УДК 621.22.01

Д. Н. НУРМАХМАТОВ, ГидроОГК, (г. Москва)

ЛОКАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

Розглядається задача оперативного управління електричною потужністю, що виробляється, та рівнями води в каскадах водосховищ та ГЕС. З застосуванням методу прогнозуючих моделей знайдено локально-оптимальне управління гідроенергетичною системою.

Рассматривается задача оперативного управления вырабатываемой электрической мощностью и уровнями воды в каскадах водохранилищ и ГЭС. С использованием метода прогнозирующих моделей найдено локально-оптимальное управление гидроэнергетической системой.

The problem of operative control by the produced electric power and water levels in the cascades of storage reservoirs and hydropower stations is considered. Using the predictive model control method the locally-optimal control of the hydropower system is found.

Введение. Одной из важнейших задач современной энергетики является повышение качества процессов автоматизированного управления сложными гидроэнергетическими системами и комплексами, в том числе каскадами водохранилищ и гидроэлектростанций (ГЭС), позволяющими осуществлять эффективное регулирование речного стока для обеспечения возможности реализации неравномерного режима работы ГЭС с целью покрытия пиковой части графика нагрузок и маневрирования вырабатываемой мощностью.

Повышение эффективности функционирования гидроэнергетических систем с каскадами ГЭС в значительной мере связано с совершенствованием оперативно-диспетчерского управления их работой с целью обеспечения оперативной корректировки планов-графиков выработки электроэнергии на станциях при изменяющихся условиях эксплуатации каскада [1, 2]. При этом система оперативного управления должна обеспечивать максимальное приближение значений генерируемой мощности к заданному диспетчерскому графику нагрузок, в том числе и в пиковых режимах, и поддержание заданных уровней воды в водохранилищах каскада в условиях нестационарного притока и стока с учетом различных режимных и технологических ограничений. Управление непосредственно осуществляется путем изменения расходов воды через гидротурбины ГЭС.

От качества процессов управления водохранилищами каскада в значительной мере зависит надежность и безопасность эксплуатации всей гидроэнергетической системы, а также возможность обеспечения выполнения заданного графика выработки электроэнергии гидроэлектростанциями в изменяющихся условиях эксплуатации, в том числе резких непредвиденных изменений уровня потребления вырабатываемой электрической мощности.

Анализ состояния проблемы. Различные подходы к решению задач оптимального управления гидроэнергетическими системами с каскадами водохранилищ рассматривались в работах [3,4]. С использованием принципа оптимальности и метода динамического программирования в указанных работах получены функциональные уравнения для оптимального управления.

В работе [5] предложено решение рассматриваемой задачи на основе дискретного принципа максимума с учетом наличия возмущений, обусловленных изменениями речного стока. Следует подчеркнуть, что применение указанных методов связано с необходимостью реализации достаточно сложных вычислительных процедур, обладающих высокой чувствительностью к погрешностям задания исходных данных.

В настоящей работе для решения задачи автоматизированного оперативного управления производством электроэнергии и уровнями воды в системе водохранилищ предлагается использовать простой и эффективный в вычислительном отношении метод локально-оптимального управления [6] с прогнозирующими моделями [7,8], обеспечивающий достаточно высокое качество управления в условиях медленно меняющихся возмущений.

Постановка задачи управления гидроэнергетической системой. Рассматривается задача оперативного оптимального управления сложной гидроэнергетической системой, состоящей из M взаимосвязанных гидроэнергетических комплексов "водохранилище - ГЭС". Под решением задачи дискретного оперативного управления гидроэнергетической системой будем понимать нахождение последовательности требуемых значений расходов воды через гидротурбины каждого гидроэнергетического комплекса $f_i(n)$ на начало очередного $n+1$ интервала (шага) управления. В качестве цели управления выступают требования максимального приближения вырабатываемой мощности к заданному диспетчерскому графику нагрузок при выполнении технологических требований по подержанию заданных значений уровня воды в водохранилищах и ограничений по допустимому расходу воды и скорости его изменения.

Зависимость генерируемой мощности от расхода воды через гидротурбины для каждой ГЭС задается рабочими характеристиками гидроэлектростанций $P_i(f_i(n)),\quad i=\overline{1,M},$ которые могут быть с достаточной точностью аппроксимированы линейными зависимостями $P_i(f_i(n))=r_i f_i(n),$ определяемыми путем обработки экспериментальных данных.

