

Команда проекта:

Цыденов Е.А., вып., преп.

Конухов А.В., студ.

Рец В.В., студ.

Кац И.М., преп.

Васильев А.С., преп.

Чухманов В.Ю., вып.

Чернобров М.Е., вып.

Копцев И.О., студ.

Малов А.Р., студ.

Коновалова Е.А., студ.

Бачевский В.А., студ.

Арефьев П.В., студ.

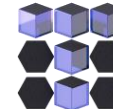
Белокуров Д.В., студ.

Шлапак М.Р., студ.

Едакин К.И., студ.



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ**

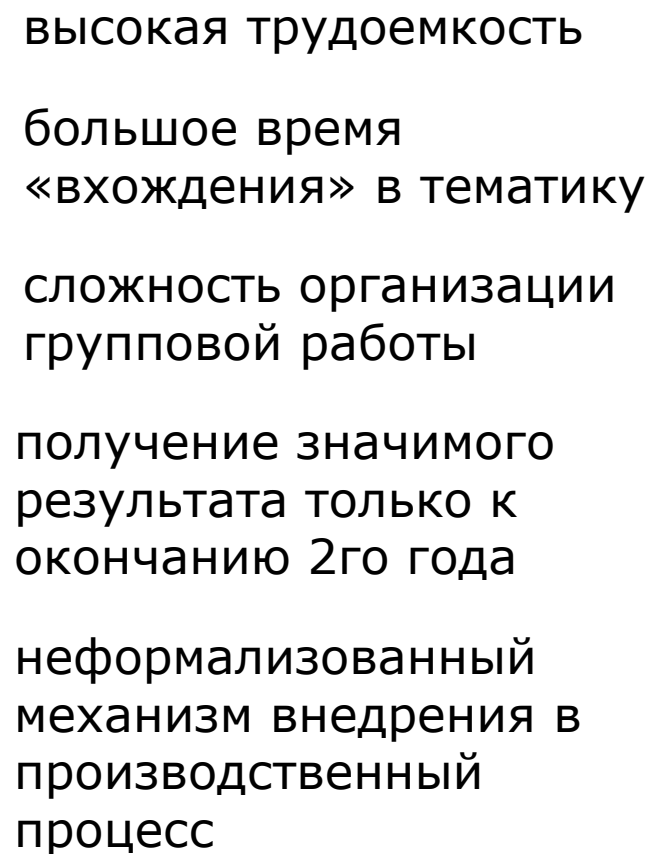


**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
ОПТИМИЗАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И АНАЛИТИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЕВОГО УЧАСТИЯ
ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И
ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ
(СОМА.КДУ.АРЧМ)**

Прохоров Антон Викторович

к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ

07.12.2023



УРОВНИ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ



РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА СОМА.КДУ.АРЧМ В 2023 (АПРЕЛЬ-ДЕКАБРЬ)

1. Проектирование программного обеспечения:

- *Разработаны требования к программному обеспечению,*
- *Разработан комплект документации на программное обеспечение:*
 - *описание программного обеспечения;*
 - *описание вариантов использования, диаграммы деятельности;*
 - *описание компонентов программного обеспечения;*
 - *описание программных интерфейсов;*
 - *макет пользовательского интерфейса,*

2. Программная реализация и тестирование:

- *выполнена программная реализация основных компонентов программного обеспечения (ПО);*
- *завершается интеграция компонентов ПО и отладка их взаимодействия (реализация прототипа (MVP));*
- *завершается тестирование компонентов ПО на примере расчетов для:*
 - АОП-517 (КС Красноярск, Хакасия – Запад)*
 - АРПЧ(АРП)-551 (КС Казахстан-Сибирь-1)*

НАЗНАЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ

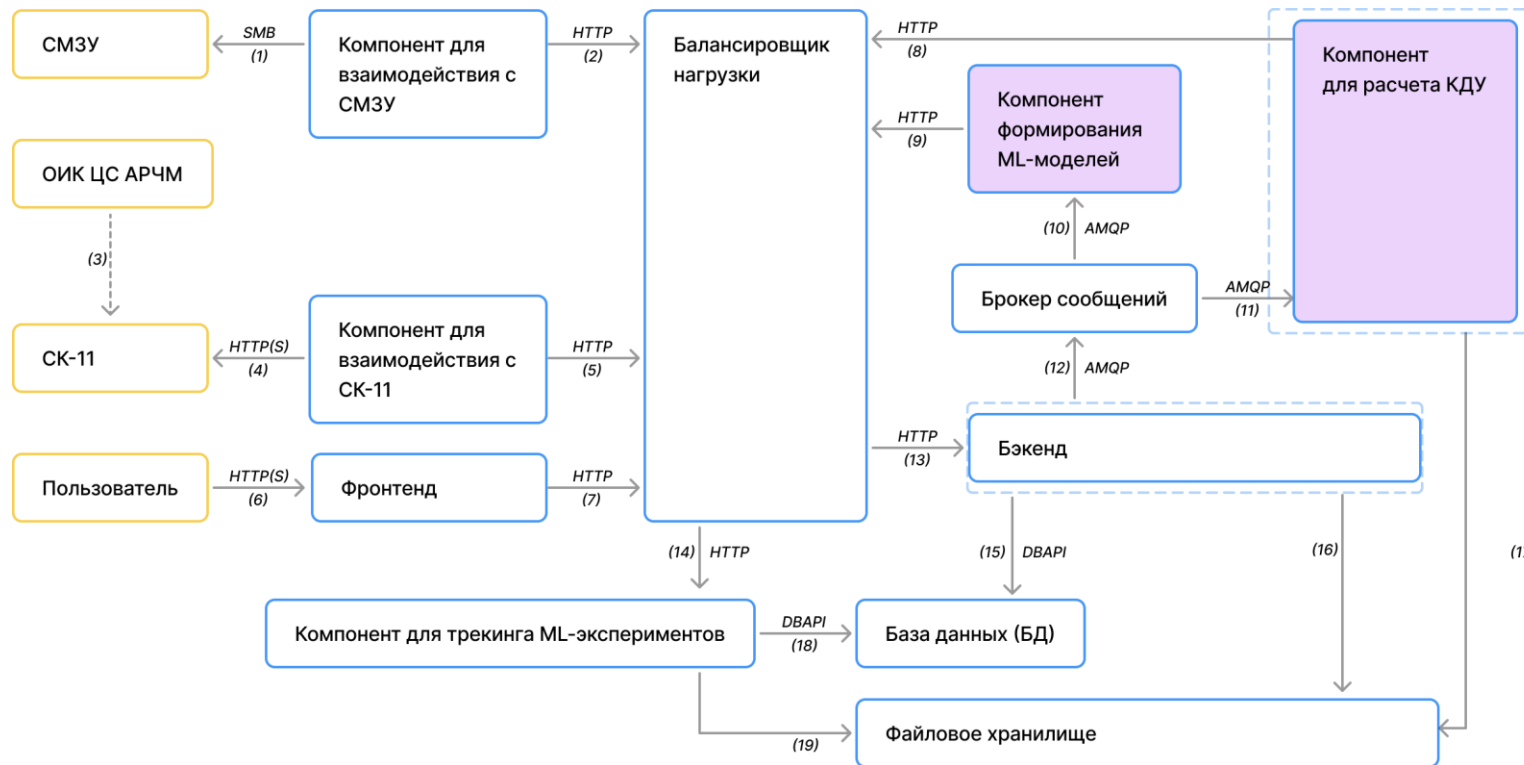
Существующие ограничения:

- КДУ заданные не учитывают текущей схемно-режимной ситуации;
- КДУ фактические пересчитываются только при неучастии/исчерпании резервов РЭС;
- при регулировании/ограничении перетока в КС в автоматическом режиме не учитывается влияние на смежные сечения.

Онлайн расчет КДУ позволит:

- **использовать наиболее эффективные РЭС** в текущей схемно-режимной ситуации;
- **обеспечить селективность АРЧМ** и сокращение случаев блокировки действий регуляторов со стороны ограничителей;
- **повысить КИУМ СЭС и ВЭС** при применении системы АРЧМ для ограничения их выработки;
- **автоматически исключать РЭС**, не имеющие электрических связей с контролируемым сечением после деления энергосистемы.

АРХИТЕКТУРА СОМА.КДУ.АРЧМ



- (1), (2), (13) — получение модели ЭЭС из ИУС CMЗУ;
- (3), (4), (5), (13) — получение оперативной информации и данных о работе ЦС АРЧМ из СК-11;
- (6), (7), (13) — взаимодействие пользователя с системой посредством веб-приложения;
- (12), (11) — отправка задания на расчет КДУ;
- (12), (10) — отправка задания на формирование модели машинного обучения;
- (9), (14), (18), (19), (13) — логирование процесса формирования модели машинного обучения;
- (15), (16) — взаимодействие бэкенда с базой данных и файловым хранилищем для записи и чтения информации;
- (17), (8), (13) — чтение исходных данных и запись результатов расчета КДУ.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ КДУ

Модулем расчета КДУ решается
многокритериальная задача оптимизации с
ограничениями

