

Разработка алгоритма оптимизации загрузки гидрогенераторов по критерию обеспечения максимального диапазона вторичного регулирования

Студент: гр. 5АМ1Р Соболев И.Г.

Руководитель: Васильев А.С., доцент ОЭЭ ИШЭ

Куратор от предприятия: Шкуркин К.К.,
ведущий специалист отдела ПА и АРЧМ СРЗА



Проблема и актуальность



Проблема:

При реализации резервов вторичного регулирования фиксируются факты неучастия ГЭС в АВРЧМ, связанные с несоответствием фактического диапазона запланированному.



Актуальность:

На сегодняшний день отсутствует формализованный алгоритм определения резервов на загрузку и разгрузку, учитывающий расходные характеристики гидротурбин, сетевые ограничения, а также ограничения, связанные с водно-энергетическим режимом.



Цель и задачи исследования



Цель:

Разработка алгоритма оптимизации распределения нагрузки между гидрогенераторами по критерию обеспечения максимального диапазона вторичного регулирования с учётом ограничений и характеристик каждого гидрогенератора.



Задачи:

1. Выявление ограничений на изменение выдаваемой активной мощности ГЭС;
2. Задание штрафов, соответствующих ограничениям;
3. Формирование целевой функции, выявление входных данных;
4. Определение перечня источников входных данных, сбор и формализация данных для оптимизации;
5. Реализация алгоритма с применением математического программного обеспечения на примере Красноярской ГЭС. Тестирование алгоритма.

Ограничивающие факторы



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Красноярская ГЭС

Параметры ГЭС:

- ☐ $P_{уст}$: 6000 МВт (12 x 500 МВт);
- ☐ НПУ: 243 м;
- ☐ УМО: 225 м;
- ☐ $V_{полезн}$: 30,4 км³.



Объект исследования:

Ограничения ГЭС на изменение выдаваемой активной мощности.



Предмет исследования:

Влияние факторов на резервы на загрузку и разгрузку при участии ГЭС во вторичном регулировании частоты и мощности.



Группы ограничений:

1. Ограничения, вызванные техническими особенностями ГА;
2. Ограничения, сформированные БВУ;
3. Ограничения, накладываемые ПИВР;
4. Ограничения схемы выдачи мощности.

Примечание: БВУ – бассейновое водное управление; ПИВР – правила использования водных ресурсов водохранилища; НПУ – нормальный подпорный уровень; УМО – Уровень мёртвого объёма.



Работа с исходными данными



Инструмент автоматизации:
ПО «MathCad»



Формализация:

$$\eta = f(Q, H(Q)),$$

где η – КПД;

Q – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – напор, м.



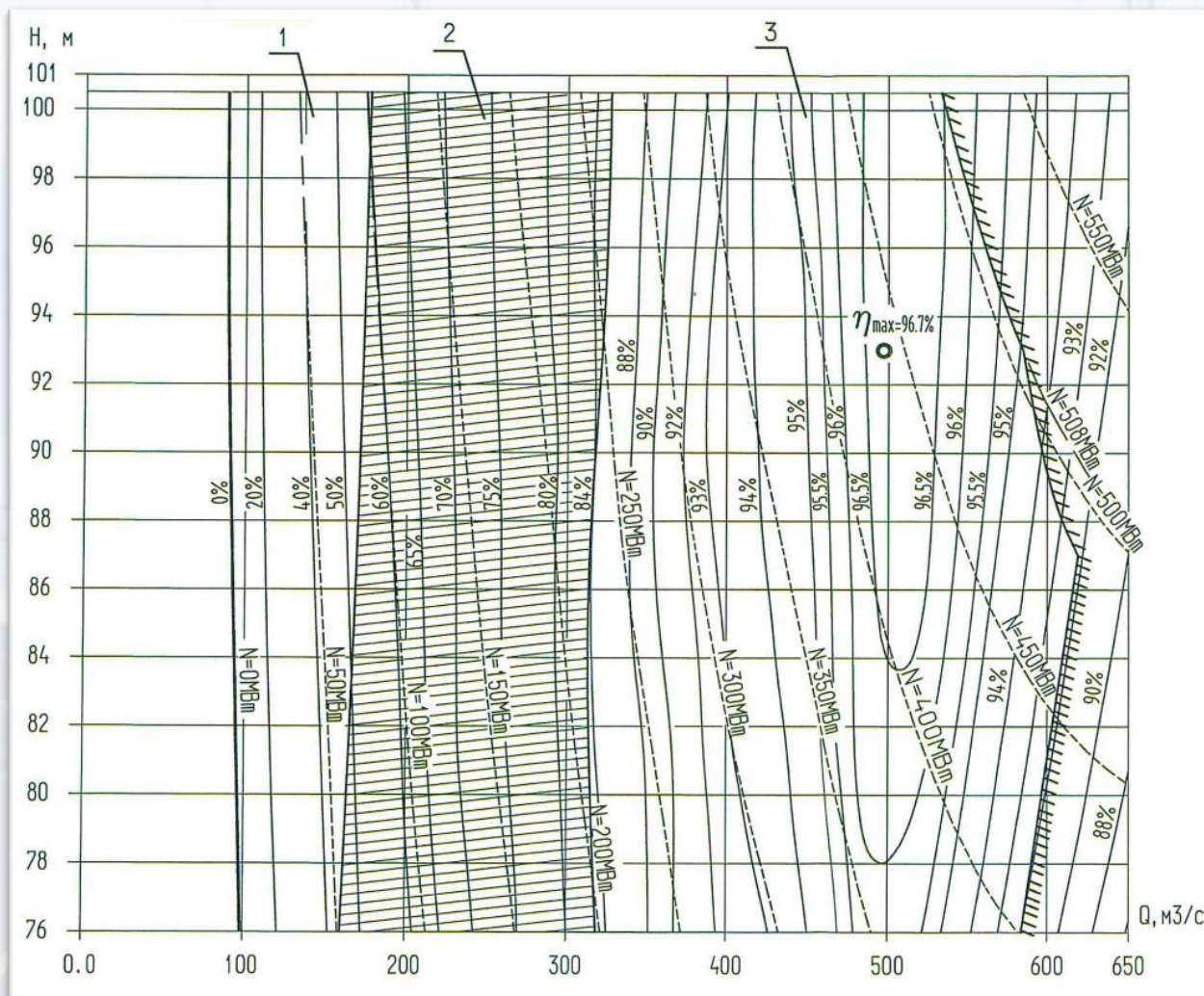
Мощность ГЭС:

