

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС

© 2017 О.К. Альсова, А.В. Артамонова

Новосибирский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 11.12.2017

В статье предложена многокритериальная оптимизационная модель, разработанная для решения задачи планирования водно-энергетического режима Новосибирской ГЭС в соответствии с заданными критериями оптимальности (максимизация суммарного напора и минимизация суммарного расхода за период планирования) при выполнении комплекса ограничений (водно-энергетических, морфометрических, режимных, управленческих, ограничений со стороны водопользователей). Математическая модель формализована и решена как задача линейного программирования. Проведены экспериментальные исследования модели по данным 2017 г. и решена задача подекадного планирования на период с апреля по июль (всего 12 декад). По результатам проведенного исследования сделан вывод о перспективности использования разработанной модели для планирования водно-энергетических режимов Новосибирской ГЭС.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизационная модель, планирование, критерий оптимальности, линейное программирование, водно-энергетический режим, ГЭС.

1. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Новосибирская ГЭС входит в единую энергетическую систему Сибири и является одним из основных крупных технических объектов г. Новосибирска. Изначально ГЭС была построена исключительно с энергетической целью, однако усиление антропогенных процессов привело к смене приоритетов водопользования, а развитие ОЭС Сибири снизило энергетическое значение Новосибирской ГЭС. В настоящее время водные запасы водохранилища используются сложившимся водохозяйственным комплексом: водоснабжение, водный транспорт, сельское и рыбное хозяйство, энергетика.

Периоды экстремально маловодья ставят под угрозу нормальную работу объектов жизнеобеспечения населенных пунктов и промышленных предприятий Новосибирской области и Алтайского края. Многоводные периоды приводят к затоплениям населенных пунктов и сопровождаются весьма сложными и чрезвычайными ситуациями. В связи с этим возникает сложная задача урегулирования интересов различных участников водохозяйственного комплекса для оптимального использования водных ресурсов.

В соответствии с Водным кодексом решения по управлению режимами принимаются территориальными подразделениями Федерального агентства водных ресурсов, при этом учитываются требования водопользователей, указан-

ные в Правилах использования водных ресурсов (далее - ПИВР). Стоит отметить, что при выборе режима управления речным стоком, а также при его оценке нельзя ограничиваться только экономической выгодой от дополнительной выработки электроэнергии. Перед эксплуатирующей организацией стоят такие задачи как: безопасность гидротехнических сооружений, оборудования и людей, безопасных попусков половодья, определяемых правилами технической эксплуатации. В этих условиях актуальной становится задача нахождения оптимального режима при выполнении ограничений всех водопользователей.

Задача планирования водно-энергетического режима ГЭС в весенне-летний период (апрель-июль) является наиболее сложной, т.к. именно в это период происходит постепенное наполнение водохранилища за счет притока воды к створу гидроузла до максимально возможного уровня. Задача планирования может быть решена на основе использования различных математических методов: календарных, имитационных, оптимизационных или их комплексного применения.

В настоящее время на Новосибирской ГЭС задача водно-энергетического планирования режимов решается с помощью имитационного моделирования. Основой такого моделирования является имитационный эксперимент, предполагающий получение некоторых выходных характеристик изучаемого объекта при задании определенных входных воздействий на объект и имитации процесса функционирования объекта во времени. Оптимальный режим ГЭС выбирается на базе имитационного эксперимента, в ходе которого специалист варьирует режимы расчета

Альсова Ольга Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники.

E-mail: alsova@corp.nstu.ru

Артамонова Александра Васильевна, магистрант.

E-mail: artamonova-aleks@mail.ru

и значения исходных параметров и определяет близкое к оптимальному управление. Основным недостатком метода имитационного моделирования заключается в том, что эффективность полученного решения во многом зависит от опыта и интуиции специалиста, вследствие чего, решение не является ни глобально, ни локально оптимальным в математическом смысле. Кроме того, метод трудоемок, его применение требует значительных временных затрат.