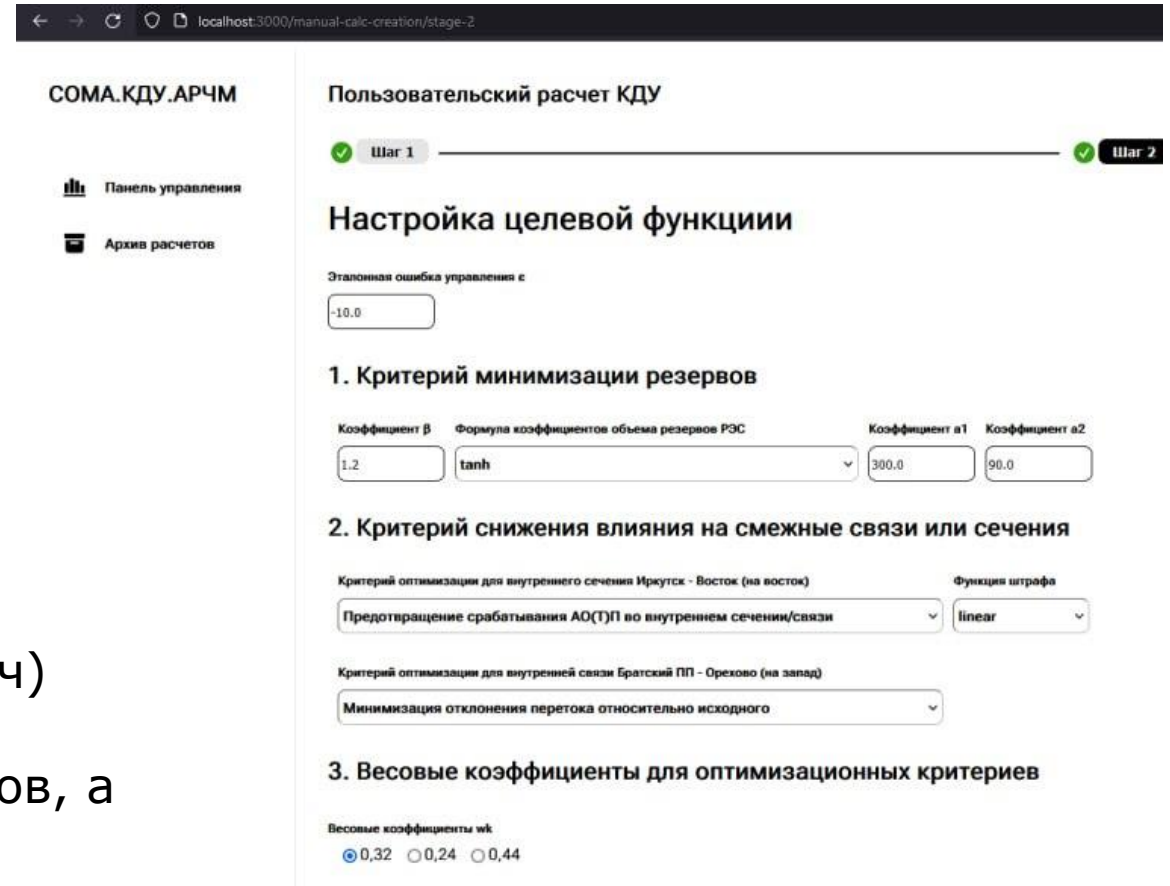
$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \sum_{k=1}^K w_k (f_k(\mathbf{x}))^\gamma \\ \text{s.t.} \quad & c_m^{\text{EQ}}(\mathbf{x}) = 0 \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \\ & c_l^{\text{INEQ}}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall l \in \{1, \dots, L\} \end{aligned}$$

где весовые коэф, $w_k \geq 0$ и $\sum_{k=1}^K w_k = 1$

$\gamma = 1, 2$ (рекомендовано для невыпуклых задач)

ограничения учитываются при помощи штрафов, а
оптимизационная модель имеет вид:

$$\min_{\mathbf{p}^{\text{G.AGC}}} \sum_{k=1}^K w_k (f_k(\mathbf{p}^{\text{G.AGC}}))^\gamma + \phi(\mathbf{p}^{\text{G.AGC}})$$

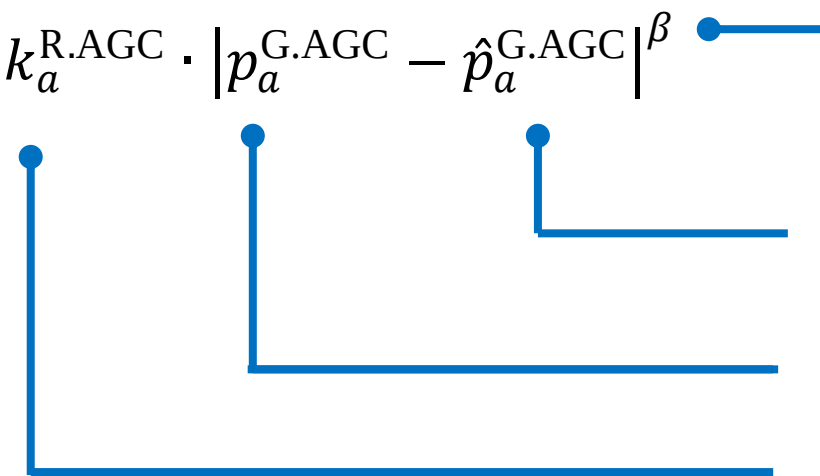


The screenshot shows a web application interface for 'СОМА.КДУ.АРЧМ'. The main section is titled 'Пользовательский расчет КДУ' and features a progress bar with two steps: 'Шаг 1' (completed) and 'Шаг 2' (active). The current step is 'Настройка целевой функции'. Below this, there are several configuration options:

- Эталонная ошибка управления ϵ** : A text input field with the value '-10.0'.
- 1. Критерий минимизации резервов**: A section with four input fields: 'Коэффициент β ' (1.2), 'Формула коэффициентов объема резервов РЭС' (tanh), 'Коэффициент $a1$ ' (300.0), and 'Коэффициент $a2$ ' (90.0).
- 2. Критерий снижения влияния на смежные связи или сечения**: A section with two dropdown menus. The first is 'Критерий оптимизации для внутреннего сечения Иркутск - Восток (на восток)' with the selected option 'Предотвращение срабатывания АО(Т)П по внутреннем сечении/связи'. The second is 'Функция штрафа' with the selected option 'linear'.
- 3. Весовые коэффициенты для оптимизационных критериев**: A section with a label 'Весовые коэффициенты w_k ' and three radio buttons: 0,32 (selected), 0,24, and 0,44.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ КДУ

Основной критерий оптимизации – минимизация использования вторичных резервов

$$f_1(\mathbf{p}^{\text{G.AGC}}) = \sum_{a=1}^A k_a^{\text{R.AGC}} \cdot |p_a^{\text{G.AGC}} - \hat{p}_a^{\text{G.AGC}}|^\beta$$


- положительная константа, определяющая равномерность расходования вторичных резервов
- начальная загрузка станции
- конечная загрузка
- коэффициенты, заданные в соответствии с располагаемым объемом вторичных резервов

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ КДУ

1. ***tanh*** — значения коэффициентов для резервов РЭС на загрузку определяются согласно:

$$k_a^{\text{R.AGC}} \left(\bar{p}_a^{\text{R.AGC}} \right) = 1 - \tanh \left(\frac{\min \left(\bar{p}_a^{\text{R.AGC}}, \alpha_1 \right)}{\alpha_2} \right) \quad \forall a \in \{1, \dots, A\}$$

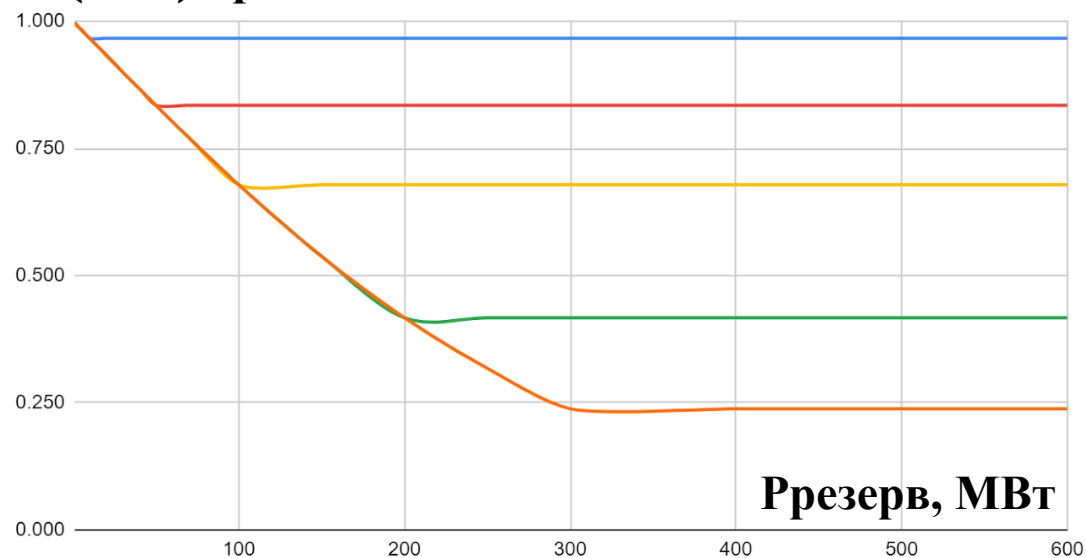
2. ***linear*** — значения коэффициентов определяются пропорционально располагаемому объему резерва:

$$k_a^{\text{R.AGC}} \left(\bar{p}_a^{\text{R.AGC}} \right) = 1 - \frac{\min \left(\bar{p}_a^{\text{R.AGC}}, \alpha_1 \right)}{\alpha_1} \quad \forall a \in \{1, \dots, A\}$$

где $\alpha_{1-2} \in \mathbb{R}$ — заранее заданные положительные коэффициенты

3. ***const*** — значения коэффициентов постоянны и не зависят от объемов резервов

ka (tahn) при a1 = var, a2 = const

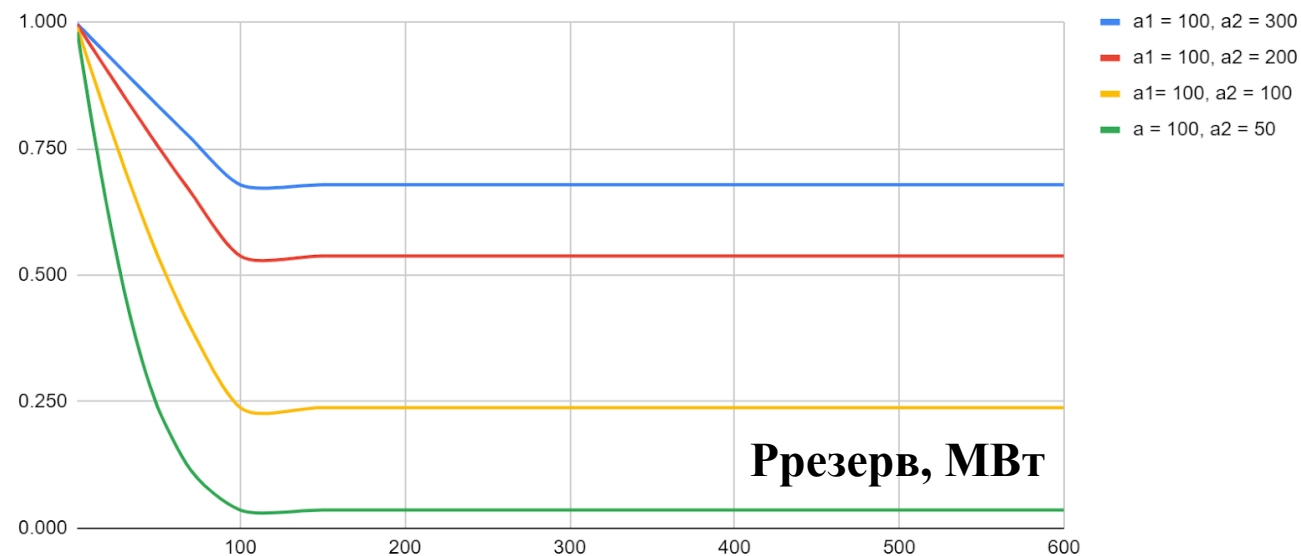


- a1 = 10, a2 = 300
- a1 = 50, a2 = 300
- a1 = 100, a2 = 300
- a1 = 200, a2 = 300
- a1 = 300, a2 = 300

a1 определяет ниже какой величины резерва алгоритм должен снизить степень его расходования

