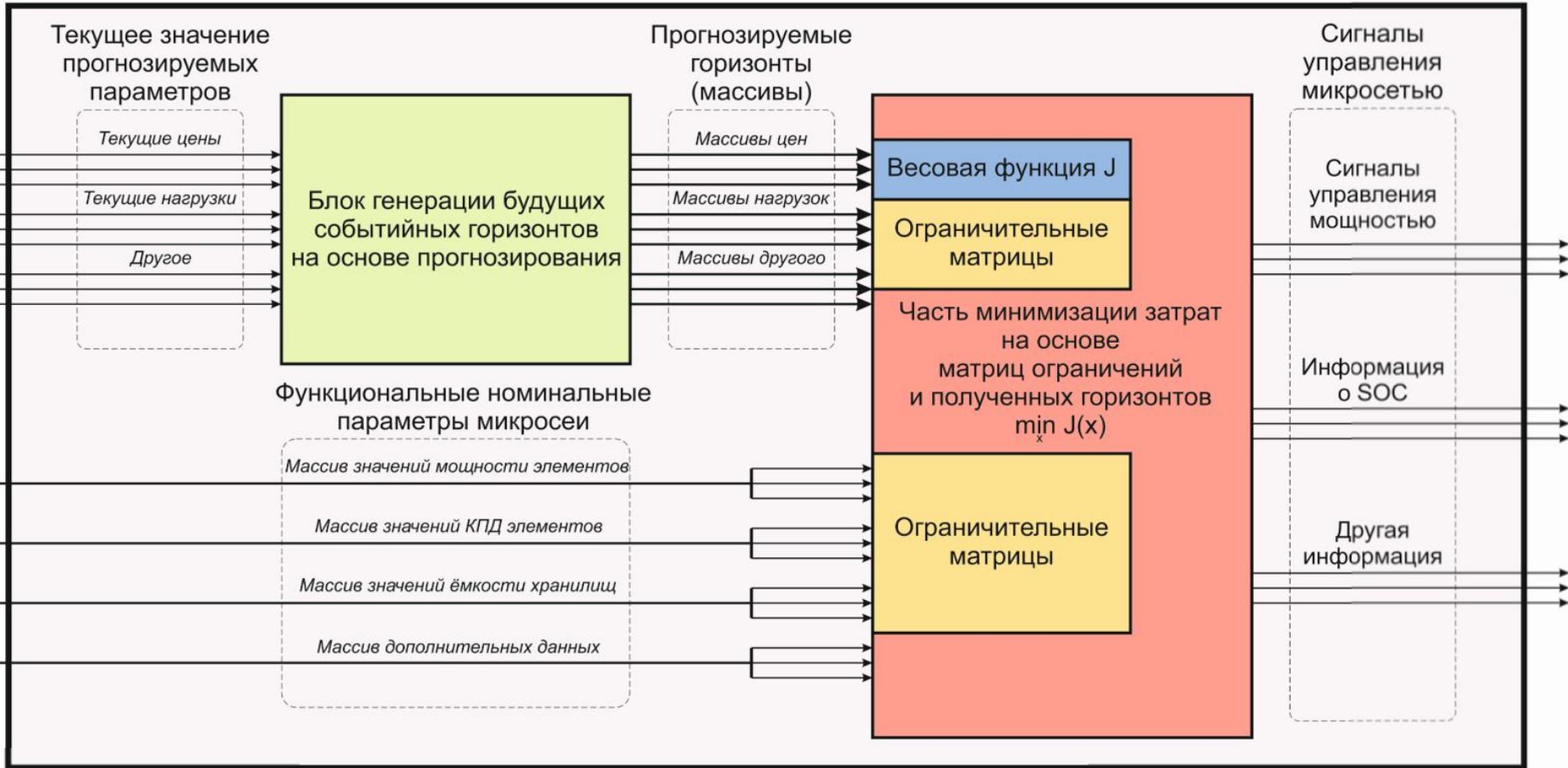
Общая цена за энергоснабжение микросети на интервале $[1;T]$ (ч):