Одним из перспективных направлений представляется постановка и решение задачи планирования водно-энергетического режима работы ГЭС как оптимизационной задачи с использованием аппарата математического программирования.

Оптимизационному подходу к решению задачи планирования водно-энергетических режимов посвящено достаточно много работ [1-4]. Однако, в литературе, как правило, модели планирования описаны в общем виде, без привязки к конкретной ситуации. Кроме того, далеко не всегда приводятся результаты вычислительных экспериментов и сведения о практическом применении моделей. Также следует отметить, что каждая ГЭС имеет свои особенности, которые должны быть учтены в модели для получения адекватных результатов решения задачи планирования режимов.

Оптимизационная задача сводится к нахождению наилучшего варианта режима работы ГЭС из всех возможных в соответствии с заданным критерием (критериями) оптимальности при выполнении комплекса ограничений (водно-энергетических, морфометрических, режимных, управленческих, ограничений со стороны водопользователей и других). В данном исследовании задача планирования решается в многокритериальной постановке, в качестве критерия оптимальности выступает максимизация напора гидроустановки и минимизация суммарного расхода за период планирования. Такая стратегия управления приводит к увеличению выработки электроэнергии при обеспечении условий работы неэнергетических водопользователей.

Исходные данные для моделирования были предоставлены Новосибирским отделением ОАО «РусГидро».

2. МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЭС

В основе модели планирования лежит уравнение водного баланса, которое описывает изменение объема водохранилища за период планирования (приток в водохранилище минус суммарный расход равен изменению объема водохранилища за период планирования). В

модели могут использоваться разные критерии оптимальности или их комбинация, т.е. задача планирования может быть формализована и решена как однокритериальная или многокритериальная в зависимости от целей планирования. Также модель включает комплекс ограничений, которые можно разделить на следующие основные группы:

- технические, определяемые характеристиками гидрообъекта (максимальные расходы воды через турбины ГЭС и водосливную плотину, номинальная мощность и др.);
- управленческие, определяемые характеристиками водохранилища, Правилами использования водных ресурсов (ПИВР), диспетчерскими требованиями;
- сезонные (режим наполнения водохранилища в летний период, попуски на навигацию и др.);
- экологические и водохозяйственные, включающие минимизацию ущербов и рисков (исключение ситуаций переполнения верхнего бьефа, затопления нижнего бьефа и др.).

Подробнее рассмотрим один из вариантов оптимизационной модели. Модель позволяет определить оптимальный водно-энергетический режим Новосибирской ГЭС в период наполнения водохранилища (весенне-летний период, 12 декад с апреля по июль) в соответствии с заданными критериями. В модели используется два критерия оптимальности, а именно, максимизация суммарного напора и минимизация суммарного расхода за период планирования.

В качестве исходных данных в модели используется следующая информация:

- прогнозный объем притока к створу гидроузла за i -ую декаду с учетом доверительного интервала, т.е. $p_i \pm \Delta_i$, $i = \overline{1, N}$;
- уровень верхнего бьефа на 1 апреля;
- расчетный перепад на СУР (сороудерживающим решеткам) по декадам;
- зимний коэффициент по декадам;
- минимальные и максимальные значения параметров и переменных, обусловленные ПИВР и морфометрическими характеристиками водохранилища.

Приведем описание исходных данных:

$z_0^u = 108,5$ – уровень верхнего бьефа на 1 апреля, м;

$z_{\min}^u = 108,5$ – минимальный уровень верхнего бьефа (отметка УМО), м;

$z_{\max}^u = 113,5$ – максимальный уровень верхнего бьефа (отметка НПУ), м;

$N=12$ – количество рассматриваемых периодов (декад);

$P^m = (p_i^m)$, $i = \overline{1, N}$ – приток к створу гидроузла ГЭС среднедекадный (апрель-июль), м³/с;

$P^k = (p_i^k)$, $i = \overline{1, N}$ – приток к створу ГЭС среднедекадный (апрель-июль), км³;

$$P^k = K \cdot P^m,$$

где $K = (k_i), i = 1, N$ – коэффициент перевода расхода притока в м³/с в объем притока, км³;