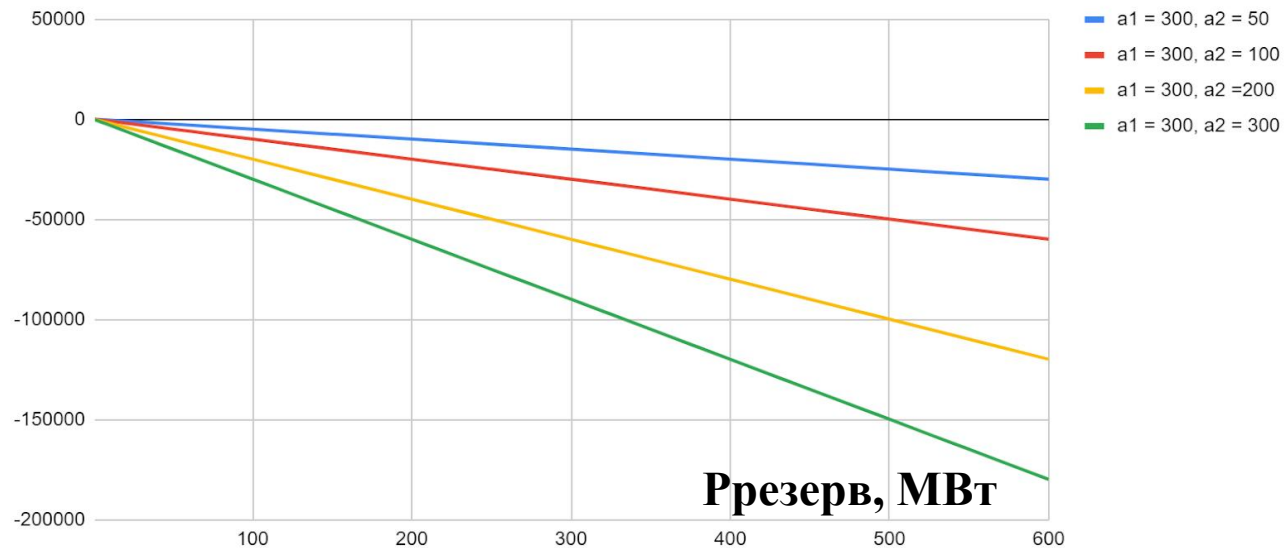
если от алгоритма требуется делать большие различия между разными величинами резервов, то следует уменьшать **a2**

ka (tahn) при a1 = const, a2 = var



- a1 = 100, a2 = 300
- a1 = 100, a2 = 200
- a1 = 100, a2 = 100
- a1 = 100, a2 = 50

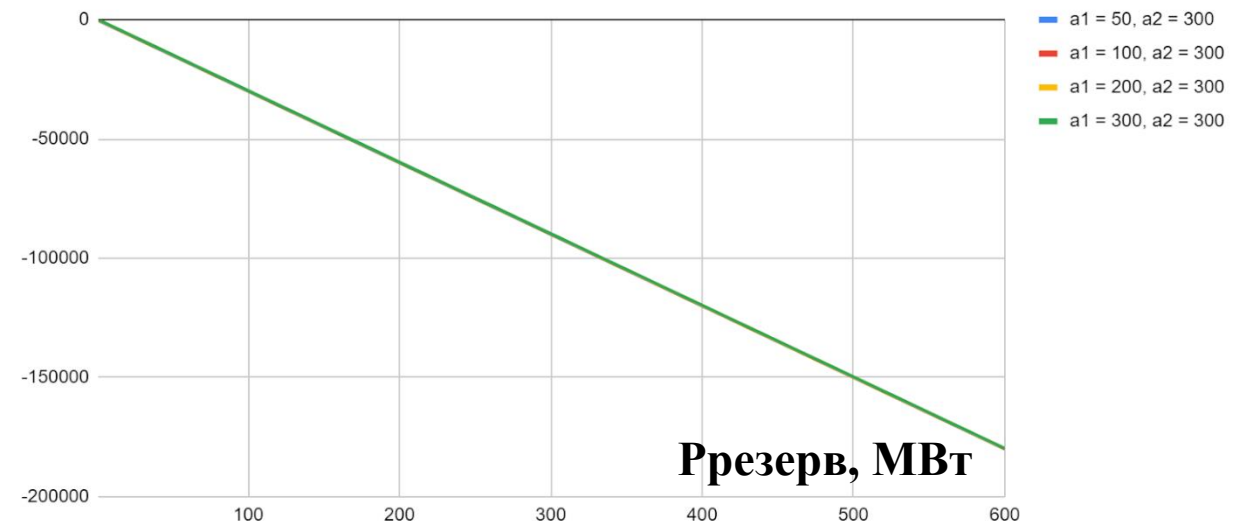
ka (linear) при $a_1 = \text{const}$, $a_2 = \text{var}$



увеличение a_1 при постоянном a_2 приводит к параллельному смещению характеристики по оси ординат на величину разницы между a_1 и a_2

при увеличении коэффициента a_2 различие между весами станций с меньшим и большим резервом увеличивается

ka (linear) при $a_1 = \text{var}$, $a_2 = \text{const}$



ПРИМЕР 1. СРАВНЕНИЕ НАСТРОЕК ЦФ

Расчет КДУ **АОП-517** для режима с меткой времени **2023-04-07-00-01-14**, иллюстрирующие особенности различных настроек целевой функции,

Заданы настройки:

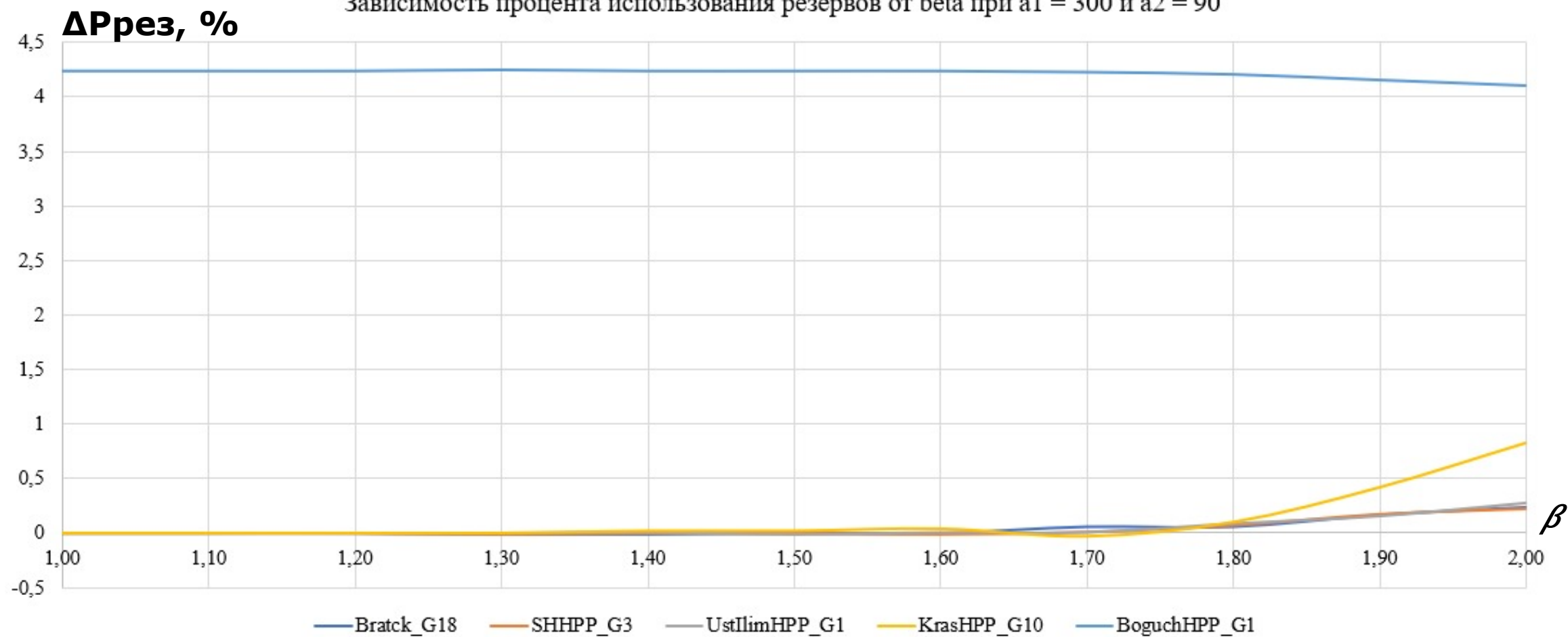
$\beta = 1,2$; $a1 = 300$; $a2 = 90$;