$$\text{Cost}_{\text{mg}}(T) = \sum_{t=1}^T \text{Cost}^{\text{el}}(t) \cdot P_{\text{MG}}^{\text{el}}(t) + |\text{Cost}_{\text{dist}}^{\text{el}} \cdot P_{\text{MG}}^{\text{el}}(t)| + \text{Cost}^{\text{gas}} \cdot P_{\text{MG}}^{\text{gas}}(t)$$

Данные были взяты у оператора рынка электричества и природного газа Чехии (OTE:

<https://www.ote-cr.cz/en>)

СТРУКТУРА КОНТРОЛЛЕРА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (ECONOMIC MPC) ДЛЯ УМНОЙ



ОПИСАНИЕ ЧАСТИ МИНИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ

Общая цена за электричество:

$$\text{Cost}^{\text{EL}}(t) = \text{Cost}^{\text{el}}(t) + \text{Cost}_{\text{dist}}^{\text{el}}$$

Цена за дистрибьюцию электричества:

$$\text{Cost}_{\text{dist}}^{\text{el}} = 1000 \text{ K}\check{\text{c}}/\text{MWh}$$

Цена за электричество $\text{Cost}^{\text{el}}(t)$ взятая с рынка на день вперед (DAM) за 2018

Общая цена за природный газ:

$$\text{Cost}^{\text{gas}} = 800 \text{ K}\check{\text{c}}/\text{MWh}$$

Общая цена за энергоснабжение микросети на интервале $[1;T]$ (ч):

$$\text{Cost}_{\text{mg}}(T) = \sum_{t=1}^T \text{Cost}^{\text{el}}(t) \cdot P_{\text{MG}}^{\text{el}}(t) + |\text{Cost}_{\text{dist}}^{\text{el}} \cdot P_{\text{MG}}^{\text{el}}(t)| + \text{Cost}^{\text{gas}} \cdot P_{\text{MG}}^{\text{gas}}(t)$$

ОПИСАНИЕ ЧАСТИ МИНИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ

Смешано-целочисленное линейное программирование: функция минимизации

Критерий MILP это ценовая функция на всю длину горизонтов.

$$J = \sum_{k=1}^{\text{Длина горизонтов}} \sum_{i=1}^{\text{Кол-во. упр. генераторов}} Cost_{k,i} \cdot Power_{k,i}$$

$Cost_{k,i}$ – взята из предсказанных горизонтов (ARIMA);
 $Power_{k,i}$ – часть вектора x который мы ищем: заданная мощность.

Критерий J усложняется ограничениями и требованиями, которые определены как:

$$A_{eq} \cdot x = B_{eq}$$

Сопоставление общей мощности с нагрузкой.

$$\sum_{i=1}^{\text{Кол-во. упр. генераторов}} Power_{k,i} = Load_k$$

$Load_k$ – взята из предсказанных горизонтов (ARIMA).

Установка начальных условий.

$$SOC_0 = SOC_initial$$

SOC_0 – начальное значение SOC (сейчас).

ОПИСАНИЕ ЧАСТИ МИНИМИЗАЦИИ

$A \cdot x \leq B$		
Установка оптимальных пределов зарядки.	$Soc_{min}^{20\%} \leq SOC_0 + \sum_{k=1}^{\text{Длина горизонтов}} \Delta SOC_k \leq Soc_{max}^{90\%}$	ΔSOC_k – оптимальное изменение SOC на k -ый час.
Исключение возможности одновременной зарядки и разрядки аккумулятора.	$0 \leq Power_{k,DIS} \leq Power_{k,DIS}^{MAX} \cdot (1 - b_k)$ $0 \leq Power_{k,CH} \leq Power_{k,CH}^{MAX} \cdot b_k$	b_k – целочисленная часть вектора x : вспомогательная переменная.
$lb \leq x \leq ub$		
Установка физических ограничений на решение x .	$Power_{k,i}^{MIN} \leq Power_{k,i} \leq Power_{k,i}^{MAX}$ $Soc_{min}^{0\%} \leq SOC_k \leq Soc_{max}^{100\%}$ $0 \leq b_k \leq 1$	SOC_k – часть вектора x : оптимальное будущее значение, $k > 0$.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ARIMA МОДЕЛЕЙ