$k_i = t_i \cdot 24 \cdot 3600 / 10^9$, где t_i – количество дней в i -ом периоде (декаде);

$S = (s_i), i = 1, N$ – перепад на СУР за i -ый период, м;

$h_{\min} = 13$ – минимальный допустимый напор гидроустановки (нетто), м;

$h_{\max} = 20$ – максимальный допустимый напор гидроустановки (нетто), м;

$q_{\max i}, i = 1, N$ – максимальный суммарный расход за i -ую декаду, м³/с;

$q_{\min i}, i = 1, N$ – минимальный суммарный расход за i -ую декаду, м³/с.

Переменные модели:

$Q = (q_i), i = 1, N$ – суммарный расход за i -ый период, м³/с;

$Z^u = (z_i^u), i = 1, N$ – уровень верхнего бьефа за i -ый период, м;

На основе значений переменных рассчитываются производные характеристики режима работы ГЭС, значения которых также выдаются на выходе модели:

$Z^d = (z_i^d), i = 1, N$ – уровень нижнего бьефа за i -ый период, м;

$H = (h_i), i = 1, N$ – напор гидроустановки в i -ом периоде (нетто), м.

В модели используется также морфометрическая информация:

Зависимость статического объема водохранилища от уровня верхнего бьефа:

$$V = f(Z^u) = 885,98 \cdot Z^u - 91924,89. \quad (1)$$

Коэффициенты модели оценены по результатам натурных измерений статического объема водохранилища и соответствующего ему уровня верхнего бьефа. В данном исследовании была использована линейная модель аппроксимации для упрощения оптимизационной модели и сведения ее к линейному виду.

Зависимость уровня воды в нижнем бьефе от суммарного расхода также описывается линейной моделью:

$$Z^d = f(Q) = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot Z^d + 93,05. \quad (2)$$

Коэффициенты функции $Z^d = f(Q)$ оценены по результатам натурных измерений суммарного расхода воды и соответствующего ему уровня нижнего бьефа.

В модели используется два критерия оптимальности, первый из которых реализует оптимизацию по напору:

$$C_1 = \sum_{i=1}^N h_i \rightarrow \max, \quad (3)$$

а второй критерий по суммарному расходу:

$$C_2 = \sum_{i=1}^N q_i \rightarrow \min. \quad (4)$$

Для сведения задачи к однокритериальной выполнена нормализация и свертка критериев. Целевая функция модели минимизирует суммарные потери по критериям с учетом весовых коэффициентов и имеет вид:

$$C = c_1 \sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{\max} - h_i}{h_{\max} - h_{\min}} \right) + c_2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{q_i - q_{\max i}}{q_{\max i} - q_{\min i}} \right) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где c_1 и c_2 – весовые коэффициенты, определяющие вклад в целевую функцию каждого из критериев в долях единицы.

Опишем ограничения модели.

В основе модели лежит уравнение водного баланса: разница между объемом притока воды к створу гидроузла и суммарным расходом воды за i -ый период равна изменению объема водохранилища за i -ый период:

$$p_i^k - k_i \cdot q_i = d_i, i = 1, N. \quad (6)$$

Изменение объема водохранилища описывается как разница объемов водохранилища на конец и на начало i -го периода:

$$d_i = f(z_{i+1}^u) - f(z_i^u) = 885,98 \cdot (z_{i+1}^u - z_i^u), i = 0, N. \quad (7)$$