$$P_{\text{ГЭС}}(Q, H) = 0,01 H g \rho \sum_{n=1}^n (\eta_i Q_{\text{турб.}i}),$$

где n – число турбин в работе;

η_i – КПД i -ой турбины;

$Q_{\text{турб.}i}$ – расход воды через i -ую турбину, $\text{м}^3/\text{с}$.



Расходная характеристика гидротурбины №9

Примечание: на рисунке представлены зоны: 1, 3 – работа агрегата без ограничений; 2 – не рекомендована для длительной работы.

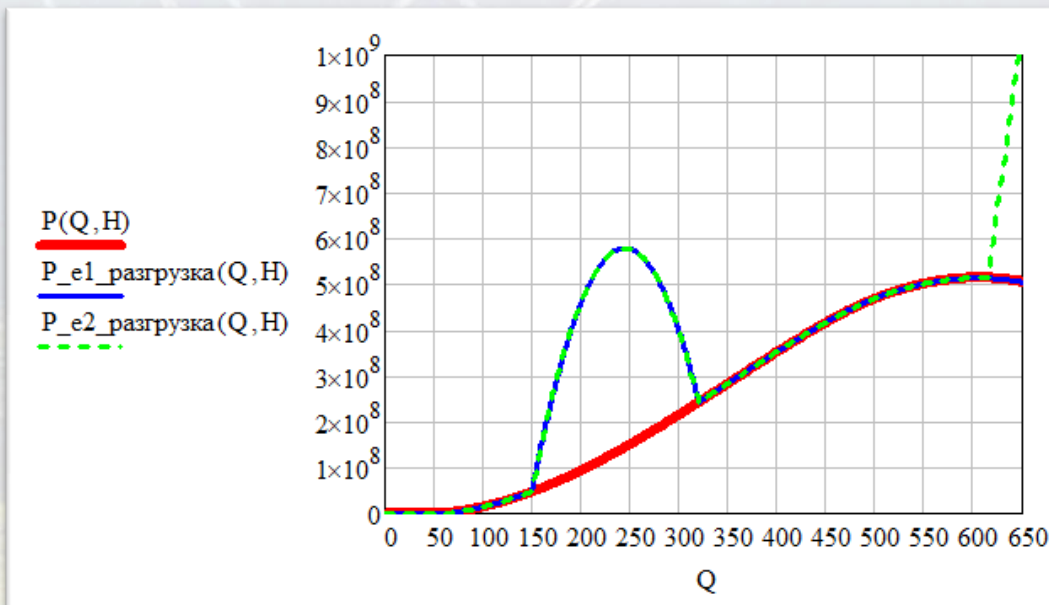
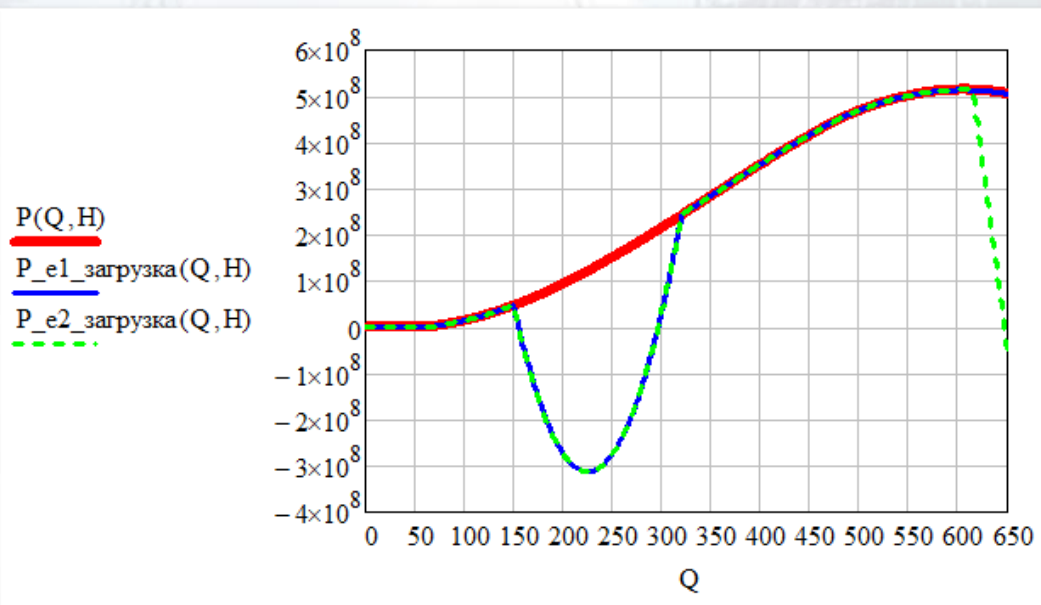
Определение штрафной функции