ARIMA — интегрированная модель авторегрессии — скользящего среднего

Общая цена за электричество:
Цена за дистрибуцию электричества:

$$Cost^{EL}(T) = Cost^{el}(T) + Cost_{dist}^{el}(T)$$

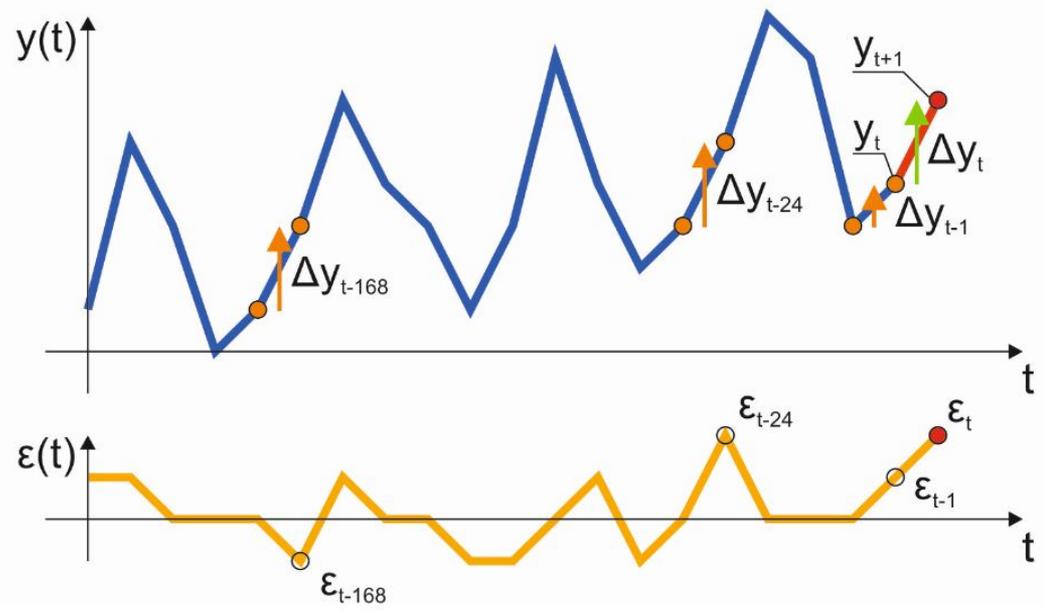
$$Cost_{dist}^{el}(T) = 1000 \text{ Kč/MWh}$$

Общая цена за природный газ:

$$Cost^{gas} = 800 \text{ Kč/MWh}$$

Общая цена за энергоснабжение микросети на интервале [1;T] (ч):

$$Cost_{mg}(T) = \sum_{t=1}^T Cost^{el}(t) \cdot P_{MG}^{el}(t) + |Cost_{dist}^{el}(t) \cdot P_{MG}^{el}(t)| + Cost^{gas} \cdot P_{MG}^{gas}(t)$$



Общая цена за электричество:

$$Cost^{EL}(t) = Cost^{el}(t) + Cost_{dist}^{el}$$

Цена за дистрибуцию электричества:

$$Cost_{dist}^{el} = 1000 \text{ Kč/MWh}$$

Цена за электричество $Cost^{el}(t)$ взята с рынка на день вперед (DAM) за 2018

Общая цена за природный газ:

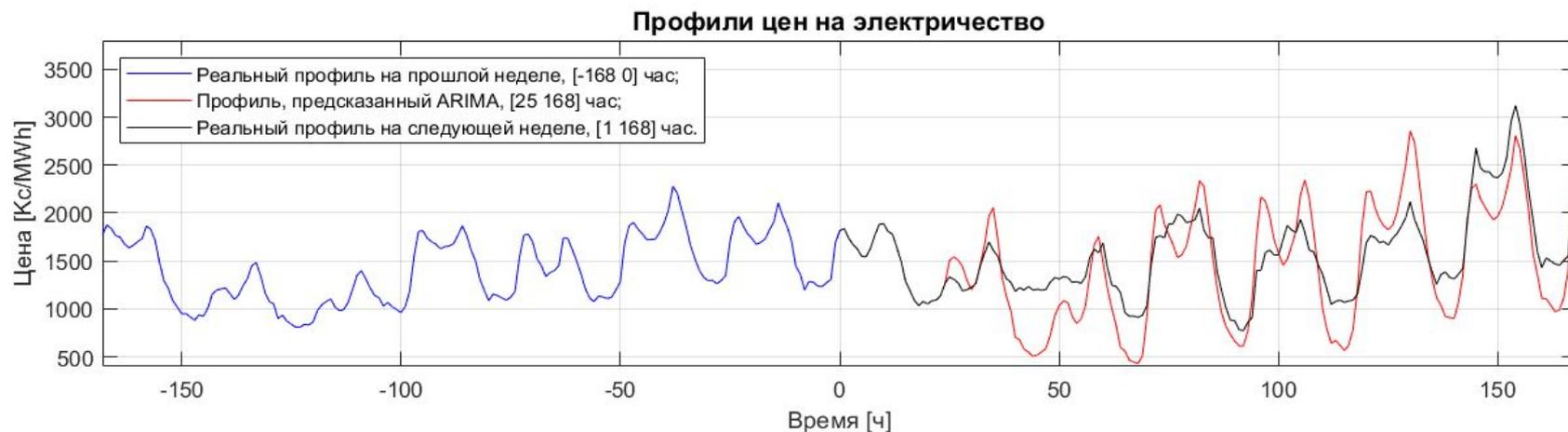
$$Cost^{gas} = 800 \text{ Kč/MWh}$$

Общая цена за энергоснабжение микросети на интервале [1;T] (ч):

$$Cost_{mg}(T) = \sum_{t=1}^T Cost^{el}(t) \cdot P_{MG}^{el}(t) + |Cost_{dist}^{el}(t) \cdot P_{MG}^{el}(t)| + Cost^{gas} \cdot P_{MG}^{gas}(t)$$

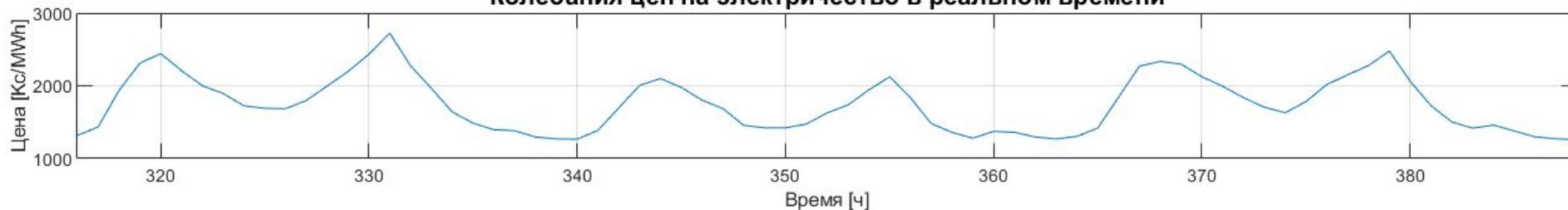
ПРИМЕР РАБОТЫ БЛОКА ГЕНЕРАЦИИ ГОРИЗОНТОВ НА