алгоритм оптимизации: *дифференциальная эволюция*

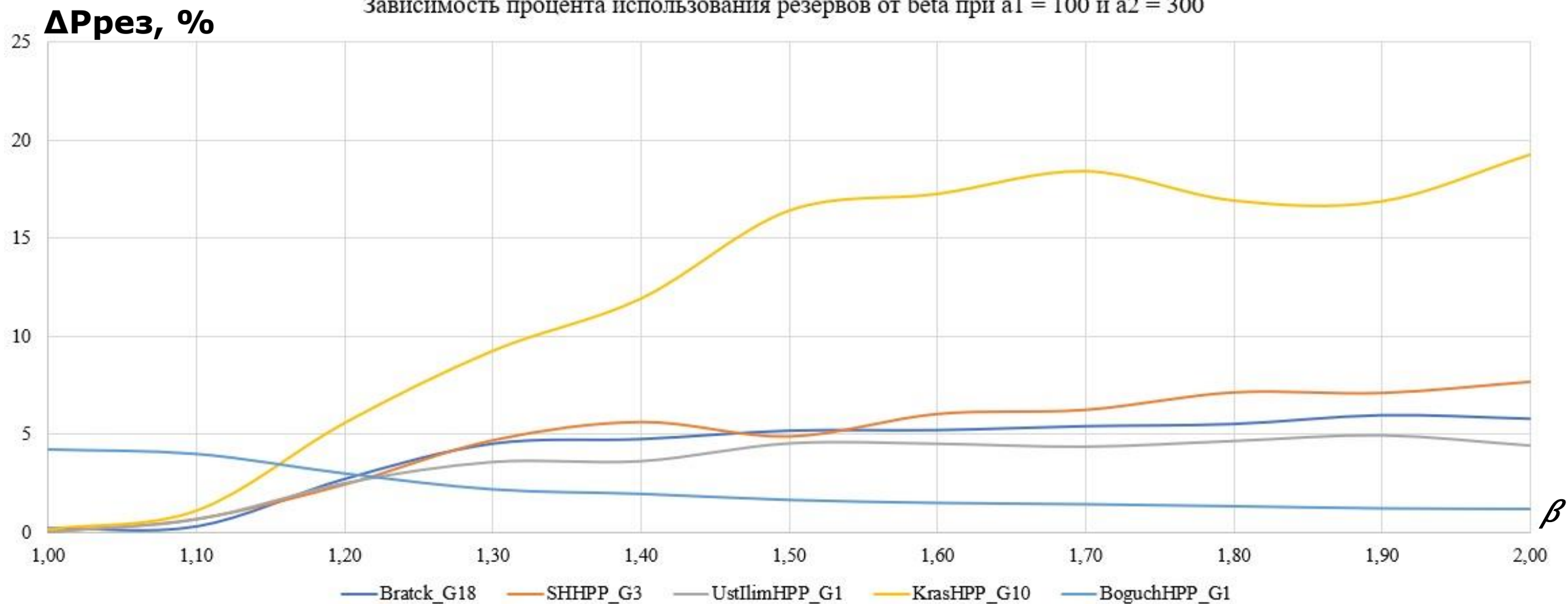
ошибка регулирования: - 10 МВт

РЭС	Резерв на разгр., МВт	КДУ, %			
		a1=300, a2 =90			a1=100, a2 =300
		const	linear	tanh	tanh
Братская ГЭС	35,709	23,36	0,05	0	17,68
Саяно-Шушенская ГЭС	27,651	18,47	0,13	0	8,34
Усть-Илимская ГЭС	43,891	17,82	0,18	0	17,41
Красноярская ГЭС	10,000	19,30	0,12	0	11,36
Богучанская ГЭС	271,598	21,05	99,53	100	45,20
Расход резерва, МВт		11,164	11,516	11,523	11,252

Зависимость процента использования резервов от β при $a_1 = 300$ и $a_2 = 90$



Зависимость процента использования резервов от β при $a_1 = 100$ и $a_2 = 300$

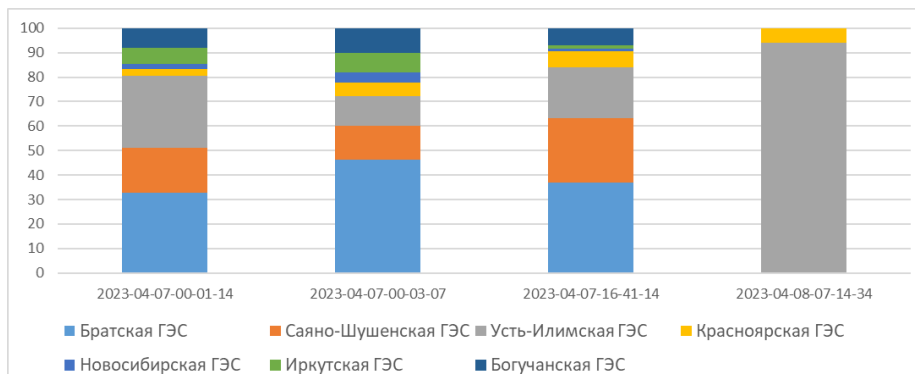


ПРИМЕР 2. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

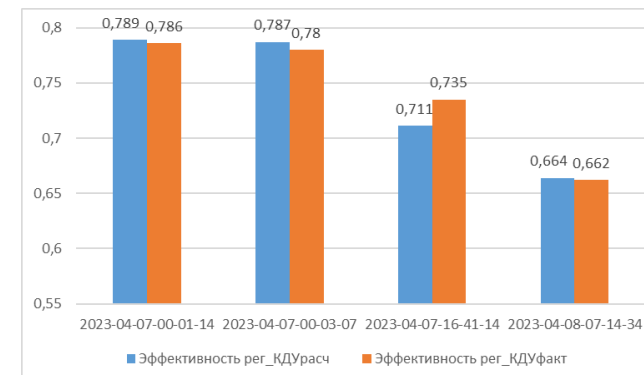
Сопоставление значений КДУ **АРПЧ-551**, рассчитанных СОМА, КДУ и фактически заданных в АРЧМ

КДУрасч

$\beta = 1,2$
 $a1 = 100$
 $a2 = 300$

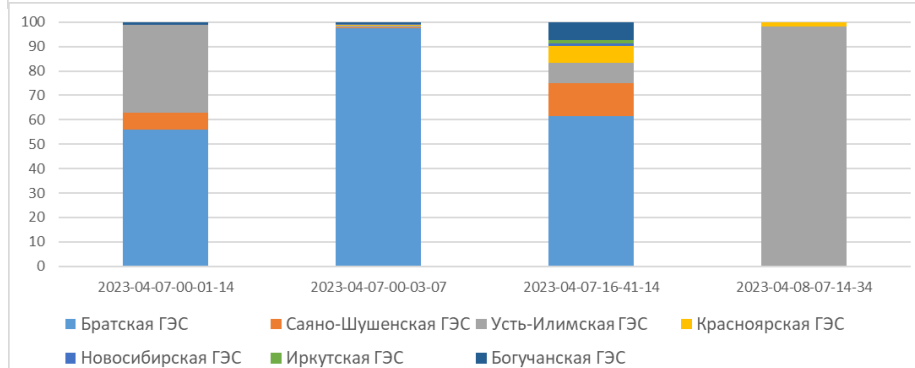


$\Delta R_{кс}/R_{звм\Sigma}$

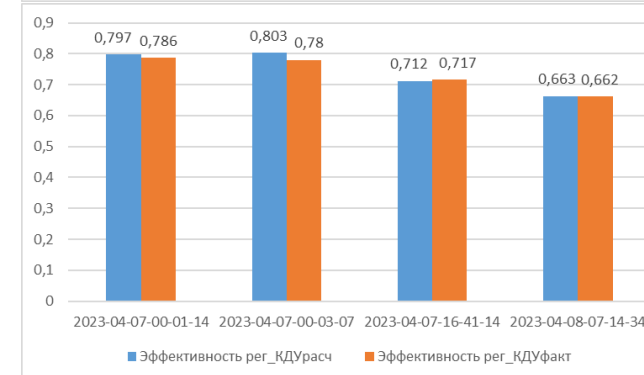


КДУрасч

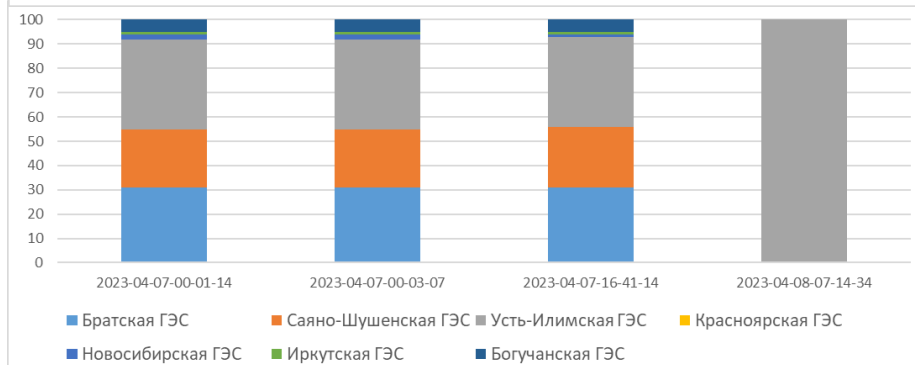
$\beta = 1,2$
 $a1 = 100$
 $a2 = 100$



$\Delta R_{кс}/R_{звм\Sigma}$



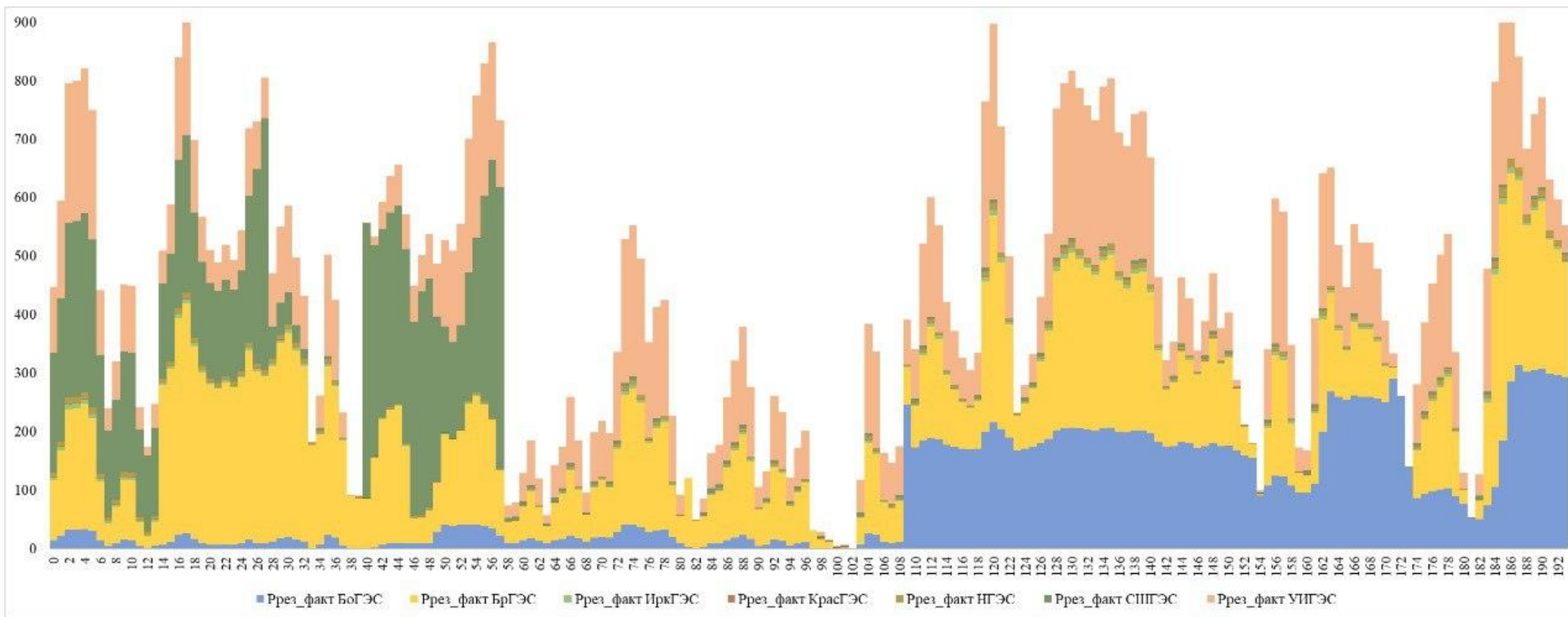
КДУфакт



Повышение эффективности за счет снижения потерь (грубая оценка): при суммарном ЗВМ 10 МВт снижение потерь в среднем на 100 кВт, т.е, при уставке 500 МВт снижение потерь на 5 МВт,