Штрафы по ЗНР и линиям ограничения максимальной мощности. Мощность турбины:

$$P_{\text{турб}}(Q_{\text{турб}}, H) = 9,81\eta H Q_{\text{турб}} \pm e_1(Q_{\text{турб}}) \pm e_2(Q_{\text{турб}}, H),$$

где $P_{\text{турб}}$ – мощность турбины, Вт; $Q_{\text{турб}}$ – расход воды через турбину, м³/с;
 e_1 – штраф по ЗНР; e_2 – штраф по линии максимальной мощности.





Определение штрафной функции



Штраф БВУ:

$$e_3(Q_{\text{НБ}}) = [-k_{\text{БВУ}}|Q_{\text{НБ}} - Q_{\text{max}}|] \pm [-k_{\text{БВУ}}|Q_{\text{НБ}} - Q_{\text{min}}|],$$

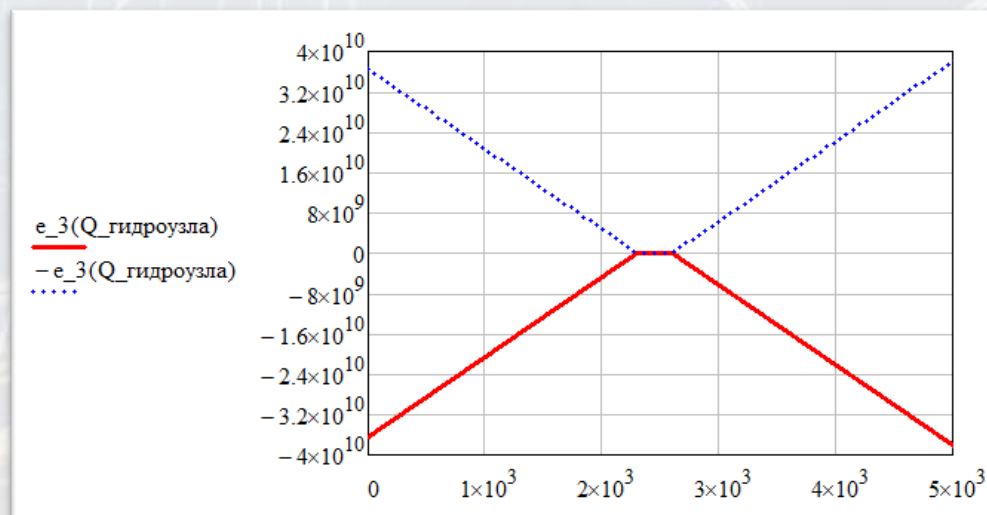


Минимальный расход



Максимальный расход

где $k_{\text{БВУ}}$ – эмпирически подбираемый весовой коэффициент; $Q_{\text{НБ}}$ – расход воды в нижний бьеф, м³/с; Q_{max} и Q_{min} – максимальный и минимальный расходы воды для гидроузла, установленные БВУ, м³/с.