ГЕНЕРАЦИИ ГОРИЗОНТОВ НА

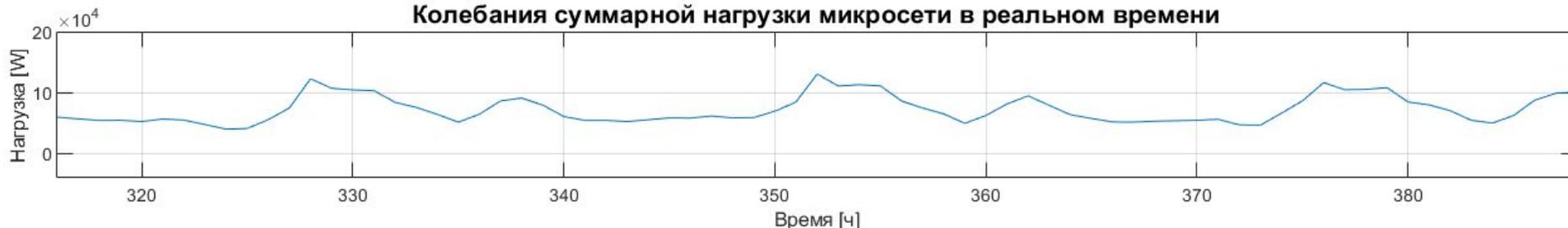


РАБОТА УМНОЙ МИКРОСЕТИ С

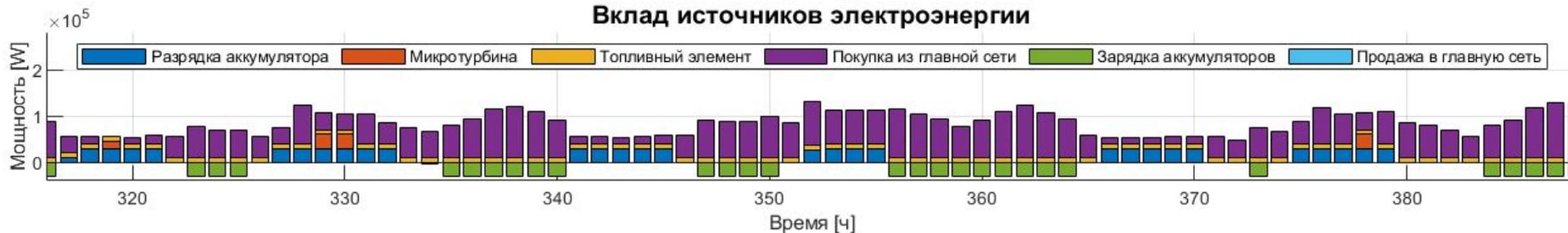
Колебания цен на электричество в реальном времени



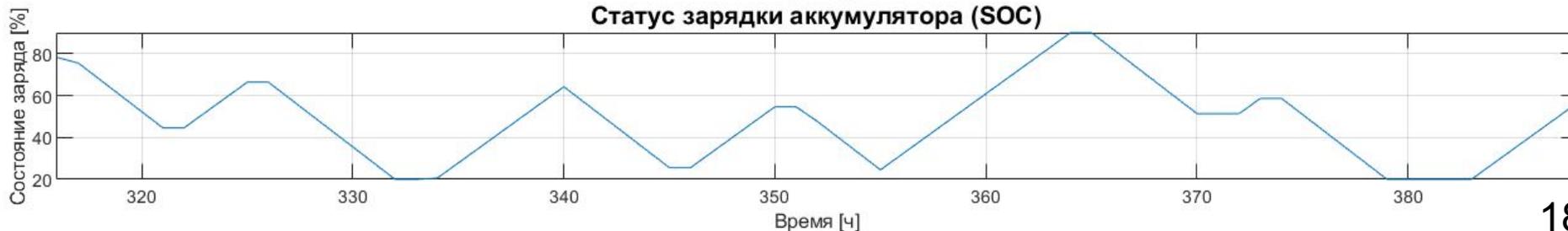
Колебания суммарной нагрузки микросети в реальном времени



