

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ГЭС В УСЛОВИЯХ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И СЕТЕВЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ЭТАПЕ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

А. М. Козырев, А. С. Васильев

Национальный исследовательский томский политехнический
университет

Потенциал воды как возобновляемого источника энергии, в настоящий момент времени не использован в полной мере. Для эффективного использования водных ресурсов необходимо на этапе планирования учитывать интересы всех осуществляющих водопользование субъектов, а также субъектов, участвующих в процессе производства, передачи и распределения электроэнергии. Для учета ограничений, накладываемых со стороны этих компаний, применимы приемы математической оптимизации, с помощью которых, можно более детально учитывать начальные условия и ограничения для максимизации выработки электрической энергии на расчетном интервале времени.

В качестве энергетического объекта, на примере которого будет рассмотрен разрабатываемый алгоритм, выбран каскад гидроэлектростанций, расположенный на реке Енисей. Енисейский каскад ГЭС состоит из трех ступеней, расположенных следующим образом: Саяно-Шушенская ГЭС, Майнская ГЭС, Красноярская ГЭС.

Так как водные ресурсы являются основными для жизнедеятельности общества в целом и человека в частности [1], на работу ГЭС накладывается помимо энергетических ограничений еще и ограничения, связанные с законодательством об использовании водных ресурсов (далее – водные ограничения).

В настоящий момент выделяют следующие ограничения целевой функции при расчете режима работы ГЭС на горизонте планирования 1 год [2]: уровень нижнего бьефа, уровень верхнего бьефа, скорость сработки водохранилища, скорость наполнения водохранилища, уровень воды в контролируемых створах колебания уровня воды в нижнем бьефе активная мощность ГЭС, расход воды в нижнем бьефе.

Все ограничения установлены на основании таких факторов, как: экологические условия (требования по уровням и расходам воды), надежность и безопасность для используемого оборудования, управление водохозяйственной и энергетической системами. Таким обра-

зом, ограничения напрямую зависят от потребителей водного хозяйства и электроэнергетической системы.

В результате, при среднесрочном планировании необходимо выполнять расчет области допустимых значений (ОДЗ) для каждого из найденных режимных параметров. Результирующая ОДЗ должна удовлетворять всем ограничениям исследуемой системы, при отсутствии такого рода решения производится корректировка системы ограничений [2, п. 7.4.5].

С учетом ограничений, в формальном виде, задача по нахождению данного оптимума выглядит следующим образом [2]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J N_{ГЭС}(x) k_{сут\ i.j} \Delta t_i \rightarrow \max_x;$$

Ограничения типа неравенств:

по уровням верхних бьефов станций водохранилища

$$z_{в.б.i.j}^{\min} \leq z_{в.б.i.j}(x) \leq z_{в.б.i.j}^{\max};$$

по расходу воды в нижний бьеф каждой ГЭС

$$Q_{н.б.i.j}^{\min} \leq Q_{н.б.i.j}(x) \leq Q_{н.б.i.j}^{\max};$$

по расходу воды из каждого водохранилища

$$Q_{в.i.j}^{\min} \leq Q_{в.i.j}(x) \leq Q_{в.i.j}^{\max};$$

по суммарной мощности всех станций в каждом расчетном интервале

$$\sum N_{ГЭС\ i}^{\min} \leq \sum N_{ГЭС\ i}(x) \leq \sum N_{ГЭС\ i}^{\max};$$

по суммарной пиковой мощности ГЭС

$$\sum N_{ГЭС\ пик\ i}^{\min} \leq \sum N_{ГЭС\ пик\ i}(x).$$

В уравнениях выше использованы следующие обозначения: Δt_i – длительность i -го расчетного интервала, ч; $H_{ср.i}$ – средний за расчетный интервал напор ГЭС, на котором используется расход воды в нижний бьеф водохранилища j -й ГЭС с учетом прохождения его по нижним ступеням каскада; $k_{сут\ i.j}$ – коэффициент суточного регулирования j -й ГЭС (гидроузла) в i -м расчетном интервале [2].