Уровень нижнего бьефа в зависимости от суммарного расхода воды с учетом зимнего коэффициента за i -ый период, в м:

$$z_i^d = f(q_i) \cdot k_i^w, i = 1, N. \quad (8)$$

Напор за i -ый период определяется как разница между уровнями верхнего и нижнего бьефов и перепада на СУР:

$$h_i = z_i^u - z_i^d - s_i, i = 1, N. \quad (9)$$

Ограничение, не допускающее сработку водохранилища в период наполнения (уровень верхнего бьефа в $i+1$ -периоде не ниже уровня верхнего бьефа в i -ом периоде):

$$z_{i+1}^u - z_i^u \geq 0, i = 1, N. \quad (10)$$

Ограничение на равномерность суммарного расхода по периодам планирования (декады мая-июня, ограничение актуально для неэнергетических пользователей):

$$q_i = q_{i+1}, i = 4, 7. \quad (11)$$

Уровень верхнего бьефа должен находиться в пределах отметок НПУ (113,5) и УМО (108,5) в i -ом периоде:

$$z_{\min}^u \leq z_i^u \leq z_{\max}^u, i = 1, N. \quad (12)$$

Ограничения на минимальный и максимальный допустимые напоры за i -ый период:

$$h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max}, i = 1, N. \quad (13)$$

Ограничения на суммарный расход за i -ый период:

$$q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max}, i = 1, N. \quad (14)$$

Построенная оптимизационная модель относится к классу задач линейного программирования и может быть решена с помощью симплекс-

метода. В данном исследовании для решения задачи использовалась программа MSExcel -2013, модуль «Поиск решения» и MathLab.

Далее, на основании полученных в результате расчетов значений переменных модели, производится расчет остальных характеристик водно-энергетического режима, определяется $Q^t = (q_i^t), i = \overline{1, N}$ – расход через турбины ГЭС за i -ый период, в $\text{м}^3/\text{с}$ и $Q^s = (q_i^s), i = \overline{1, N}$ – холостой водосброс за i -ый период, $\text{м}^3/\text{с}$.

Суммарный расход за i -ый период определяется как сумма расхода воды через турбины ГЭС и холостого водосброса:

$$q_i = q_i^t + q_i^s, i = \overline{1, N}. \quad (15)$$

Значение q_i^t определяется по таблице $Q_{\text{max}}^t = f(H, Z^d)$ зависимости максимального расхода через турбины ГЭС от напора и уровня нижнего бьефа. В таблице для каждого значения напора в диапазоне $H \in [13; 20]$ и уровня нижнего бьефа в диапазоне $Z^d \in [92; 97]$ с дискретностью (шагом) 0,1 приведен максимальный расход, который можно обеспечить при заданных характеристиках.

Мощность ГЭС по периодам планирования $W = (w_i), i = \overline{1, N}$ определяется по таблице $W = f(H, Q^t)$ зависимости мощности от напора гидроустановки и расхода через турбины ГЭС.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С помощью разработанной оптимизационной модели было выполнено подекадное планирование водно-энергетического режима Новосибирской ГЭС на период с апреля по июль по данным 2017 г.

Были рассчитаны разные варианты режима, при задании разных сочетаний весовых коэффициентов c_1 и c_2 в целевой функции (5). На рис. 1 приведен график изменения уровня верхнего бьефа, построенный по результатам моделирования, соответственно при $c_1=1$ и $c_2=0$ (максимизация суммарного напора), $c_1=0$ и $c_2=1$ (минимизация суммарного расхода), $c_1=0,1$ и $c_2=0,9$ (компромиссное решение).

На рис. 2 приведен графики изменения водно-энергетических характеристик НГЭС на 2017 г., соответствующий компромиссному решению $c_1=0,1$ и $c_2=0,9$. На графике отображено

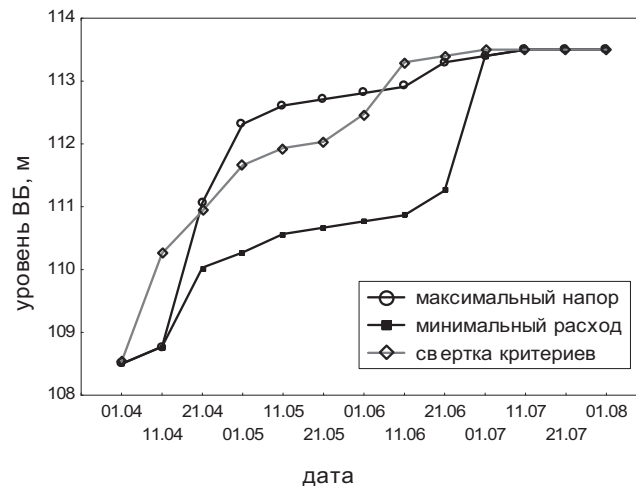


Рис. 1. Уровень ВБ по периодам планирования на 2017 г. с учетом весовых коэффициентов ЦФ