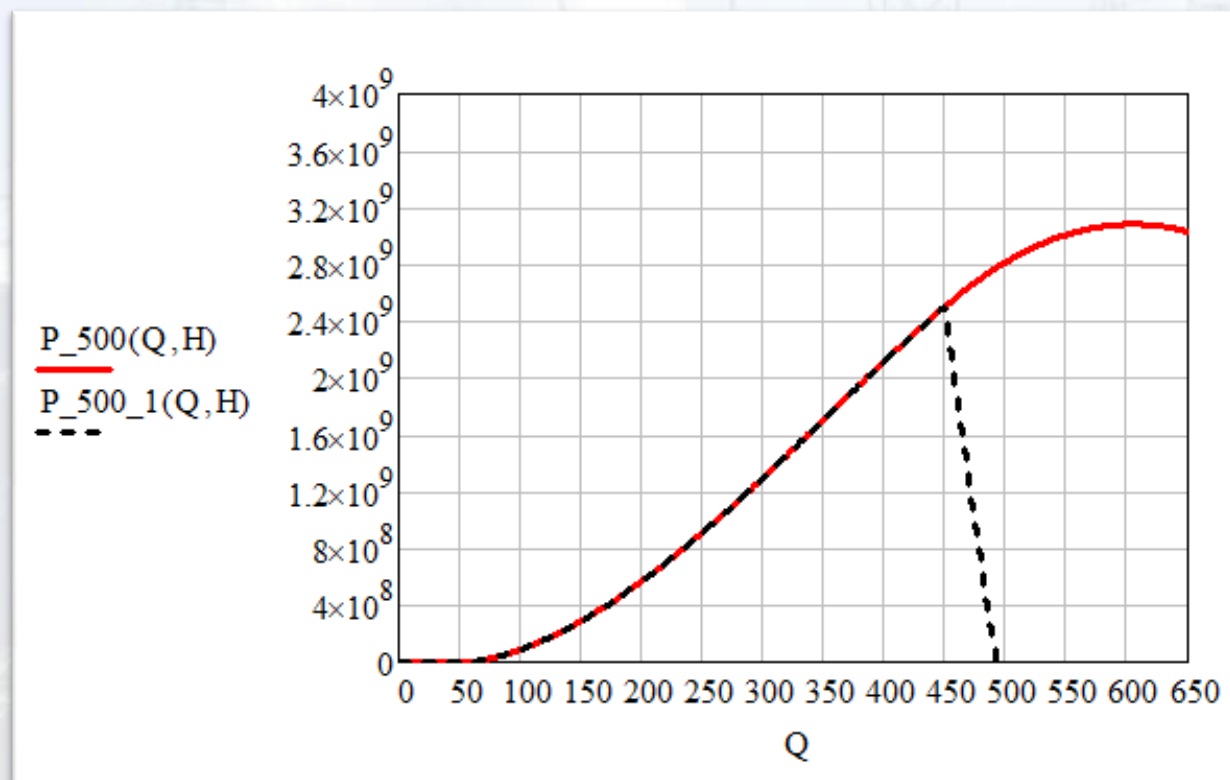


Определение штрафной функции



Штраф СВМ:

$$e_4(Q_{\text{турб}}) = [-k_{\text{СВМ}} | P_{500.i}(Q_{\text{турб}.i}, H) + P_{500.i+1}(Q_{\text{турб}.i+1}, H) + \dots - P_{\text{СВМ}.500} |] \\ + [-k_{\text{СВМ}} | P_{220.i}(Q_{\text{турб}.i}, H) + P_{220.i+1}(Q_{\text{турб}.i+1}, H) + \dots - P_{\text{СВМ}.220} |],$$



где $P_{500.i}$ и $P_{220.i}$ – мощность i -го гидрогенератора на стороне 500 кВ и 220 кВ, соответственно, МВт;

$P_{\text{СВМ}.500}$ и $P_{\text{СВМ}.220}$ – ограничение СВМ на стороне 500 кВ и 220 кВ, соответственно, МВт;

$Q_{\text{турб}.i}$ – расход воды через i -ю турбину, м³/с.



Перечень данных



Исходные данные:

- ☐ Состав генерирующего оборудования;
- ☐ Характеристики турбин;
- ☐ Уровень верхнего бьефа;
- ☐ Кривая связи $Z_{НБ} = f(Q_{НБ})$;
- ☐ Ограничение СВМ на стороне 500 кВ и 220 кВ;
- ☐ Данные БВУ;
- ☐ Данные ПИВР.



