

УДК 621.314

Оптимальное распределение мощности между агрегатами гидроэлектростанции с учетом напора нетто*

Г.В. ГЛАЗЫРИН, Н.Н. ТВЕРДОХЛЕБОВ, Ю.В. КАЗАНЦЕВ

В данной работе рассматривается вопрос оптимизации энергетических режимов гидроагрегатов гидроэлектростанций с учетом потерь напора на сороудерживающих решетках. Определены критерии и целевая функция оптимизации. Выявлены ограничения, имеющие место в процессе реального производства. Определена методика определения напора нетто в зависимости от расхода воды через турбину гидроагрегата. Разработан алгоритм определения рабочей характеристики с учетом напора нетто. Обоснованы основные требования к методу оптимизации.

Ключевые слова: групповой регулятор активной мощности, гидроэлектростанция, гидроагрегат, сороудерживающая решетка, микропроцессорная система, напор нетто, напор брутто, турбина.

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование энергетических ресурсов – один из самых обсуждаемых вопросов нашего времени, так как невозможно успешное развитие экономики государства в условиях расточительного применения полезных ископаемых. Оптимальное ведение режима на гидроэлектростанциях (ГЭС) позволяет сохранять топливные ресурсы на тепловых электростанциях за счет использования возобновляемого источника энергии – воды.

Несмотря на то что с середины XX века вопросу оптимизации режимов ГЭС уделялось широкое внимание [1, 2], ни один из предложенных методов не нашел применения на практике, ввиду скромных возможностей вычислительных машин того времени. Данная тема вновь стала объектом изучения в связи с развитием групповых регуляторов активной мощности (ГРАМ) ГЭС. Современные ГРАМ представляют собой микропроцессорные системы, позволяющие реализовать сложные алгоритмы управления. Вместе с тем на некоторых ГЭС (Новосибирская, Усть-Хантайская) проводятся поэтапные реконструкции с заменой гидротурбин, что требует управления разнотипным оборудованием. В таких условиях проблема поддержания оптимального режима стоит особенно остро.

Оптимизация режима в ГРАМ подразумевает решение двух задач:

- автоматического оптимального распределения суммарной активной мощности ГЭС между агрегатами, находящимися в работе;
- расчета оптимального состава агрегатов для заданной активной мощности ГЭС (функция «советчика»).

В статье рассматривается первая задача. При этом, в отличие от существующих методов оптимизации, учитывается изменение перепада давления на сороудерживающих решетках в зависимости от мощности.

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка метода оптимизации распределения суммарной активной мощности ГЭС между агрегатами, учитывающего перепады давления на сороудерживающих решетках.

* Статья получена 20 мая 2013 г.

Задачи, решение которых приведет к достижению поставленной цели: построение целевой функции; определение ограничений, связанных с особенностями производственного процесса; разработка метода определения перепада давления на сороудерживающих решетках для произвольной мощности агрегата; разработка алгоритма определения рабочей характеристики агрегата для произвольного напора; выбор метода оптимизации.

2. ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Критерием оптимизации в данной работе принят минимальный расход воды через турбины гидроэлектростанции. При этом *целевая функция* имеет вид

$$Q_{ГЭС}(N_{Г1}, N_{Г2}, \dots, N_{Гn}) = \sum_{i=1}^n Q_{Гi}(N_{Гi}), \quad (1)$$

где n – количество агрегатов, участвующих в распределении активной мощности; $N_{Гi}$ – активная мощность i -го генератора; $Q_{Гi}$ – расход воды через турбину i -го агрегата. Оптимальному режиму соответствует минимальное значение целевой функции.

Для определения $Q_{Гi}$ запишем выражение, связывающее коэффициент полезного действия (КПД) гидроагрегата, расход и мощность [3]:

$$\eta_{ГAi} = \frac{N_{Гi}}{9.81 \cdot Q_{Гi} \cdot H_{HEi}}, \quad (2)$$

где H_{HEi} – напор нетто i -го агрегата. *Напором нетто* принято называть разность между напором брутто (разностью уровней верхнего и нижнего бьефов) и потерями на сороудерживающих решетках (СУР). Перепад давления на СУР каждого агрегата определяется путем замера давления в двух точках водовода: до и после СУР.