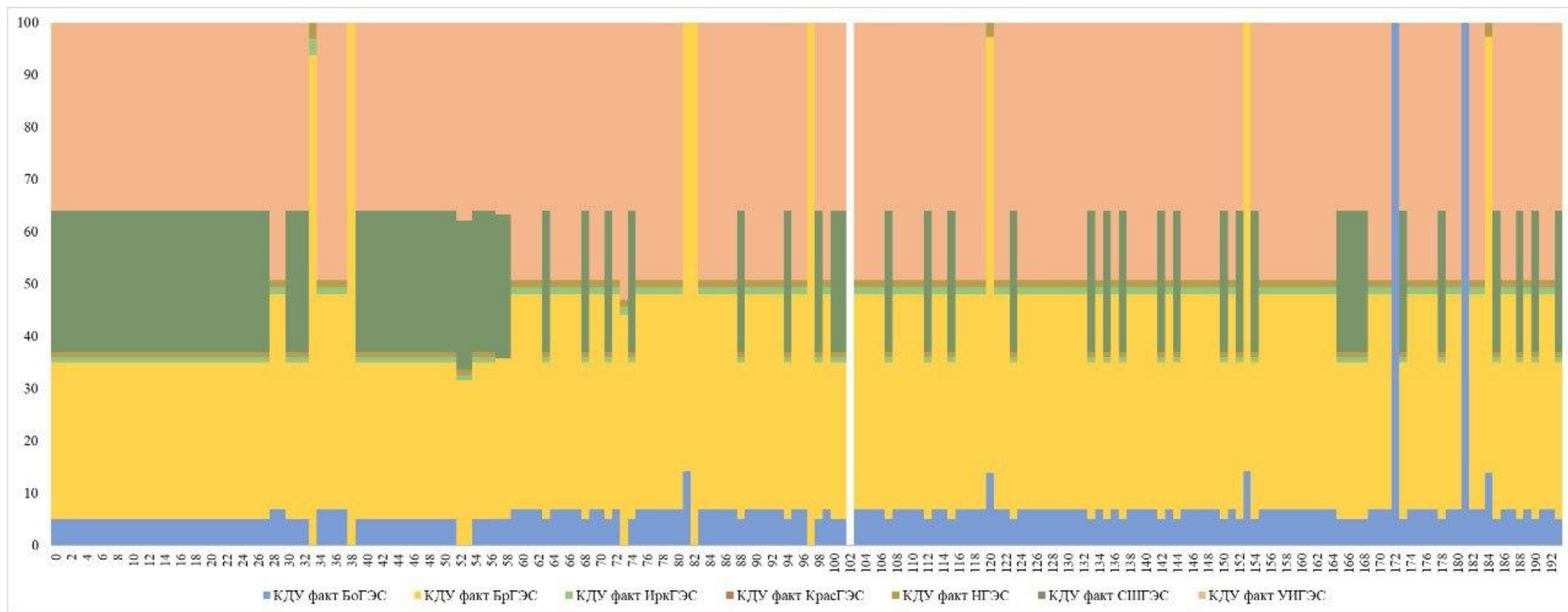
ПРИМЕР 3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ КДУ

Сопоставление значений КДУ **АРПЧ-551**, рассчитанных СОМА, КДУ и фактически заданных в АРЧМ за период **08.04.2023 10:08:14 до 08.04.2023 16:45:34**