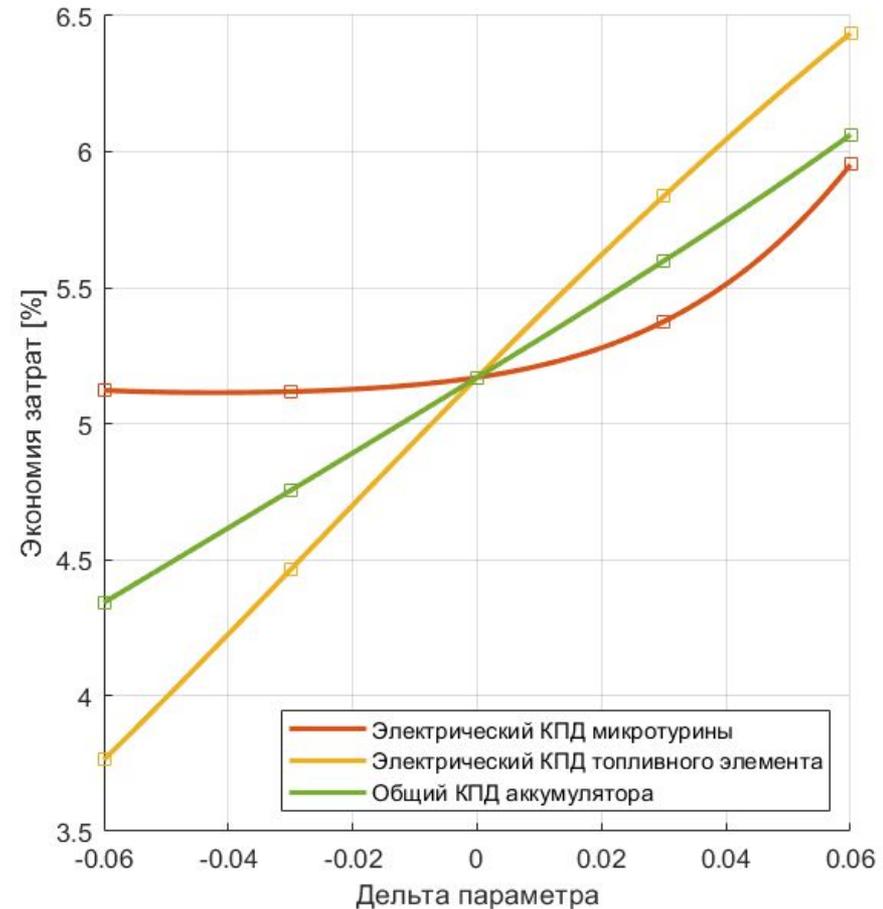
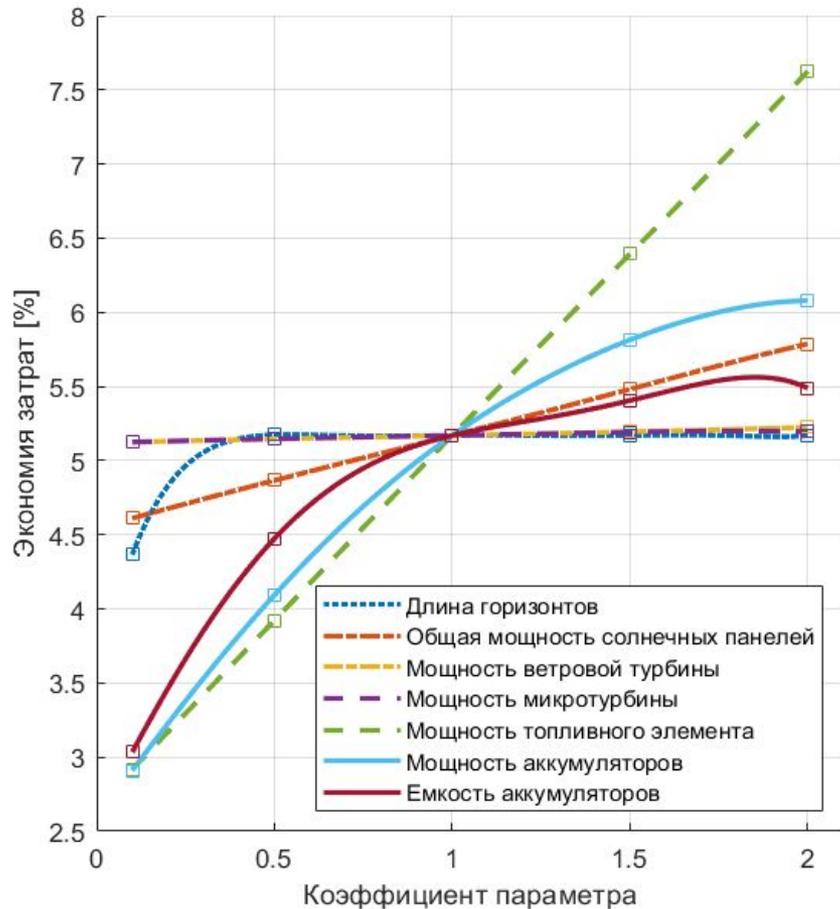
Вклад источников электроэнергии