Выразим из (2) расход воды через турбину:

$$Q_{Гi} = \frac{N_{Гi}}{9.81 \cdot \eta_{ГAi} \cdot H_{HEi}}. \quad (3)$$

При этом напор нетто зависит от расхода воды через турбину, а КПД агрегата – от напора нетто и активной мощности:

$$H_{HEi} = f_{Hi}(Q_{Гi}), \quad (4)$$

$$\eta_{ГAi} = f_{\eta i}(H_{HEi}, N_{Гi}). \quad (5)$$

Эти зависимости рассмотрены в следующих разделах. Таким образом, для определения расхода воды через турбину i -го агрегата по известной активной мощности необходимо решить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} Q_{Гi} = \frac{N_{Гi}}{9.81 \cdot \eta_{ГAi} \cdot H_{HEi}}, \\ H_{HEi} = f_{Hi}(Q_{Гi}), \\ \eta_{ГAi} = f_{\eta i}(H_{HEi}, N_{Гi}). \end{cases} \quad (6)$$

Теперь рассмотрим *ограничения*, которые необходимо учитывать при решении задачи оптимизации. В первую очередь, необходимо, чтобы сумма активных мощностей генераторов, участвующих в распределении, равнялась заданной активной мощности ГЭС

$$N_3 = \sum_{i=1}^n N_{\Gamma Ai} . \quad (7)$$

Кроме того, для каждого генератора имеются индивидуальные ограничения по максимальной и минимальной мощности:

$$N_{\Gamma Ai}^{\min} \leq N_{\Gamma Ai} \leq N_{\Gamma Ai}^{\max} . \quad (8)$$

Для агрегатов с радиально-осевыми гидротурбинами граничные значения $N_{\Gamma Ai}^{\min}$ и $N_{\Gamma Ai}^{\max}$ должны выбираться с учетом зоны, в которой работает турбина, чтобы исключить переход в зону нежелательной работы.

3. ЗАВИСИМОСТЬ НАПОРА НЕТТО ОТ РАСХОДА ВОДЫ ЧЕРЕЗ ТУРБИНУ

Согласно [5] потери в водоводе пропорциональны квадрату расхода жидкости. Следовательно, H_{HEi} можно определить по формуле

$$H_{HEi} = H_{\text{бр}} - k_{\Delta Hi} \cdot Q_{\Gamma i}^2 , \quad (9)$$

где $k_{\Delta Hi}$ – коэффициент, характеризующий степень засоренности СУР. Его можно определить по текущим параметрам режима агрегата, измеряемых ГРАРМ: активной мощности $N_{\Gamma Ai.\text{тек}}$ и перепаду давления на СУР $\Delta H_{i.\text{тек}}$. Для этого сначала необходимо рассчитать текущий напор нетто

$$H_{HEi.\text{тек}} = H_{\text{бр}} - \Delta H_{i.\text{тек}} . \quad (10)$$

Затем может быть найден текущий КПД агрегата по зависимости (5) и расход воды через турбину по формуле (3)

$$\eta_{\Gamma Ai.\text{тек}} = f_{\eta i} (H_{HEi.\text{тек}}, N_{\Gamma i.\text{тек}}) ,$$

$$Q_{\Gamma i} = \frac{N_{\Gamma i.\text{тек}}}{9.81 \cdot \eta_{\Gamma Ai.\text{тек}} \cdot H_{HEi.\text{тек}}} . \quad (11)$$

Окончательно определим значение коэффициента $k_{\Delta Hi}$ по формуле, полученной из выражения (8)

$$k_{\Delta Hi} = \frac{H_{\text{бр}} - H_{HEi.\text{тек}}}{Q_{\Gamma i.\text{тек}}^2} . \quad (12)$$

Следует отметить, что определение $k_{\Delta Hi}$ должно производиться по параметрам установившегося режима, так как в переходном процессе изменения мощности турбины параметры потока воды меняются весьма сложным образом [6].

4. ЗАВИСИМОСТЬ КПД АГРЕГАТА ОТ НАПОРА НЕТТО И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Данная зависимость задается семейством рабочих характеристик гидроагрегата $\eta_{ГА}(N_{ГА})$ при различных напорах. Рабочие характеристики определяются для нескольких напоров путем проведения натурных испытаний, в течение которых производится замер расхода воды в различных точках сечения турбины с помощью гидрометрической вертушки при различных значениях открытия направляющего аппарата [2]. Примеры таких характеристик для агрегатов с поворотно-лопастными и радиально-осевыми гидротурбинами приведены на рис. 1.