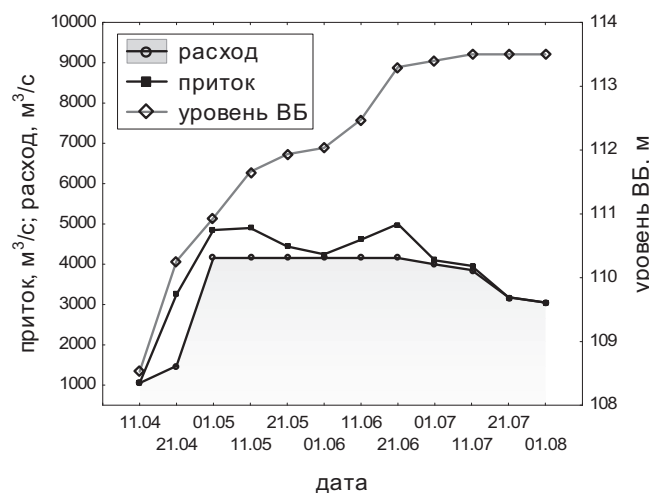


Рис. 2. Водно-энергетические характеристики режима НГЭС на 2017 г.

изменение уровня верхнего бьефа, расхода воды в нижний бьеф и прогнозного притока воды (среднее значение) по декадам.

Учитывая, что на входе модели задается прогнозный объем притока с учетом доверительного интервала, расчеты режима выполняются для

трех вариантов (минимальные, максимальные и средние значения прогнозного объема притока к створу ГЭС). На рис. 3-4 приведены графики изменения уровня верхнего бьефа и суммарного расхода по периодам планирования для трех вариантов исходных данных.

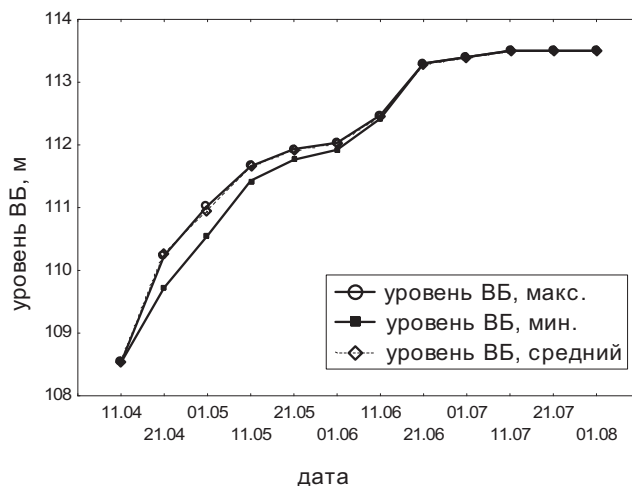


Рис. 3. Уровень ВБ по периодам планирования на 2017 г. с учетом доверительного интервала

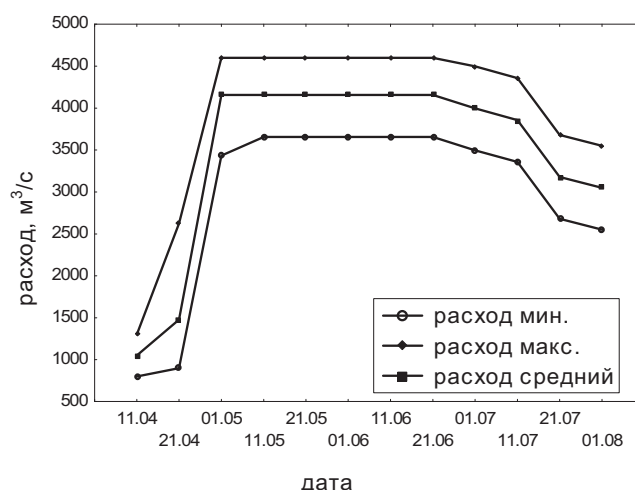


Рис. 4. Суммарный расход по периодам планирования на 2017 г. с учетом доверительного интервала