Статус зарядки аккумулятора (SOC)



КАК ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УМНОЙ МИКРОСЕТИ ВЛИЯЕТ НА ОБЩУЮ



Общая цена за предоставленный газ: $Cost_{gas} = 1.500 \text{ \$/MWh}$
 Общая цена за энергоснабжение микросети на интервале [t, t+1] (€): $Cost_{total}(CO) = \sum_{i=1}^N Cost_{i}(CO) + P_{gas}(CO) + |Cost_{acc}(t) - P_{acc}(CO)| + Cost_{em}(t) + P_{em}(CO)$

Общая цена за предоставленный газ: $Cost_{gas} = 500 \text{ \$/MWh}$
 Общая цена за энергоснабжение микросети на интервале [t, t+1] (€): $Cost_{total}(CO) = \sum_{i=1}^N Cost_{i}(CO) + P_{gas}(CO) + |Cost_{acc}(t) - P_{acc}(CO)| + Cost_{em}(t) + P_{em}(CO)$

ВОЗМОЖНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ УМНОЙ МИКРОСЕТИ

Аккумулятор:

Увеличена мощность – в 5 раз;
 Увеличена емкость – в 5 раз;
 Увеличено КПД – до 0.94.

Топливный элемент:

Увеличена мощность – в 1.5 раз;
 Увеличено КПД – до 0.45.

Микротурбина:
 Отключена.

Солнечные панели:

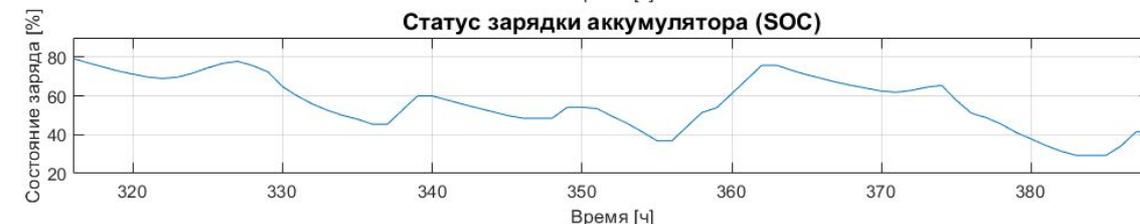
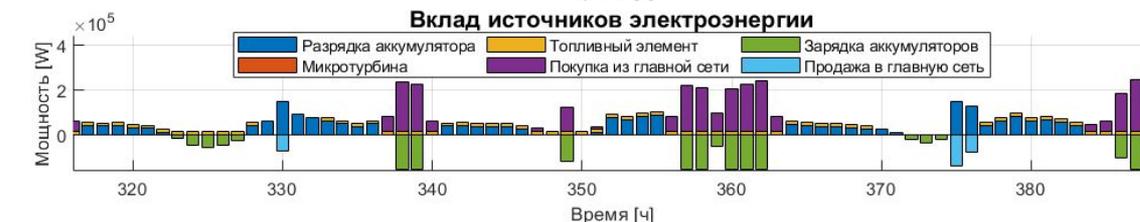
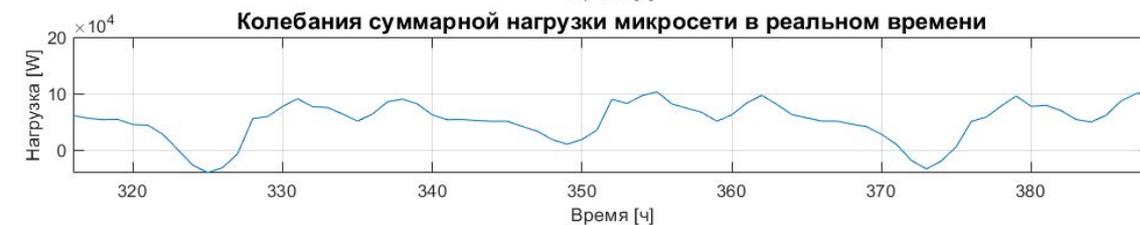
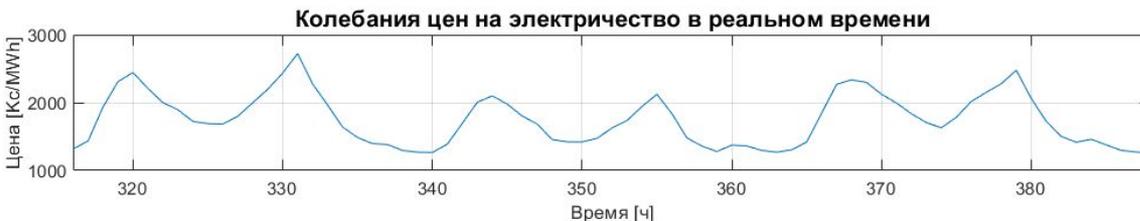
Увеличена площадь – в 3.5 раза.

Длина горизонтов – 3 дня.

Экономия затрат достигает ²⁰

21%

www.nstu.ru



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

- Модель микросети выбранного объекта с распределенными источниками питания была создана;
- Был синтезирован Economic MPC который позволяет минимизировать эксплуатационные затраты конечных пользователей. Он включает в себя следующие части:
 - часть генерации горизонтов, которая основана на ARIMA моделях;
 - часть минимизации затрат, которая основана на смешано-целочисленном линейном программировании (MILP).
- Было изучено влияние параметров умной микросети на общую экономию затрат;
- Были предложены различные концепты умной микросети.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ЗА ВРЕМЯ ОБУЧЕНИЯ В МАГИСТРАТУРЕ

• П.М. Ведель. Исследование модели гидравлической системы в MatLab Simscape. НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. №1 (23). С. 61–70.

• П.М. Ведель, Н.Ю. Овчинникова. Моделирование и оптимизация в реальном времени умной микросети электропитания района с распределенными источниками энергии. НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2019. Принята к печати.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ УМНОЙ МИКРОСЕТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЫ

Выполнил:

Веделё Павел Михайлович

Научный руководитель:

д-р техн. наук, доцент

Французова Галина Александровна



**НГТУ
НЭТИ**

Новосибирский
государственный
технический
университет

nstu.ru

ПРИНЦИП РАБОТЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ (MPC)