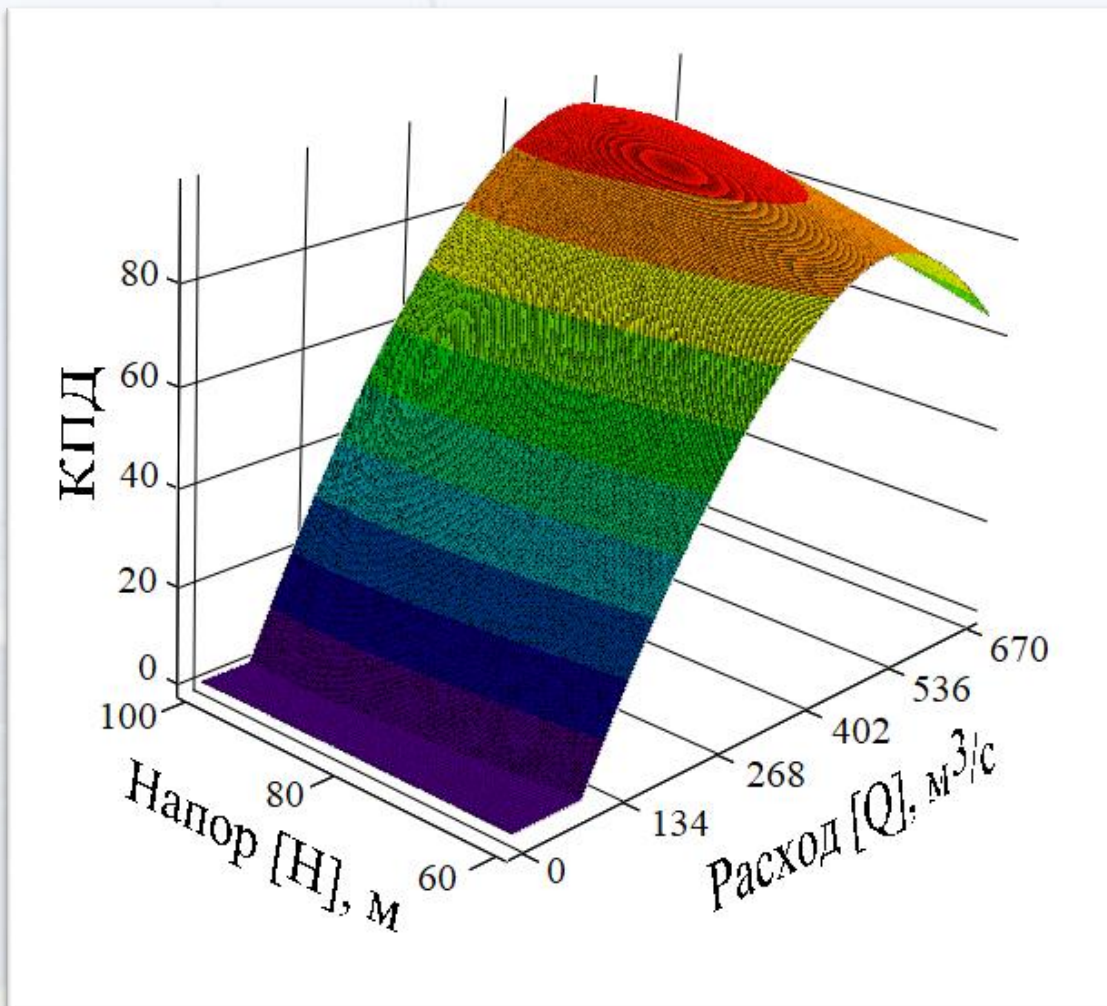
Критерий оптимизации:

- ☐ Резерв на загрузку:

$$P_{max} = f(H, Q) \rightarrow \max;$$

- ☐ Резерв на разгрузку:

$$P_{min} = f(H, Q) \rightarrow \min.$$



Область допустимых значений



Учёт и формализация ограничений



Целевая функция с учётом штрафов:

$$F(Q) \rightarrow \max | \min [P_{\text{ГЭС}}(Q, H) \pm e_{0.1}(Q_{\text{сбр}}, Z_{\text{вб}}) \pm e_{0.2}(Q_{\text{турб}}, Z_{\text{вб}}) \pm \pm e_1(Q_{\text{турб}}) \pm e_2(Q_{\text{турб}}, H) \pm e_3(Q_{\text{НБ}}) \pm e_4(Q, H)],$$

где $e_{0.1}(Q_{\text{сбр}}, Z_{\text{вб}})$ и $e_{0.2}(Q_{\text{турб}}, Z_{\text{вб}})$ – штрафы ПИВР.

ПУР

Ограничения СВМ

Ограничения по
характеристикам

Ограничения ПИВР

- ☐ $H_{\text{мин}} \leq H \leq H_{\text{макс}}$
- ☐ $Z_{\text{УМО}} \leq Z_{\text{вб}} \leq Z_{\text{НПУ}}$
- ☐ $Q_{\text{сбр}} \leq Q_{\text{сбр.НПУ}}$
- ☐ $Q_{\text{сбр}} \leq Q_{\text{сбр.ФПУ}}$
- ...