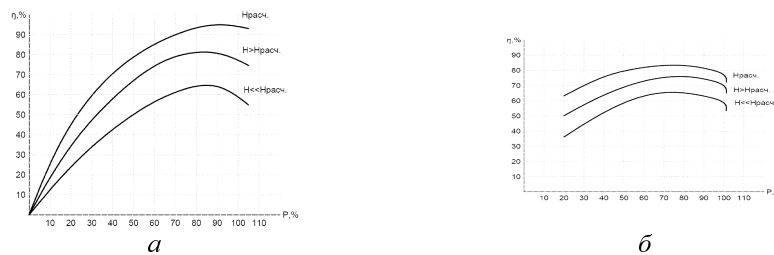


Рис. 1. Рабочие характеристики агрегатов при различных напорах:

а – поворотно-лопастная турбина; б – радиально-осевая турбина

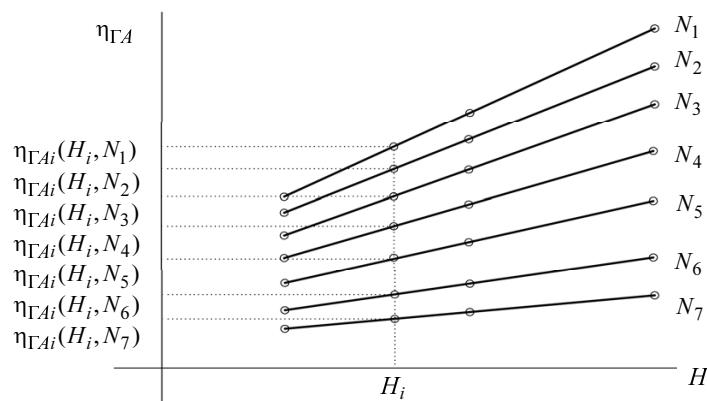


Рис. 2. Определение точек зависимости $\eta_{\bar{A}i}(N_{\bar{A}})$ при определенном значении напора H_i

В микропроцессорном ГРАМ коэффициент полезного действия агрегата при напоре H_{HEi} и мощности $N_{Гi}$ может быть достаточно просто определен, если рабочие характеристики заданы в виде точек зависимостей $\eta_{ГА}(H_{HE})$ для различных значений мощности (рис. 2). В этом случае точки рабочей характеристики, соответствующей H_{HEi} определяются интерполяцией зависимостей $\eta_{ГА}(H_{HE})$. Интерполяция рабочей характеристики позволяет найти КПД для мощности $N_{Гi}$ (рис. 3).

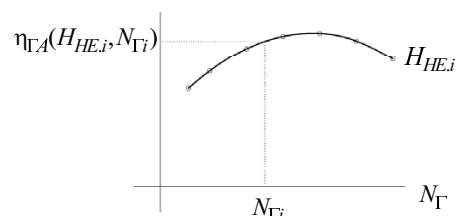


Рис. 3. Определение КПД $\eta_{ГА}(H_{HE,i}, N_{Гi})$ при определенных значениях мощности и $N_{Гi}$ и напора $H_{HE,i}$

5. ВЫБОР МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ

Решение оптимизационной задачи должно осуществляться с использованием метода, позволяющего определить приемлемые значения параметров, который при этом затратит минимальное количество вычислительных ресурсов и времени. Для выбора метода оптимизации необходимо исследовать оптимизируемую функцию на наличие локальных и глобальных минимумов.

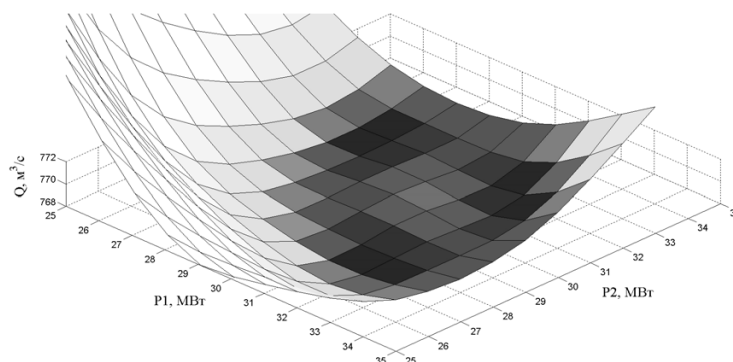


Рис. 4. Суммарный расход воды через турбины трех агрегатов в зависимости от мощности агрегатов 1 и 2 при постоянном задании на станцию

Так, для трех агрегатов с номинальной мощностью 65 МВт методом перебора было установлено суммарное задание мощности 90 МВт. В диапазоне от 25 до 34 МВт для двух первых агрегатов, и от 22 до 40 МВт для третьего агрегата с шагом 1 МВт были вычислены все значения суммарного расхода воды; на основании полученных данных построен график (рис. 4).