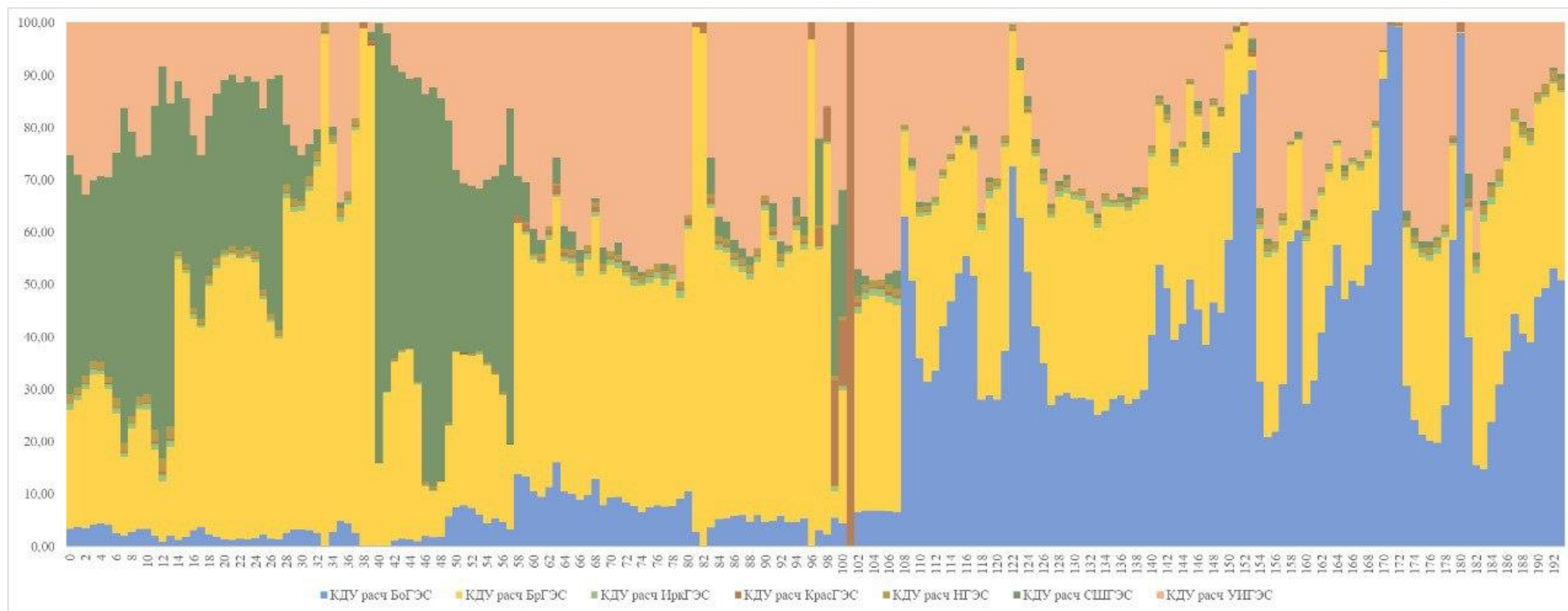
Резервы РЭС по данным ОИК

ПРИМЕР 3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ КДУ



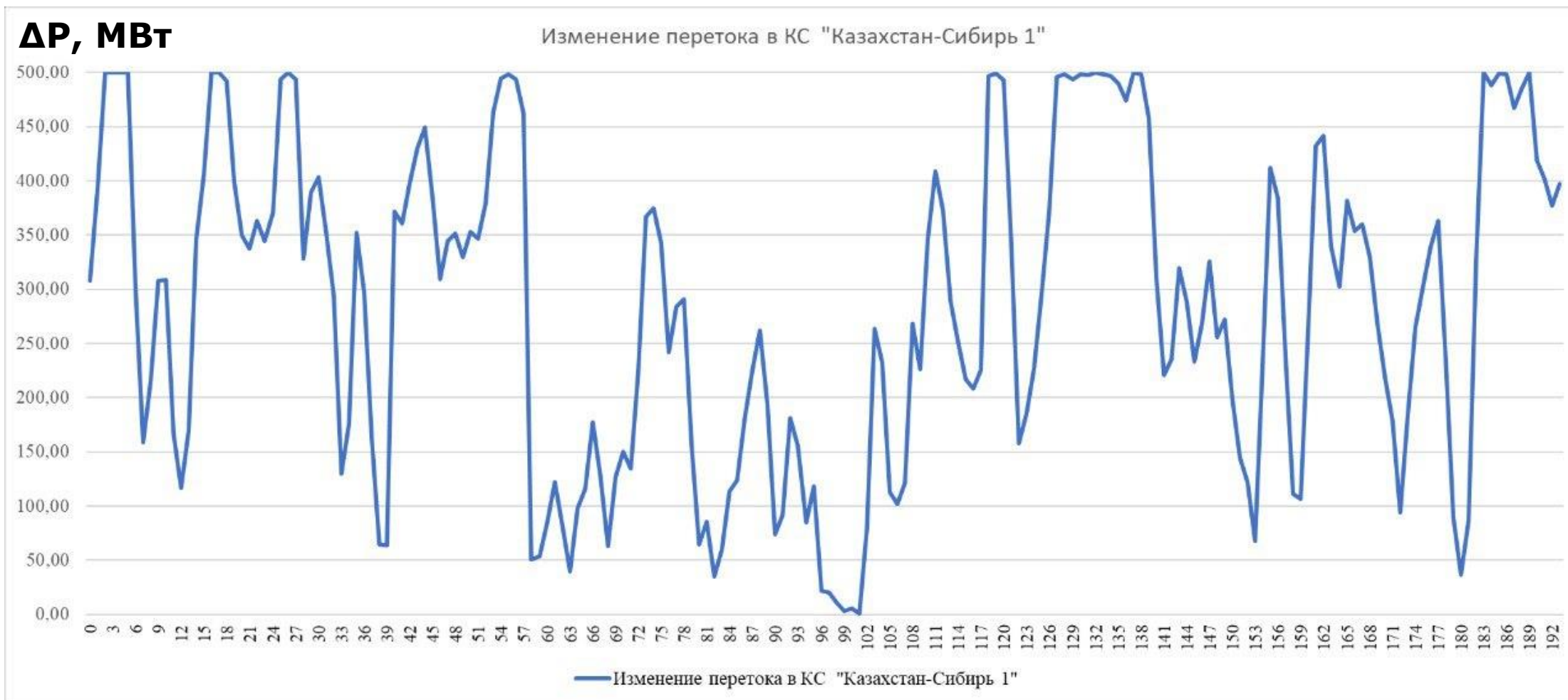
Фактические КДУ по данным ОИК

ПРИМЕР 3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ КДУ

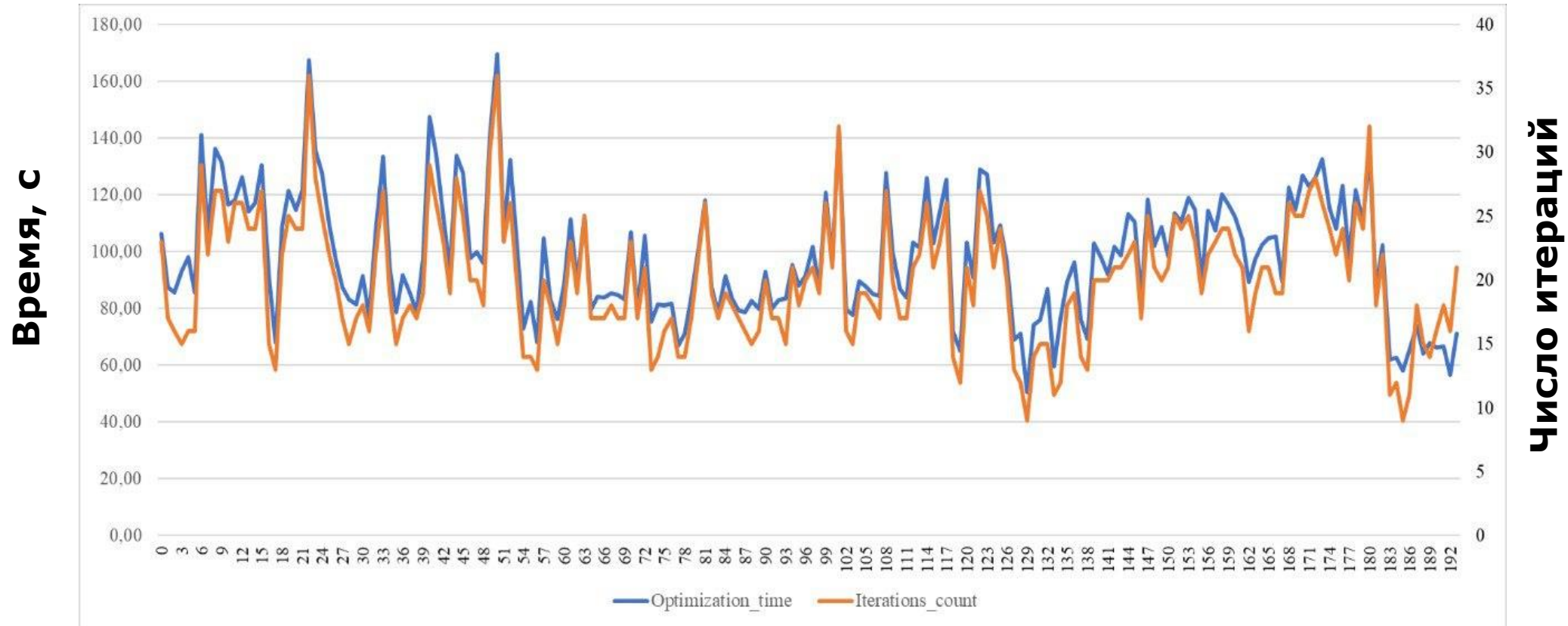


КДУ, рассчитанные СОМА, КДУ (уставка регулятора 500 МВт)

ПРИМЕР 3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ КДУ



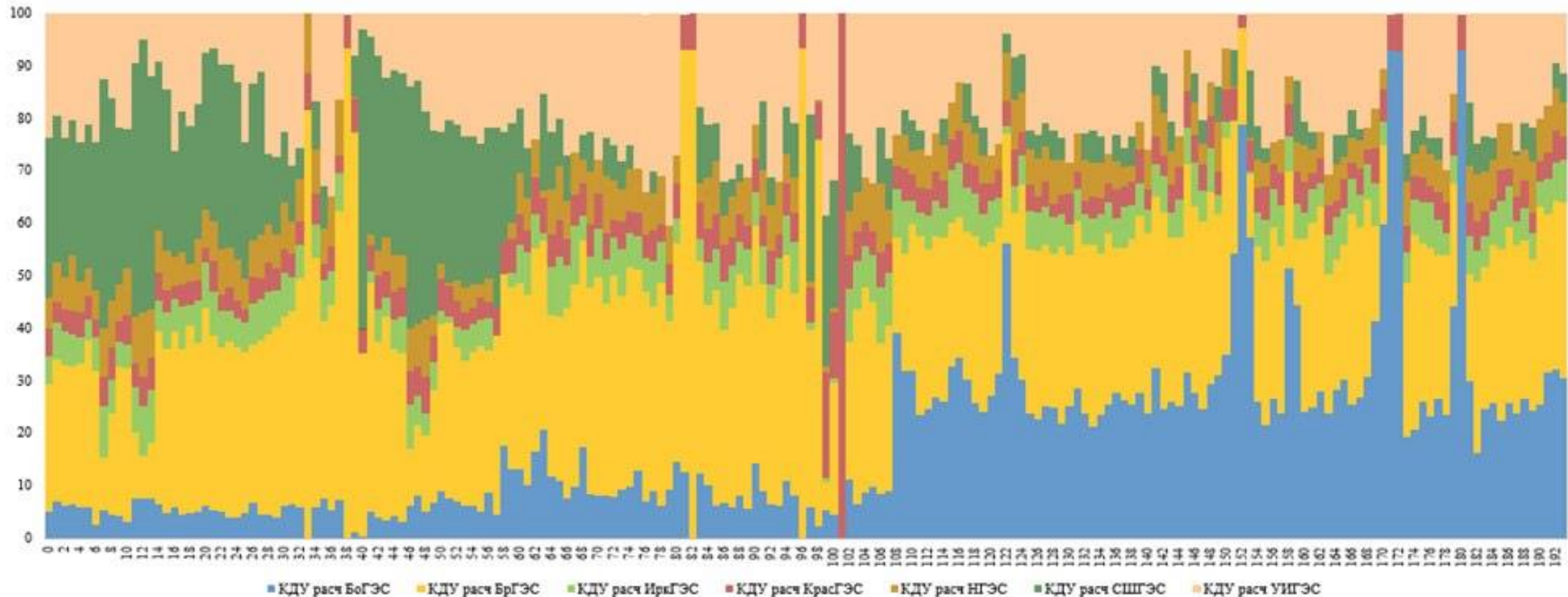
ПРИМЕР 3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ КДУ



Время расчета (optimization time), число итераций алгоритма (iterations count)

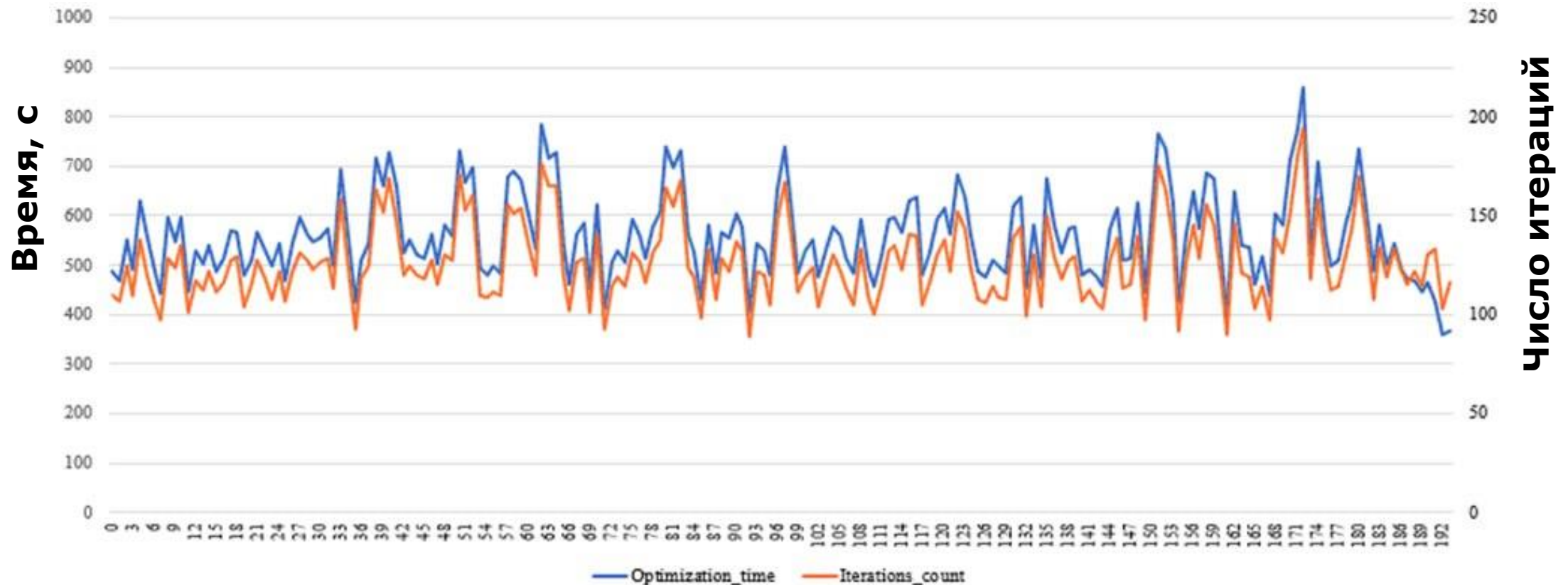
Характеристики ВМ: *Процессор AMD "Ryzen 7 5800X" (3,80GHz/8x512Kb +32Mb)*
ОЗУ Kingston FURY 2x16ГБ DDR4

ПРИМЕР 3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ КДУ



КДУ, рассчитанные СОМА, КДУ (ошибка регулирования 10 МВт)