Ограничения БВУ

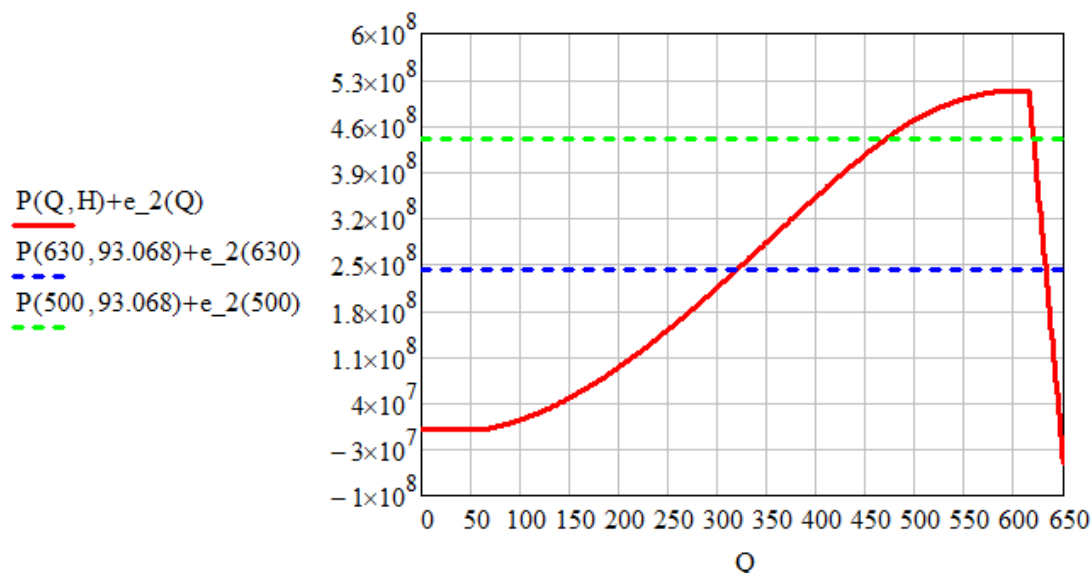
Период действия	Параметр	Тип ограничения	Значение
с 01.01 по 31.01	$Q_{\text{н.б.}}$	$\leq$	2600
с 01.01 по 31.01	$Q_{\text{н.б.}}$	$\geq$	2300
с 01.02 по 30.04	$Q_{\text{н.б.}}$	$\leq$	5000
с 01.02 по 30.04	$Q_{\text{н.б.}}$	$\geq$	1800
с 01.05 по 31.10	$Q_{\text{н.б.}}$	$\leq$	2600
с 01.11 по 14.12	$Q_{\text{н.б.}}$	$\leq$	5000
с 01.11 по 14.12	$Q_{\text{н.б.}}$	$\geq$	1800
с 15.12 по 31.12	$Q_{\text{н.б.}}$	$\leq$	2600
с 15.12 по 31.12	$Q_{\text{н.б.}}$	$\geq$	2300



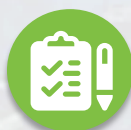
Тестирование



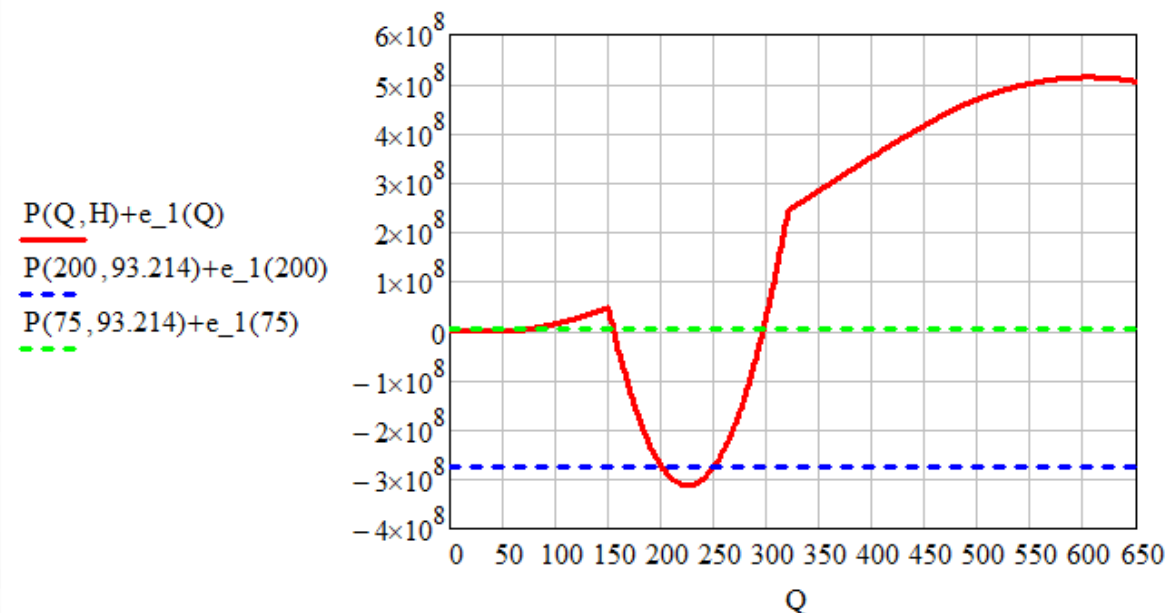
Расход, соответствующий ЗНР



1. $P(630, 93.068) = 4.806 \times 10^8$
2. $e_2(630) = -2.377 \times 10^8$
3. $P(630, 93.068) + e_2(630) = 2.429 \times 10^8$
4. $P(500, 93.068) + e_2(500) = 4.404 \times 10^8$



Расход, соответствующий линии ограничения максимальной мощности



1. $P(200, 93.214) = 8.947 \times 10^7$
2. $e_1(200) = -3.655 \times 10^8$
3. $P(200, 93.214) + e_1(200) = -2.76 \times 10^8$
4. $P(75, 93.214) + e_1(75) = 4.37 \times 10^6$



Заключение



Результаты:

- 1. Выявлены ограничения на изменение выдаваемой активной мощности ГЭС;**
- 2. Определена штрафная функция, учитывающая каждую группу ограничений;**
- 3. Сформирована целевая функция с учётом штрафов, выявлены входные данные для штрафной функции;**
- 4. Выявлены источники входных данных и проведён сбор и формализация данных для оптимизации;**
- 5. Реализован алгоритм оптимизации распределения нагрузки между гидрогенераторами с применением математического программного обеспечения на примере Красноярской ГЭС;**
- 6. Проведено тестирование в ПО «MathCad».**

Спасибо за внимание!