Задача управления решается с учетом технологических ограничений на допустимые значения уровней расходов и скоростей их изменения:

$$f_i^- \le f_i(n) \le f_i^+,\ \Delta f_i^- \le \Delta f_i(n) \le \Delta f_i^+,\ i=\overline{1,M}, \tag{1}$$

где $\Delta f_i(n) = f_i(n+1) - f_i(n).$ Тогда в качестве управлений целесообразно выбрать величины, пропорциональные приращениям изменяемых расходов через гидротурбины $c_i u_i(n) = \Delta f_i(n),\ u_i^- \le u_i(n) \le u_i^+,\ u_i^- = c_i^{-1}\Delta f_i^-,\ u_i^+ = c_i^{-1}\Delta f_i^+$, где коэффициенты пропорциональности c_i определяются передаточными характеристиками гидравлических затворов.

Динамика изменения уровней воды в водохранилищах определятся балансом притоков и расходов воды, в том числе неуправляемых стоков и утечек, управляемых водосбросов и расходов через гидротурбины. При этом модель управляемой гидроэнергетической системы может быть представлена в виде системы векторно-матричных разностных уравнений относительно последовательности моментов времени n принятия управляющих решений:

$$\begin{aligned} &h(n+1) = Ah(n) + Bf(n) + v(n),\ n = 0,1,\dots,\\ &f(n+1) = f(n) + Cu(n),\ v(n) = Bw^-(n) - w^+(n), \end{aligned} \tag{2}$$

где $h(n)$ - вектор текущих значений уровней воды в водохранилищах каскада,

$w^+(n),\ w^-(n)$ - векторы суммарных притоков и расходов, определяемых речным стоком, за $n+1$ интервал управления соответственно,

$f(n)$ - вектор непосредственно управляемых расходов воды через турбины гидрогенераторов,

$u(n)$ - вектор управляющих воздействий,

$v(n)$ - вектор эквивалентного возмущения уровней водохранилищ.

Начальные условия $h(0) = h_0,\ f(0) = f_0$ предполагаются заданными.

Параметры модели объекта управления (2) задаются матрицами потерь $A = \mathrm{diag}\{a_1,...,a_M\}$, гидрологических связей $B = (\delta_{ij} b_{ij})$ и коэффициентов передачи исполнительных систем $C = \mathrm{diag}\{c_1,...,c_M\}$, где a_i – коэффициенты, учитывающие потери воды, связанные с испарением с водной поверхности и с фильтрацией из водохранилищ, b_{ij} - коэффициенты, описывающие потери воды вдоль русла реки между соответствующими водохранилищами. Примем, что $\delta_{ij} = 1$, если j-тое водохранилище непосредственно связано с i-тым, и $\delta_{ij} = 0$ в противоположном случае. Очевидно, что для каскадов водохранилищ $\delta_{ij} = 0$ для всех $j < i$ и $\delta_{ii} b_{ii} = -1$.

Введем в рассмотрение векторы требуемых значений уровней воды в водохранилищах h^* и значений мощностей P^*, генерируемых отдельными гидроэнергетическими комплексами. Указанные требуемые значения считаются заданными и могут быть как постоянными, так и изменяющимися в процессе управления.

Сформируем критерий оптимальности процесса управления с фиксированным горизонтом N вида:

$$J_N(n) = \sum_{k=n+1}^{n+N} [\lambda\omega_1(k) - (1-\lambda)\omega_2(k)],$$
$$\omega_1(k) = \sum_{i=1}^{M} [r_i f_i(k) - P_i^*(k)]^2, \; \omega_2(k) = \sum_{i=1}^{M} [h_i(k) - h_i^*(k)]^2, \quad (3)$$

где $\mathbf{U}_N(n) = \{u(n), \ldots, u(n+N-1)\}$ - составной вектор управления.

Весовой коэффициент $0 < \lambda < 1$, определяющий относительную важность составляющих критерия (3), определяется экспертным путем.

Тогда задача оптимального управления с фиксированным горизонтом N может быть сформулирована как задача математического программирования $J_N(n) \to \min\limits_{\mathbf{U}_N(n)}$, включающая в себя минимизацию критерия оптимальности процесса управления (3) с учетом технологических ограничений (1).

Решение задачи методом локально-оптимального управления. Вводя составной вектор состояния системы $x(n) = (h^{\mathrm{T}}(n) \; f^{\mathrm{T}}(n))^{\mathrm{T}}$, перепишем уравнения динамики (2) в эквивалентной матричной форме:

$$x(n+1) = Fx(n) + Gu(n) + Hv(n),$$
$$F = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & I_M \end{pmatrix}, \; G = \begin{pmatrix} 0 \\ C \end{pmatrix}, \; H = \begin{pmatrix} I_M \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где I_M - единичная матрица размера $M \times M$, т - знак транспонирования.