На основе полученного распределения напора гидроустановки $h_i, i = \overline{1, N}$ и расхода воды через турбины ГЭС $q_i^t, i = \overline{1, N}$ по периодам планирования был также выполнен расчет мощности и выработки электроэнергии ГЭС. В табл. 1. приведены суммарные значения плановых водно-энергетических характеристик на 12 декад (апрель-июль), полученные в результате модельных расчетов.

Специалист может рассчитать разные варианты водно-энергетического режима на основе построенной модели, путем варьирования весов c_1 и c_2 критериев оптимальности в целевой функции (5), руководствуясь целями планирования и учитывая специфику конкретной ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о перспективности использования разработанной модели для расчета водно-энергетических режимов НГЭС. В дальнейшем планируется усовершенствовать модель, заменить линейные зависимости объема водохранилище от уровня верхнего бьефа и уровня нижнего бьефа от суммарного расхода на нелинейные для более точного расчета. Значения характеристик и переменных, рассчитанные по линейной модели, могут использоваться в качестве начального приближения при построении нелинейной модели.

Таблица 1. Значения плановых водно-энергетических характеристик НГЭС (период с 01.04 по 31.07.2017 г.)

Характеристики режима	Миним. значения	Средние значения	Максим. значения
Суммарный объем притока, км ³	35,6	40,9	46,2
Суммарный расход через турбины ГЭС, км ³	29,66	31,39	32,70
Суммарные холостые сбросы, км ³	1,54	5,13	9,10
Выработка электроэнергии, млн.кВт.ч	1080,3	1103,5	1110,3

Кроме того, необходимо выполнить сравнительный анализ разных подходов (имитационный, оптимизационный) и методов к планированию водно-энергетических режимов НГЭС и разработать единую методику расчета. На основе разработанных моделей и методики в дальнейшем планируется разработать программный комплекс, предназначенный для поддержки принятия решения специалистом о выборе водно-энергетического режима НГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидроэнергетика: учебник для вузов [под ред. В.И. Обрезкова]. М.: Энергоиздат, 1981. 608 с.
2. Митрофанов С.В. Разработка системы поддержки принятия решений на основе многокритериальной оптимизации состава агрегатов ГЭС: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013. 213 с.
3. Осипчук Е.Н. Методическое и программное обеспечение исследования режимов ГЭС с использованием метамоделей: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2013. 175 с.
4. Цветков Е.В., Алябьева Т.М., Парфенов Л.Г. Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 304 с.

MULTI-OBJECTIVE MODEL FOR PLANNING WATER-ENERGY MODES OF NOVOSIBIRSK HYDRO POWER PLANT

© 2017 O.K. Alsova, A.V. Artamonova

Novosibirsk State Technical University

In this article developed multi-objective optimization model is proposed to solve the problem of planning water-energy modes of the Novosibirsk HPP in accordance with a predetermined optimality criteria (maximizing total water head and minimizing total discharge for the planning period) satisfying all constraints (water-energy, morphometric, regime, management, water consumers). The mathematical model was formalized and solved as a linear programming problem. Experimental study of the model has been carried out with 2017 data and the task of ten-day period planning from April to July (only 12 ten-day periods) was solved. Based on the results of the study, the conclusion about application perspectiveness of the developed model for planning water-energy modes of the Novosibirsk HPP was made.

Keywords: multi-objective optimization model, planning, optimality criterion, linear programming, water-energy mode, HPP.

Olga Alsova, Candidate of Technics, Associate Professor at the Computer Engineering Department.

E-mail: alsova@corp.nstu.ru

Alexandra Artamonova, Master's Student.

E-mail: artamonova-aleks@mail.ru