

# **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ЗАГРУЗКИ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ ПО КРИТЕРИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ВТОРИЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

И.Г. Соболев, А.С. Васильев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики, прикладная информатики, информационные технологии в электроэнергетике, отделение электроэнергетики и электротехники, гр. О-5КМ11

В настоящий момент фактический располагаемый диапазон вторичного регулирования ГЭС, подключенных к централизованной системе автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ), может не соответствовать запланированному диапазону, в связи с этим для регулирующих ГЭС могут фиксироваться факты неучастия в автоматическом вторичном регулировании частоты и активной мощности (АВРЧМ).

Необходимо рассмотреть возможные причины фактов неучастия в АВРЧМ, среди которых следует учесть следующие: водные ограничения, ограничения, связанные с наличием зон нерекомендуемой работы и др. Также значимое влияние на диапазон загрузки вносит уникальность напорных характеристик каждого гидрогенератора.

Для снижения случаев такой фиксации необходимо разработать алгоритм оптимизации загрузки гидрогенераторов по критерию обеспечения максимального диапазона вторичного регулирования с учётом ограничений и напорной характеристики каждого гидрогенератора.

## **I. ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА**

Объектом исследования выступили 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.

Подход к решению проблемы несоответствия фактического диапазона запланированному состоит в том, чтобы предложить алгоритм, в ходе которого сначала будет рассчитана мощность, вырабатываемая ГЭС, а затем произведено наложение штрафов, соответствующих ограничениям, в ходе оптимизации загрузки гидрогенераторов по критерию обеспечения максимального диапазона вторичного регулирования.

## II. МОЩНОСТЬ, ВЫРАБАТЫВАЕМАЯ ГЭС

Диапазон резервов вторичного регулирования на загрузку тем больше, чем больше вырабатываемая мощность ГЭС, которая, согласно формуле (1), пропорциональна расходу воды, напору и КПД ГА [1]:

$$P_{\text{ГЭС}}(Q, H) = 0,01Hg\rho \sum_{i=1}^n Q_i\eta_i, \quad (1)$$

где 0,01 – коэффициент перевода КПД из процентов в о.е.;

$H$  – напор, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$n$  – количество гидрогенераторов в работе;

$Q_i$  – расход воды через  $i$ -ю турбину гидроагрегата, м<sup>3</sup>/с;

$\eta_i$  – КПД  $i$ -го гидроагрегата, %.

График мощности, вырабатываемой гидрогенератором типа СВФ 1690/185-64 мощностью 500 МВт, представлен на рисунке 1.

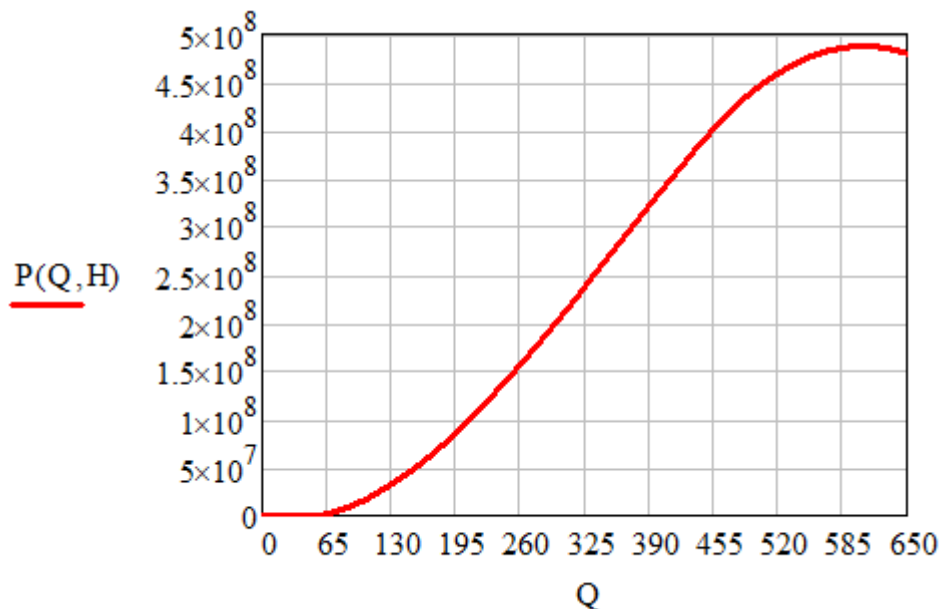


Рис. 1. График мощности, вырабатываемой гидрогенератором типа СВФ при различных значениях расхода воды, построенный в программе «MathCad»

По результатам построения, представленным на рисунке 1, видно, что вырабатываемая мощность (ось ординат, МВт) увеличивается с ростом расхода воды (ось абсцисс, м<sup>3</sup>/с), однако, при повышенном расходе наблюдается снижение вырабатываемой мощности ввиду снижения КПД ГА. Данное обстоятельство учтено при помощи расходных характеристик турбин.

### III. НАКЛАДЫВАЕМЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Ограничения, накладываемые на резервы вторичного регулирования, выявленные в ходе проведения исследования на примере Красноярской ГЭС:

1. Ограничения бассейнового водного управления (БВУ);
2. Ограничения, вызванные техническими особенностями ГА [2];
3. Ограничения, накладываемые правилами использования водных ресурсов [2];
4. Ограничения схемы выдачи мощности.

### IV. УЧЁТ ОГРАНИЧЕНИЙ МЕТОДОМ ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ

Учёт ограничений реализован методом штрафных функций, иллюстрация которого может быть представлена на примере ограничений БВУ. На практике ограничения БВУ задаются диапазоном допустимых расходов воды: от  $Q_{\min}$  до  $Q_{\max}$ .

Штрафная функция реализована таким образом, чтобы при нарушении области допустимых значений целевая функция, имеющая критерий максимизации, убывала. Таким образом, расход воды, превышающий максимальный расход воды, установленный БВУ, в рамках оптимизации воспринимается как «неоптимальный» ввиду наложения штрафа, рассчитываемому по формуле:

$$e_{\text{БВУ}}(Q_{\text{НБ}}) = -k_{\text{БВУ}} \cdot (|Q_{\text{НБ}} - Q_{\text{max}}| + |Q_{\text{НБ}} - Q_{\text{min}}|), \quad (2)$$

где  $k_{\text{БВУ}}$  – эмпирически подбираемый коэффициент;

$Q_{\text{НБ}}$  – расход воды в нижний бьеф, м<sup>3</sup>/с;

$Q_{\text{max}}$  – максимальный расход воды для гидроузла, установленный БВУ, м<sup>3</sup>/с;

$Q_{\text{min}}$  – минимальный расход воды для гидроузла, установленный БВУ, м<sup>3</sup>/с.

Подобным образом производится учёт прочих ограничений в целевой функции.

### V. АЛГОРИТМ

Минимальный перечень входных данных алгоритма определения резервов вторичного регулирования включает следующие данные: расходные характеристики турбин, уровень верхнего бьефа, расход воды через турбины, расход воды через водосбросы, кривая связи (зависимость  $Z_{\text{НБ}} = f(Q_{\text{НБ}})$ ).

Алгоритм состоит из последовательного расчёта следующих параметров:

1. Расхода воды в нижний бьеф, рассчитываемого как сумма расходов воды через турбины и водосбросы;
2. Уровня нижнего бьефа, рассчитываемого в результате интерполяции по кривой связи расхода воды в нижний бьеф;

3. Напора, рассчитываемого как разность уровней верхнего и нижнего бьефов;

4. Вырабатываемой мощности с учётом ограничений, рассчитываемой в ходе оптимизации:

$$P_{\text{ГЭС}}(Q, H) + e_{\Sigma}(Q, Q_{\text{НБ}}, Q_{\text{сбр}}, H, Z_{\text{ВБ}}, Z_{\text{НБ}}) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $e_{\Sigma}(Q, Q_{\text{НБ}}, Q_{\text{сбр}}, H, Z_{\text{ВБ}}, Z_{\text{НБ}})$  – штрафная функция, учитывающая ограничения;

$Q_{\text{сбр}}$  – расход воды через водосбросы, м<sup>3</sup>/с;

$Z_{\text{ВБ}}$  – уровень верхнего бьефа, м;

$Z_{\text{НБ}}$  – уровень нижнего бьефа, м.

5. Резерва вторичного регулирования на загрузку, рассчитываемого как разность вырабатываемой мощности с учётом ограничений (пункт 4) и иных резервов в случае их размещения на ГЭС, в частности, резервов первичного регулирования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выражение (3) представляет собой целевую функцию, подлежащую оптимизации методами глобальной оптимизации ввиду высокой размерности пространства параметров.

Ожидается, что разработанный алгоритм позволит снизить число фактов неучастия за счёт повышения точности расчётов диапазонов вторичного регулирования.

Однако следует учитывать возможную необходимость корректировки алгоритма в ходе опытной эксплуатации в случаях, если исходные данные будут иметь недостаточную точность, а также при отклонениях реальных бизнес-процессов от теоретических моделей.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. СТО РусГидро 06.01.84-2013 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.rushydro.ru/upload/iblock/9c3/078\\_STO-RusGidro-06.01.84-2013\\_Planirovanie-vodnoenergeticheskikh-rezhimov.pdf](http://www.rushydro.ru/upload/iblock/9c3/078_STO-RusGidro-06.01.84-2013_Planirovanie-vodnoenergeticheskikh-rezhimov.pdf).

2. Правила использования водных ресурсов водохранилищ Енисейского каскада ГЭС [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://pivr.enbv.ru/pivr/pivr\\_Enisey.zip](http://pivr.enbv.ru/pivr/pivr_Enisey.zip).

3. ГОСТ Р 57693-2017 Резервы активной мощности Единой энергетической системы России [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200147045>.

4. СТО 59012820.27.010.001-2018 Резервы активной мощности Единой энергетической системы России [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/st\\_rezerv\\_activ\\_150218.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/st_rezerv_activ_150218.pdf).

Научный руководитель: А.С. Васильев, к.т.н., доцент отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики ТПУ.