ПРИМЕР 3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ КДУ

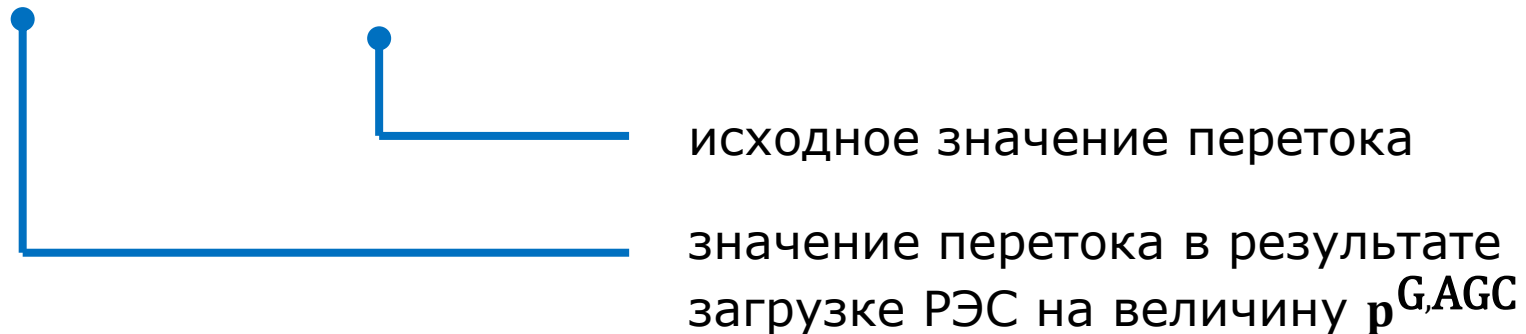


ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ КДУ

Дополнительные критерии:

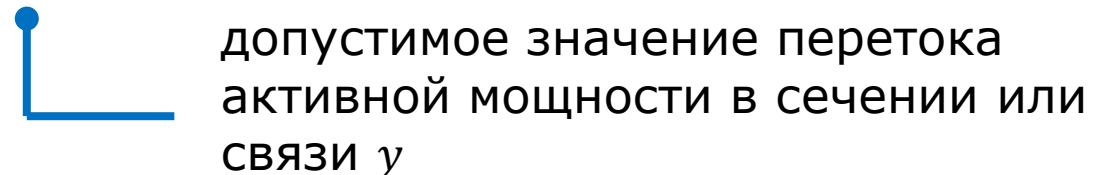
1. Минимизация отклонения перетока в сечении или связи y относительно исходного:

$$f_y(p^{G,AGC}) = |p_y^{FLOW}(p^{G,AGC}) - \hat{p}_y^{FLOW}|$$



2. Минимизация изменение перетока в y при превышении допустимого значения (ограничение перетока):

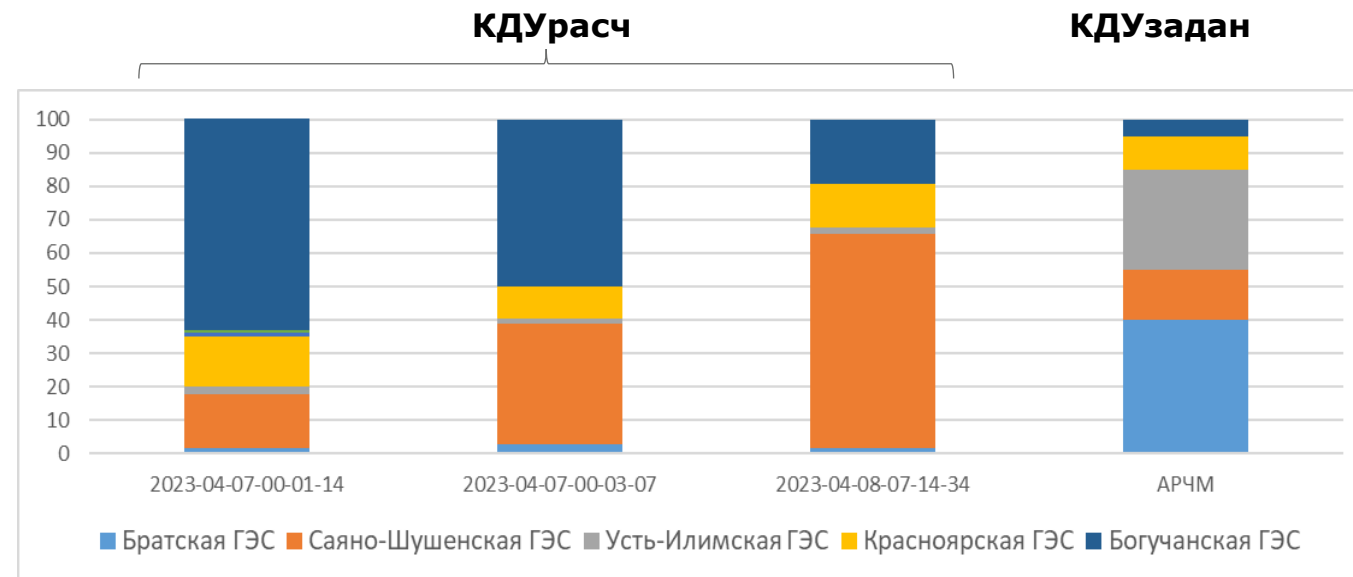
$$f_y(p^{G,AGC}) = \max(0, p_y^{FLOW}(p^{G,AGC}) - \bar{p}_y^{FLOW})$$



ПРИМЕР 4. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЦФ

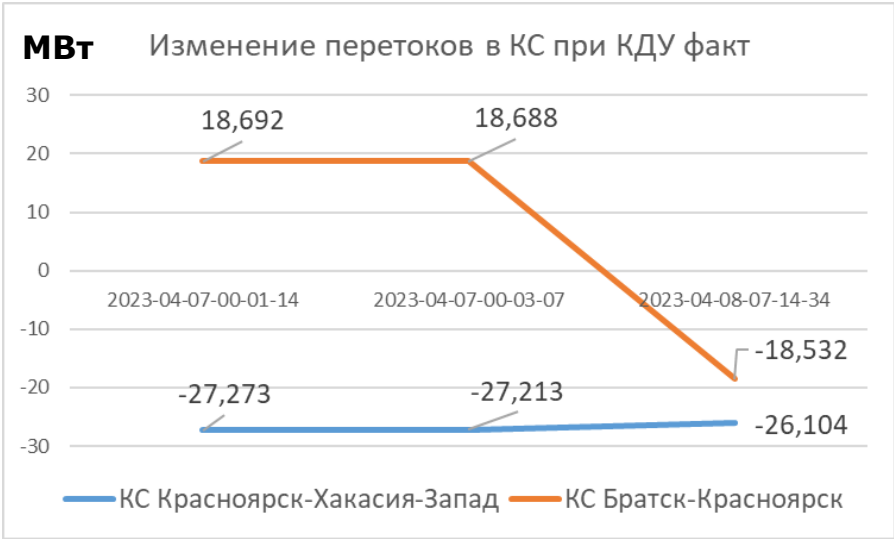
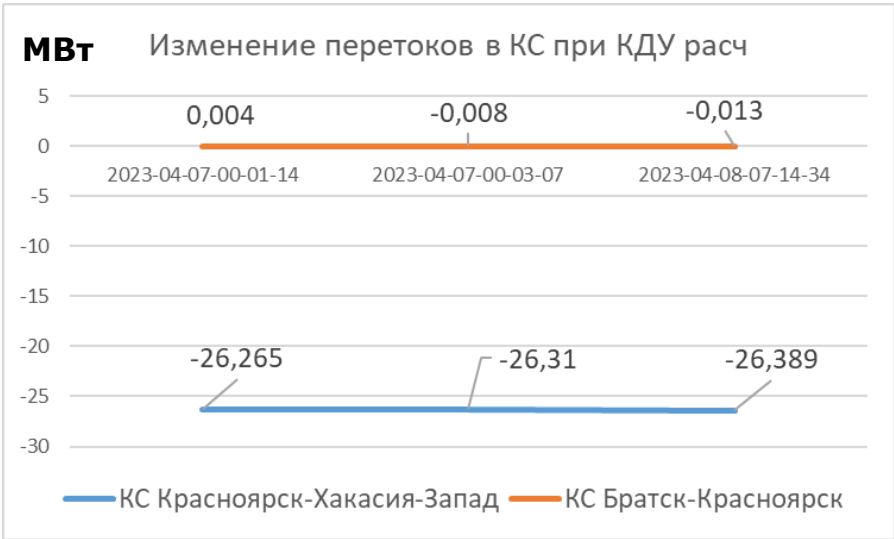
Расчет КДУ **АОП-517**,
доп. критерий:
минимизация отклонения перетока в
смежном КС

Заданы настройки:
Основное КС: Красноярск-Хакасия-Запад
Смежное КС: Братск-Красноярск
ЦФ: $\beta = 1,2$; $a1 = 100$; $a2 = 300$
весовые коэф, ЦФ: $w1 = 0,1$; $w2 = 0,9$
алгоритм оптимизации:
дифференциальная эволюция
ошибка регулирования: - 30 МВт



РЭС	Резерв, МВт		
	00-01-14	00-03-07	07-14-34
Братская ГЭС	35,709	91,555	375,683
Саяно-Шушенская ГЭС	27,651	70,642	451,658
Усть-Илимская ГЭС	43,891	109,633	227,517
Красноярская ГЭС	10,000	10,011	10,000
Богучанская ГЭС	271,598	279,811	40,999

ПРИМЕР 4. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЦФ

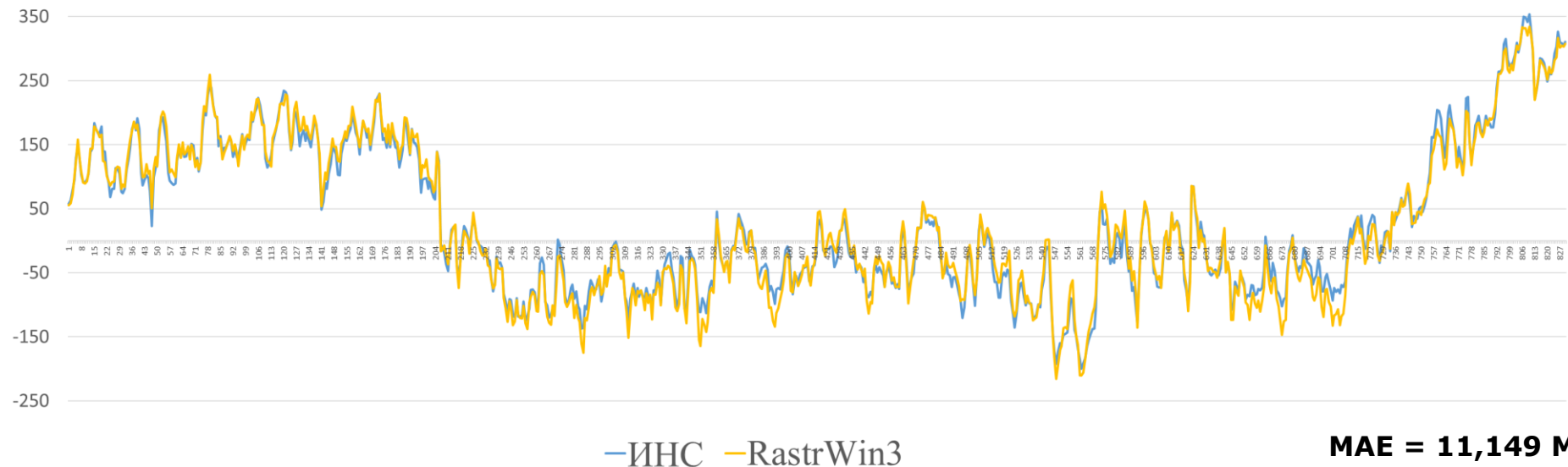


метка времени	2023-04-07-00-01-14	2023-04-07-00-03-07	2023-04-08-07-14-34
Количество итераций (1 критерий)	84	89	77
Количество итераций (2 критерия)	125	119	127