Разработка алгоритма оптимизации загрузки гидрогенераторов по критерию обеспечения максимального диапазона вторичного регулирования

Студент: гр. 5АМ1Р Соболев И.Г.

Руководитель: Васильев А.С., доцент ОЭЭ ИШЭ

Куратор от предприятия: Шкуркин К.К.,
ведущий специалист отдела ПА и АРЧМ СРЗА



Список используемых источников

- 1.** Правила оптового рынка электрической энергии и мощности, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 27.12.2010 №1172 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/regulations/reg1172-271210.pdf>
- 2.** ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ к генерирующему оборудованию участников оптового рынка [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/markets/2021/tq_0109221.pdf
- 3.** ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПОСТАНОВЛЕНИЕ от 13 августа 2018 г. N 937 Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации (с изменениями на 30 января 2021 года) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/550919677>

...

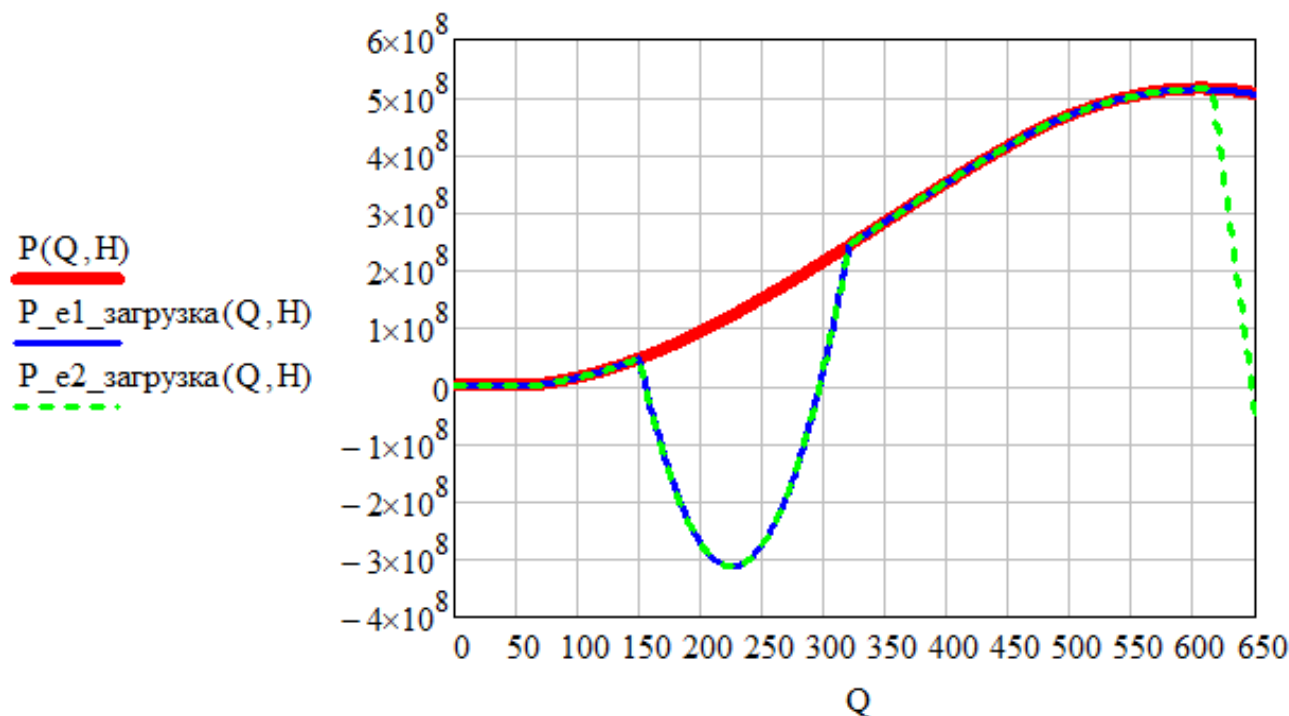


Приложение А



Зона, не рекомендованная для длительной работы, (ЗНР) и максимальная пропускная способность (МПС)

График функции с учётом штрафа ЗНР и МПС:
 $P_e2_загрузка(Q, H) := (P(Q, H) + e_1(Q)) + e_2(Q)$