В соответствии с общей методикой локально-оптимального управления [6], введем локальный критерий оптимальности с минимальным горизонтом управления, обеспечивающим непосредственную зависимость переменных состояния от управляющих воздействий. Тогда для уравнений модели (4) критерий локальной оптимальности процесса управления примем в виде:

$$J_{лок}(n) = \lambda \left\| f(n+1) - R^{-1}P^* \right\|^2 + (1-\lambda)\left\| h(n+2) - h^* \right\|^2 + \alpha \left\| u(n) \right\|^2 =$$
$$= \lambda \left\| E_f x(n+1) - R^{-1}P^* \right\|^2 + (1-\lambda)\left\| E_h x(n+2) - h^* \right\|^2 + \alpha \left\| u(n) \right\|^2, \quad (5)$$

где матрицы $E_f = (0 \;\; I_M)$, $E_h = (I_M \;\; 0)$, $R = \mathrm{diag}\{r_1, \ldots, r_M\}$, а весовой коэффициент α определяет штрафную составляющую критерия за превышение значениями управлений заданных ограничений.

Вначале будем предполагать, что уровни речного стока, определяющие эквивалентные возмущения $v(n)$ известны. Тогда, минимизируя критерий локальной оптимальности (5) по вектору управляющих воздействий $u(n)$ в момент времени n с учетом уравнений динамики (4), получим закон локально-оптимального управления в следующем виде:

$$u^*(n) = W^{-1}(\alpha)(\lambda C^{\mathrm{T}} R^{-1} P^* + (1-\lambda) C^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}} (h^* - Av(n) - v(n+1)) - Dx(n)),$$
$$W(\alpha) = \alpha I_M + C^{\mathrm{T}}(\lambda I + (1-\lambda) B^{\mathrm{T}} B) C, \tag{6}$$
$$D = \left((1-\lambda) C^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}} A^2 \quad \lambda C^{\mathrm{T}} + (1-\lambda) C^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}} (I_M + A) B\right).$$

Для полученного закона управления уравнение замкнутой системы приобретает следующий вид:

$$x(n+1) = F_0 x(n) + G_p P^* + G_h h^* + H_0 v(n) + H_1 v(n+1),$$
$$F_0 = F - GW^{-1}(\alpha) D,\ G_p = \lambda G W^{-1} C^{\mathrm{T}} R^{-1},\ G_h = (1-\lambda) G W^{-1} C^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}}, \tag{7}$$
$$H_0 = H - (1-\lambda) G C^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}} A,\ H_1 = -(1-\lambda) G C^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}}.$$

Полученное уравнение позволяет установить граничное значение весового коэффициента α, при котором сохраняется устойчивость замкнутой системы, и оценить достижимую точность управления для заданного диапазона изменения задающих и возмущающих воздействий.

Синтез прогнозирующих моделей. Для реализации предложенного закона локально-оптимального управления (6) соответствующие значения векторов возмущений $v(n)$, определяемых уровнем речного стока, должны быть заменены их оценками, полученными на основе последовательных измерений состояний системы. Заметим, что непосредственно текущее значение вектора возмущения может быть определено на основе измеряемых значений вектора состояния системы лишь с запаздыванием на один шаг по отношению к текущему шагу управления:

$$v(n-1) = h(n) - Ah(n-1) - Bf(n-1) = E_h x(n) - (AE_h - BE_f) x(n-1). \tag{8}$$

Таким образом, для практической реализации закона управления (6) необходимо использовать прогнозированные оценки вектора возмущения. Для построения прогнозирующей модели воспользуемся моделью речного стока в виде волнового процесса, имеющего вид колебательной непериодической функции. Указанные процессы могут быть представлены в виде суперпозиции гармоник с произвольными амплитудами и частотами, возможно изменяющимися во времени. Такой способ описания наиболее адекватен имеющимся данным о характере изменения речного стока, содержащего нестационарные колебательные компоненты.

В рамках предложенного метода i - тая компонента вектора возмущения $v_i(n)$ представляется в виде (далее для простоты записи индекс i опускаем):

$$v(n) = \sum_{j=0}^{m-1} \left[a_j \cos\omega_j n + b_j \sin\omega_j n\right] + \xi_k, \tag{9}$$

где m - число учитываемых в модели гармонических составляющих с неизвестными произвольными частотами $0 < \omega_j = 2\pi f_j T_0 < \pi$,

T_0 - период дискретизации по времени, определяемый длительностью интервала управления,

$\xi(n)$ - компонента погрешности измерений, которая представляет собой дискретный случайный процесс с нулевым средним и ограниченным вторым моментом.