Если анализировать целевую функцию, а также функции ограничений, то очевидно, что задача носит нелинейный характер. Таким образом, при прогнозировании среднесрочного периода рекомендуется использовать методы нелинейного программирования (например, градиентные). В результате решения, выявляется оптимальный водно-энергетический режим, и определяются следующие параметры для

каждого расчетного интервала времени [2]: уровни воды в верхнем бьефе на конец расчетного интервала времени, средний уровень воды в нижнем бьефе, средний расход воды в нижний бьеф, напор воды за расчетный интервал времени, выработка электроэнергии за расчетный интервал времени.

За критерий, при оптимизации режима, выбирается – максимизация вырабатываемой электрической энергии. Мощность зависит от расхода ГЭС через турбины в нижний бьеф [3]:

$$P = 9,81QH\eta,$$

где P – мощность, Q – расход, η – КПД, H – напор.

Откуда, энергия:

$$E(Q) = P(Q) \cdot t = 9,81QH\eta \cdot t \rightarrow \max.$$

За горизонт планирования, на котором будет выполняться поиск оптимума, выбран один год, который в свою очередь разбивается на шаг в 1 месяц. Таким образом, полученный результат энергии, за расчетное время – есть усредненная величина по взятому расчетному промежутку, которая должна быть максимальной.

Оптимизация режимов работы ГЭС, в общем случае – есть итерационный поиск значений независимых переменных (расходов) для обеспечения наиболее благоприятных режимов работы ГЭС. Режимы работы ГЭС определяются путем проведения водно-энергетического расчета, результатом которого являются показатели мощности ГЭС и выработки энергии. Алгоритм, по которому реализован ВЭР, представлен на рисунке 1:

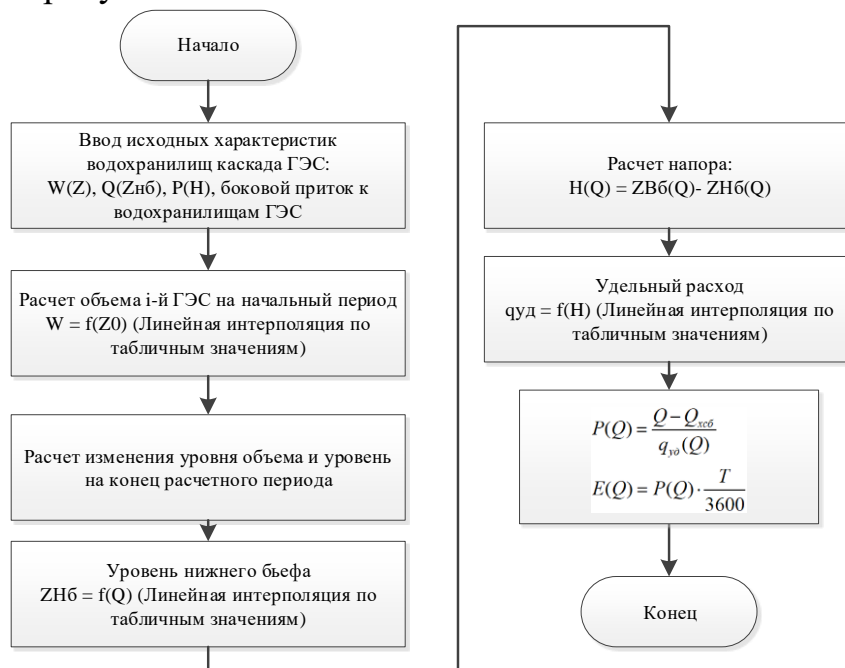


Рисунок 1 – блок-схема водно-энергетического расчета

Очевидно, что все величины, определенные в ходе водно-энергетического расчета, имеют либо прямую, либо косвенную зависимость от величины расхода воды в нижний бьеф электростанций, поэтому целевая функция является функцией нескольких переменных, определенная на множестве значений расхода. Основным вектор переменных, для исследуемого энергетического объекта:

$$Q = (Q_{СШ}, Q_M, Q_K) = (Q_1, Q_2, Q_3),$$

где $Q_{СШ} = Q_1$, $Q_M = Q_2$, $Q_K = Q_3$ – расходы воды в нижний бьеф Са-яно-Шушенской, Майнской и Красноярской ГЭС, соответственно.