ПРИМЕНЕНИЕ ИНС ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАСЧЕТА

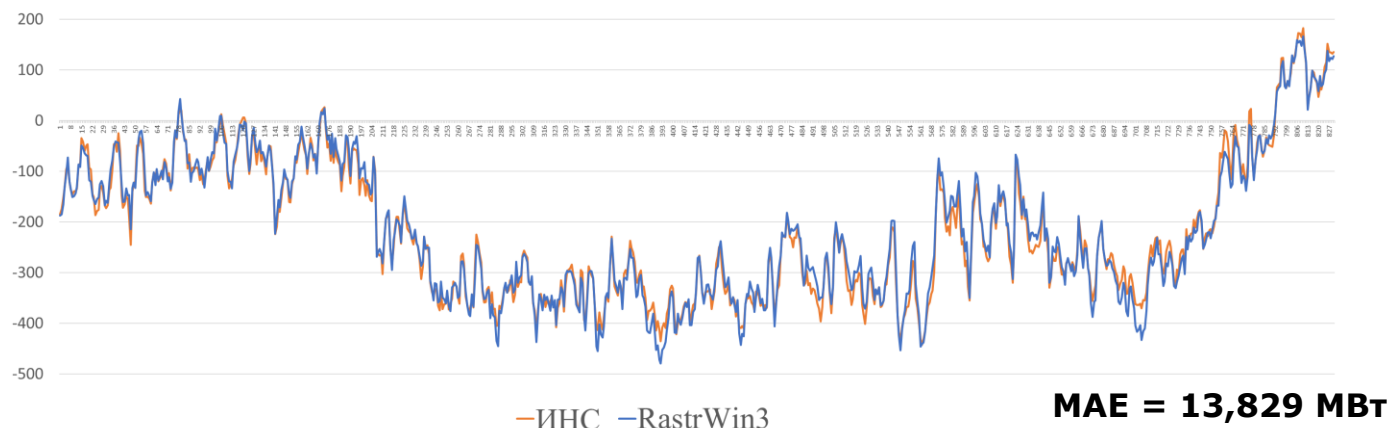
Полносвязная ИНС (2 скрытых слоя)
780 входов (инъекции активной и реактивной мощности
в узлах нагрузки и генерации)
3 выхода (перетоки активной мощности по связям КС)

Переток по ПС Алтай ВЛ-1104-Экибаст



ПРИМЕНЕНИЕ ИНС ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАСЧЕТА

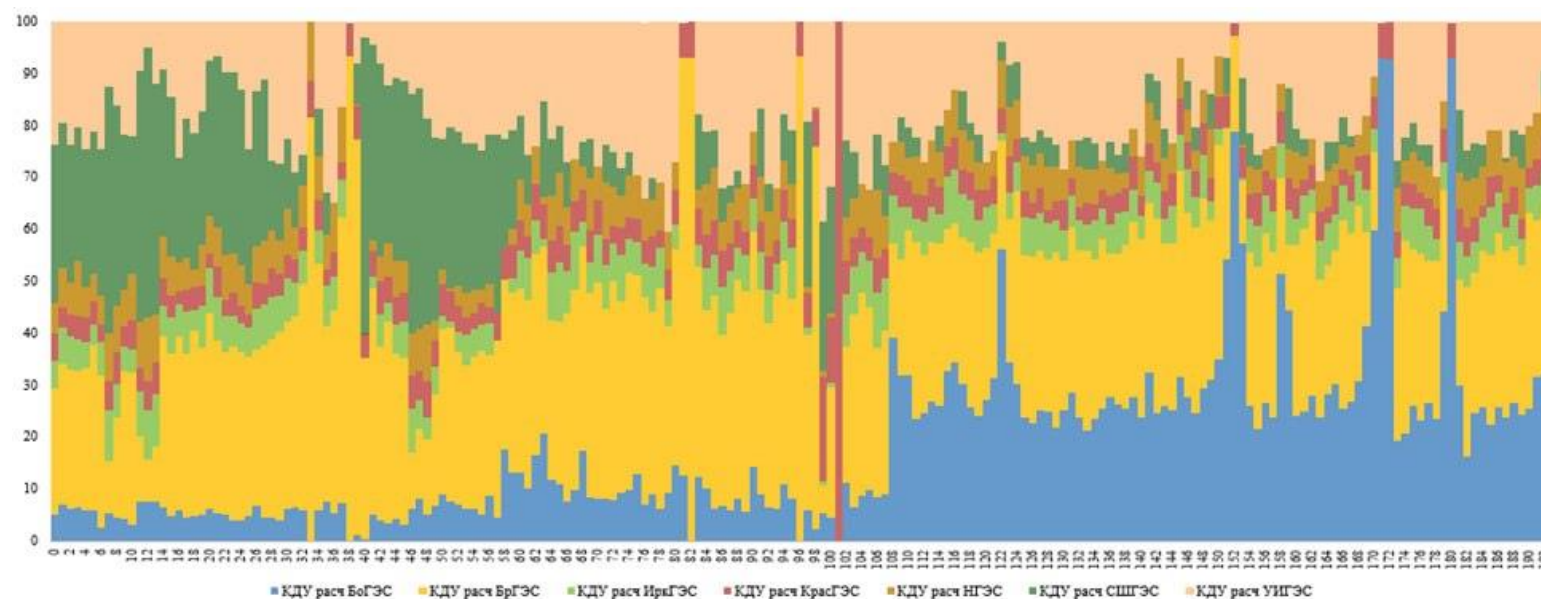
Переток по ПС Алтай ВЛ-1104-Экибаст



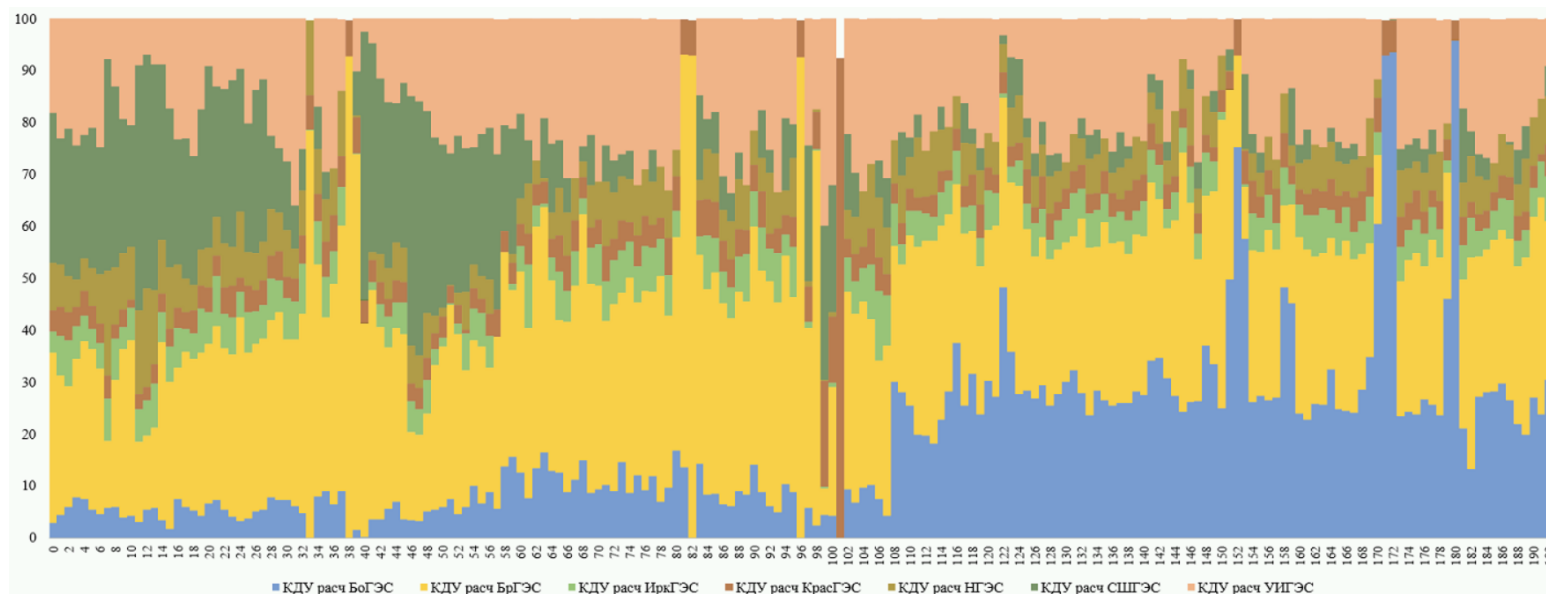
Переток по ПС Алтай ВЛ-1104-Экибаст



КДУ_RastWin



КДУ_ИНС



При использовании одной вычислительной машины время одного расчета целевой функции различается более, чем в 5 раз

RastrWin - 0,0221 с

ИНС – 0,0042 с

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА 2023



СДЕЛАНО

Реализованы программные компоненты, выполняющие расчетные задачи, и компоненты, отвечающие за взаимодействие с СК-11 и СМЗУ

Выполнено тестирование реализованных расчетных компонентов, продемонстрированы их функциональные возможности

Разработаны пользовательский интерфейс

ПРЕДСТОИТ

Завершить эксперименты с обучением ИНС, оценить влияние погрешности ИНС на результаты расчета КДУ

Завершить работы по реализации бэкенда

Протестировать MVP «в сборе»