Проанализировав полученный график, можно сказать, что функция оптимизации не имеет ярко выраженного минимума. Более того, решению могут удовлетворять несколько наборов параметров (темные области на рис. 4). Следовательно, для решения данной задачи необходимо использовать глобальный метод, применяемый для поиска глобального минимума многоэкстремальной функции. Стоит учесть, что в виду невозможности описания зависимости КПД от мощности и напора аналитически, требуется, чтобы метод являлся применимым для нелинейного программирования. Также он должен быть численным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был предложен новый метод оптимизации энергетических режимов ГЭС с учетом потерь напора на СУР; для данного метода определена целевая функция и ограничения, связанные с особенностями производства; предложен метод нахождения напора нетто в зависимости от расхода воды через турбину $H_{HE}(Q_{Ti})$; разработан метод определения КПД по известной мощности и напору нетто $\eta_{\tilde{A}i}(H_{HEi}, N_{\tilde{A}i})$. Также по итогам проведенной работы были выявлены основные требования к методу оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Веников В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. – М.: Энергоиздат, 1981. – С. 26–455.
- [2] Филиппова Т.А. Оптимизация энергетических режимов гидроагрегатов гидроэлектростанций / Т.А. Филиппова. – М.: Энергия, 1975. – С. 8–202.
- [3] Грановский С.А. Конструкция гидротурбин и расчет их деталей / С.А. Грановский, В.М. Орго, Л.Г. Смоляров. – М.–Л.: МАШТИЗ, 1953. – С. 32.
- [4] Гидроэнергетика / Под ред. В.И. Обрезкова. – М.: Энергоиздат, 1981. – С. 246–451.

[5] Альтшуль А.Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах / А.Д. Альтшуль. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 27–57.

[6] Кривченко Г.И. Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках / Г.И. Кривченко. – М.: Энергия, 1975. – С. 298–305.

REFERENCES

[1] Venikov V.A., Zhuravlev V.G., Filippova T.A. Optimizacija rezhimov jelektrostancij i jenergosistem. M.: Jennergoizdat, 1981.

[2] Filippova T.A. Optimizacija jenergeticheskikh rezhimov gidroagregatov gidrojelektrostancij. M.: Jenergija, 1975.

[3] Granovskij S.A., Orgo V.M., Smoljarov L.G. Konstrukcija gidroturbin i raschet ih detalej. M.–L.: MASHGIZ, 1953.

[4] Pod red. Obrezkova V.I. Gidrojenergetika. M.: Jennergoizdat. – 1981.

[5] Al'tshul' A.D. Gidravlicheskie poteri na trenie v truboprovodah. M.–L.: Gosjenergoizdat, 1963.

[6] Krivchenko G.I. Gidromehaniicheskie perehodnye processy v gidrojenergeticheskikh ustanovkah. M.: Jenergija, 1975.

Глазырин Глеб Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрических станций. Основное направление научных исследований – разработка принципов и алгоритмов управления агрегатами в микропроцессорных групповых регуляторах мощности гидроэлектростанций. Имеет 12 публикаций. E-mail: glazyring@gmail.com

Твердохлебов Николай Николаевич, аспирант кафедры электрических станций. Основное направление научных исследований – разработка принципов и алгоритмов управления агрегатами в микропроцессорных групповых регуляторах мощности гидроэлектростанций. Имеет 3 публикации. E-mail: tnn.nsk@bk.ru

Казанцев Юрий Валентинович, аспирант кафедры электрических станций. Основное направление научных исследований – разработка принципов и алгоритмов управления агрегатами в микропроцессорных групповых регуляторах мощности гидроэлектростанций. Имеет 5 публикаций. E-mail: kazancev_yura@mail.ru

G.V. Glazyrin, N.N. Tverdokhlebov, U.V. Kazantsev

Optimal dividing of active power between units on hydropower plant taking into account the losses of head in the trash screens

This paper addresses the issue of power mode optimization of hydropower units taking into account the losses of head in the trash screens. The criteria and the objective function of optimization are defined. The actual power production limitations are revealed. The method of determining the net head in relation to the flow of water through the hydro-turbine is specified. The algorithm of determining the operating characteristics with the net head is derived. The basic requirements for a method of optimization are justified.

This paper is organized as follows: Section I presents us with base aspect of the issue. Section II is devoted to considering a goal and tasks. In Section III objective function is derived and major constraints are introduced. In Section IV and Section V main relations between variables are described. Section VI is about determining the method of optimization. The conclusion drawn from the work is presented in Section VII.

Key words: group control of active power, hydroplant, hydropower unit, trash screens, microprocessor system, net head, gross head, turbine.