Энергия для каждой отдельно взятой электростанции также представляет из себя функцию расхода, следовательно, функция полной энергии каскада выглядит так:

$$E(Q) = E_1(Q_1) + E_2(Q_2) + E_3(Q_3) \rightarrow \max$$

где E_1, E_2, E_3 – энергии соответствующей ступени на расчетном промежутке времени.

Поскольку оптимизация является условной, а применяемые методы оптимизации безусловные, то учет ограничений удобно выполнять методом штрафных функций [4], накладываемых на целевую

$$EE(Q, R) = [-[E_1(Q_1) + E_2(Q_2) + E_3(Q_3)] + \Omega(R, P(Q))],$$

где $EE(Q, R)$ – расширенная функция; $\Omega(R, P(Q))$ – штрафная функция; R – штрафной параметр; $P(Q)$ – кривая ограничения по мощности.

Для определения уровня граничных значений вырабатываемой мощности с учетом совокупности ограничений, накладываемых водными хозяйствами и электрической сетью, необходимо проанализировать графики ограничений на среднесрочной перспективе, выполняя разбиение по дням. Это необходимо, так как ремонтные кампании, для различного сетевого оборудования, различные по временным интервалам, а среднесрочное планирование выполняется либо для месяца, либо для декады. Таким образом, на один расчетный интервал планирования может попасть более одного ремонта. Так как оптимизация выполняется в среднесрочной перспективе, то необходимо алгебраически усреднять на интервалах планирования наименьшие из заданных граничных значений. Алгоритм расчета граничного значения на октябрь месяц выглядит следующим образом:

$$P_{ГРМ \max n} = \frac{\sum P_n}{N},$$

$$P_{ГРМ \max n} = \frac{\sum P_n}{N} + \frac{P_{ОстНач}}{T_{ОстНач}} + \frac{P_{ОстКон}}{T_{ОстКон}},$$

где n – порядковый номер дня с ограничением, количество дней с ограничением P_n – результирующее ограничение по каждому дню, N – количество полных дней на расчетном интервале, $P_{\text{ОстНач}}$, $P_{\text{ОстКон}}$ – ограничения мощностей переходящие между двумя соседними интервалами при количестве дней в месяце отличном от 30, $T_{\text{ОстНач}}$, $T_{\text{ОстКон}}$ – длительность дробных временных интервалов (в долях суток), по концам декад внутри месяца при количестве дней в месяце отличном от 30.

В результате, после учета ограничений, составления целевой функции и выбора метода наискорейшего спуска для решения задачи максимизации электрической энергии, окончательный алгоритм выглядит следующим образом:

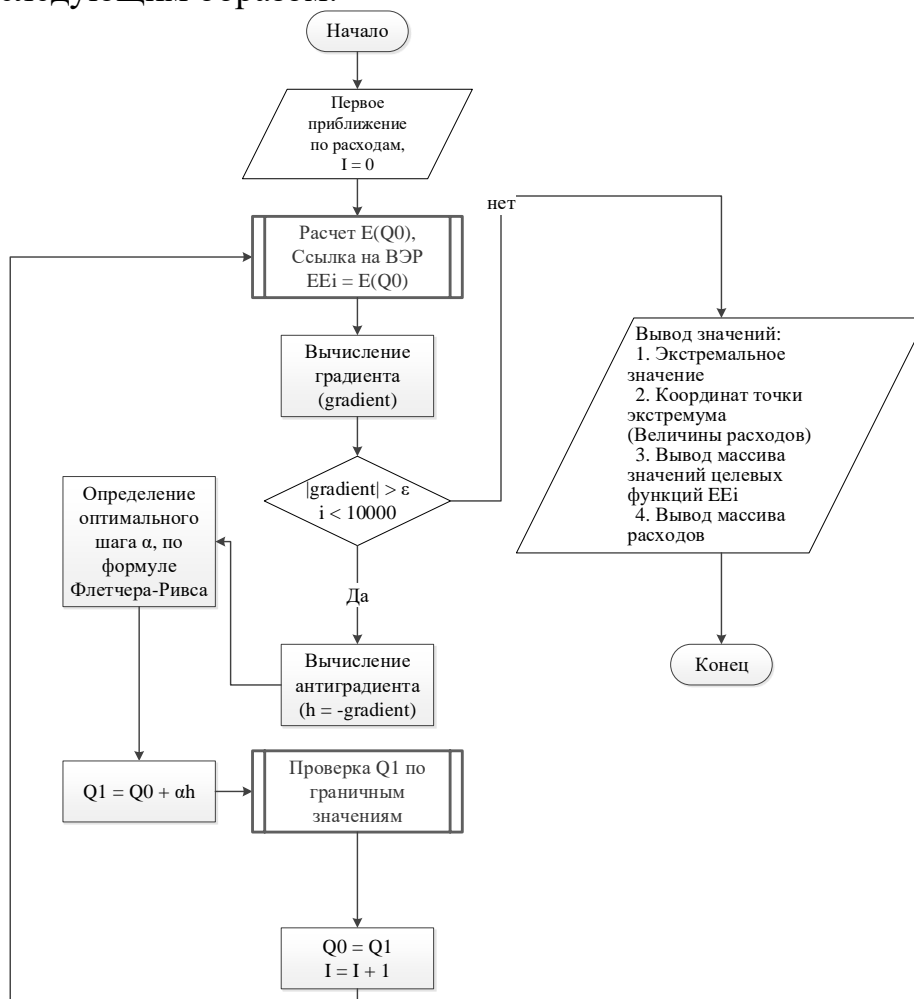


Рисунок 2 – блок схема предлагаемого алгоритма

На рисунке 3 представлен график вырабатываемой электрической энергии Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от расхода с учетом ограничений (пунктирная линия) и без учета ограничений (сплошная линия):

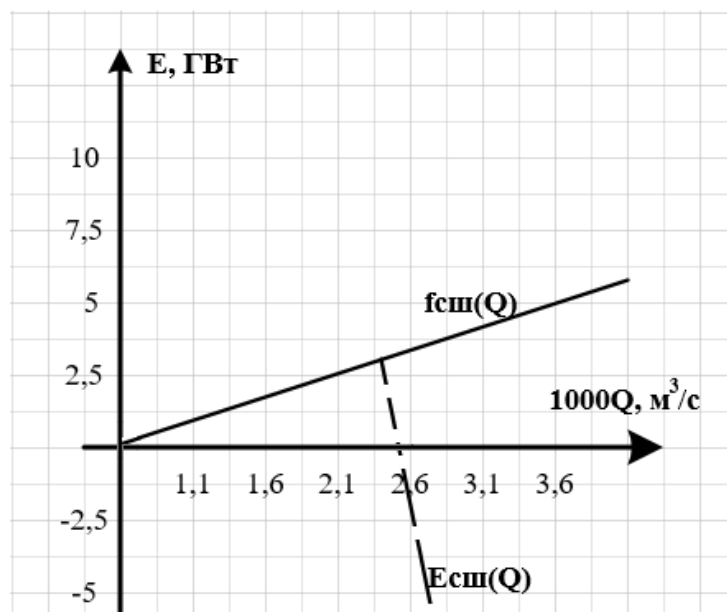


Рисунок 3 – график вырабатываемой электрической энергии Саяно-Шушенской ГЭС с учетом штрафных функций (2) и без (1)

Как видно из графика, при отсутствии ограничений метод оптимизации расходится на бесконечности, тогда как введения ограничений выявляет определенный экстремум у исследуемой функции.

Список литературы

1. Федеральный закон от 03.06.2016 N 74-ФЗ "Водный кодекс Российской Федерации".
2. Стандарт организации ПАО «РусГидро» N 06.01.84-2013 «Гидроэлектростанции. Планирование водноэнергетических режимов. Методические указания».
3. Гидроэнергетика: учеб. пособие / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. – 3-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 620 с.(Серия «Учебники НГТУ»).
4. Харчистов Б.Ф. Методы оптимизации: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 140с.

Научный руководитель: А. С. Васильев, к.т.н., доцент ИШЭ ТПУ.