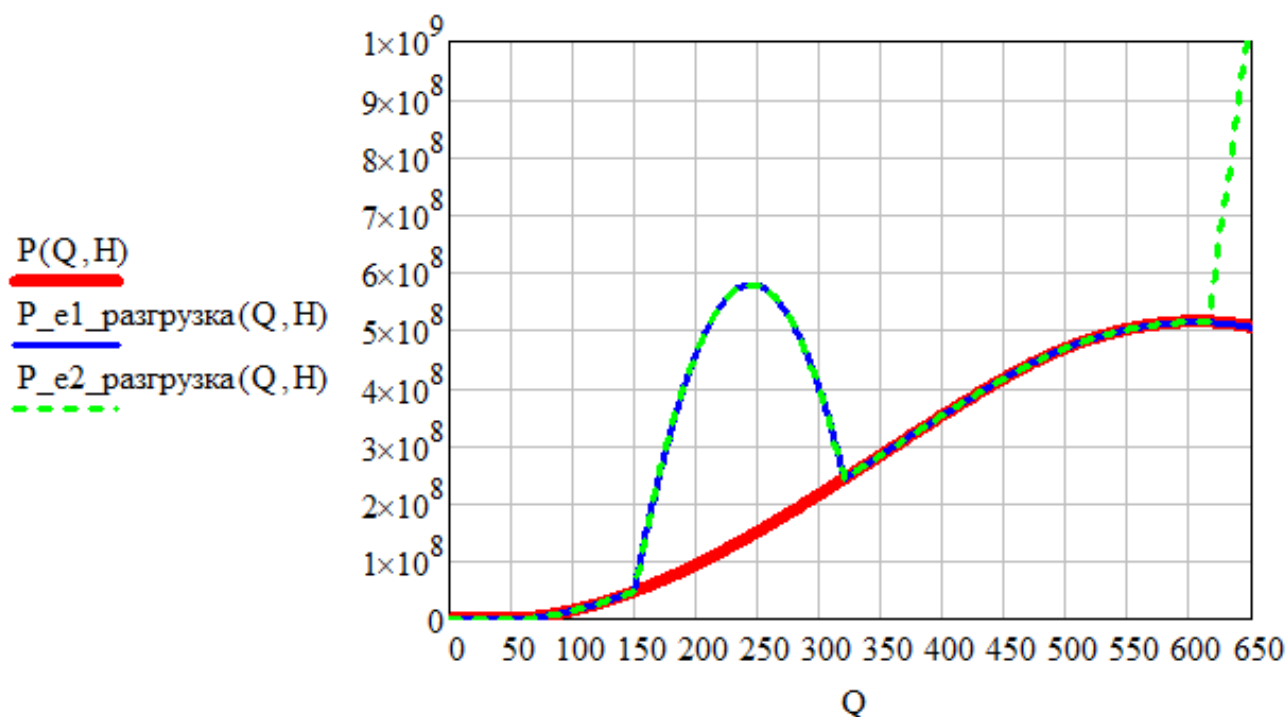


Приложение Б



Зона, не рекомендованная для длительной работы, (ЗНР) и максимальная пропускная способность (МПС)

График функции с учётом штрафа ЗНР и МПС:
 $P_{e2_разгрузка}(Q, H) := P(Q, H) - e_1(Q) - e_2(Q)$





Приложение В



Штраф ЗНР:

$$e_1(Q_{\text{турб}}) = k_{\min} \left(1 - \left(\frac{2(Q - Q_0)}{Q_2 - Q_1} \right)^2 \right),$$

где $k_{\min}$ – коэффициент для корректировки оптимизации;

Q_0 – расход воды, соответствующий вершине параболы, м³/с;

Q_1 и Q_2 – граничные значения расхода воды, определяющие ЗНР, м³/с.



Штраф линии ограничения максимальной мощности:

$$e_2(Q_{\text{турб}}, H) = -k_{\text{МПС}} |Q_{\text{доп}} - Q_{\text{турб}}|,$$

где $k_{\text{МПС}}$ – коэффициент, ограничивающий график функции пропускной способности в области допустимых значений; $Q_{\text{доп}}$ – допустимый расход воды через турбину согласно эксплуатационной характеристике турбины, м³/с.



Приложение Г

Зависимость уровня нижнего бьефа от расхода воды

КГЭСрасход :=



D...\КГЭС расход.xls

$Z_{nb\text{КГЭС}} := \text{КГЭСрасход}^{(0)}$

$Q_{nb\text{КГЭС}} := \text{КГЭСрасход}^{(1)}$

КГЭСрасход =

	0	1
0	144	$1.74 \cdot 10^3$
1	144.01	$1.75 \cdot 10^3$
2	144.02	$1.76 \cdot 10^3$
3	144.03	$1.77 \cdot 10^3$
4	144.04	$1.78 \cdot 10^3$
5	144.05	$1.79 \cdot 10^3$
6	144.06	$1.81 \cdot 10^3$
7	144.07	$1.82 \cdot 10^3$
8	144.08	$1.83 \cdot 10^3$
9	144.09	$1.84 \cdot 10^3$
10	144.1	$1.85 \cdot 10^3$
11	144.11	$1.86 \cdot 10^3$
12	144.12	$1.87 \cdot 10^3$
13	144.13	$1.88 \cdot 10^3$
14	144.14	$1.89 \cdot 10^3$
15	144.15	...