В соответствии с предложенной в [9] методикой, представим процесс (9) в виде линейной авторегрессионной модели:

$$\begin{aligned} v(n) &= \sum_{j=0}^{m-1} \beta_j \left(v(k+j-m) + v(k-j-m) \right) - v(k-2m) + \xi(n) = \\ &= \beta^{\mathrm{T}} v(k,m) + v(k-2m) + \xi(n), \end{aligned} \tag{10}$$

где $v(k,m) = \left(2v(n-m), v(n-m+1) + v(n-m-1), \ldots, v(n-1) + v(n-2m+1)\right)^{\mathrm{T}}$ - вектор предыстории прогнозируемого процесса,

$\beta^{\mathrm{T}} = (\beta_0, \beta_1, ..., \beta_{m-1})$ - подлежащий оцениванию вектор параметров модели.

Для решения задачи идентификации авторегрессионной модели (10) используется стандартный квадратичный критерий идентификации вида:

$$J_{ид} = \sum_{k=2m}^{N-1} \left[v(k) + v(k-2m) - \beta^{\mathrm{T}} v(k,m) \right]^2. \tag{11}$$

Для получения рекуррентных оценок нестационарных параметров прогнозирующей модели $\widehat{\beta}(n)$ в режиме реального времени на основе критерия идентификации (8) целесообразно использовать рекуррентный алгоритм идентификации с переменным шагом [9]:

$$\begin{aligned} &\widehat{\beta}(n) = \widehat{\beta}(n-1) + \left[v(n) + v(n-2m) - \widehat{\beta}^{\mathrm{T}}(n-1) v(k,m) \right] v(k,m) r^{-1}(n), \\ &r(n) = \gamma(n) r(n-1) + \left\| v(k,m) \right\|^2, \quad 0 < \gamma(n) < 1, \end{aligned} \tag{12}$$

где выбором параметра настройки шага $\gamma(n)$ алгоритма можно регулировать соотношение между его следящими и фильтрующими свойствами.

В результате прогнозирующая модель для каждой компоненты возмущения, обеспечивающая прогноз возмущения $\widehat{v}(n+p)$ на p шагов, может быть представлена в следующем виде:

$$\widehat{v}(n+p) = \widehat{\beta}^{\mathrm{T}}(n) \widehat{v}(n+p,m) - v(n+p-2m), \quad p \geq 1, \tag{13}$$

где в составе вектора $\widehat{v}(k+p,m)$ элементы $v(k)$, $n \le k \le n+p-1$ заменяются соответствующими одношаговыми прогнозными значениями, рекуррентно вычисляемыми в соответствии с (13).

Выводы. В работе обоснована возможность и показана эффективность применения метода локально-оптимального прогнозирующего управления в задачах управления гидроэнергетическими системами и каскадами водохранилищ и получены явные выражения для законов управления. Рассмотренная методика позволяет осуществить идентификацию и прогнозирование процессов речного стока с учетом характерных особенностей динамики процессов, определяемых нестационарным и колебательным характером изменений стока.

Применение предложенного метода позволяет значительно упростить решение задачи синтеза закона управления, обеспечить получение требуемых свойств замкнутой системы, в том числе устойчивости и качества переходных процессов, снизить степень влияния возмущений, обусловленных влиянием изменения речного стока. Это, в свою очередь, позволит повысить качество процессов автоматизированного управления работой гидроэнергетических комплексов на основе рационального согласования требований по обеспечению выполнения заданного диспетчерского графика производства электроэнергии и требований обеспечения надежности и безопасности функционирования каскада водохранилищ вследствие поддержания заданного уровня воды в водохранилищах.

Дальнейшее развитие предложенной методики может быть связано с разработкой методов многошагового локально-оптимального управления с учетом дополнительных технологических ограничений и учетом факторов неопределенности при решении задачи синтеза закона управления.

Список литературы: ***1.*** Цветков Е.В., Алябышева Т.М., Парфенов Л.Г. Оптимальные рабочие режимы гидроэлектростанций в электроэнергетических системах. - М.: Энергоатомиздат. - 1984. - 265 с. ***2.*** Гидроэнергетика / А.Ю. Александровский, М.И. Кнеллер, Д.Н. Коробова и др.; Под ред. В.И. Обрезкова. - 2-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 608 с. ***3.*** Turgeon A. Optimal operation of multi-reservoir power systems with stochastic inflows // Water Resources Research. - 1980. - Vol. 16 (2). - pp. 275-283. ***4.*** Glattfelder A., Huser L. Hydropower reservoir level control: a case study // Automatica. - 1993. - Vol. 29. - P. 1203-1214. ***5.*** Л.М. Любчик, Д.Н. Нурмахматов, С.А. Шпатенко. Оптимальное оперативное планирование работы сложных гидроэнергетических систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. -6/2. (24). - С. 12-15. ***6.*** Kelmans G.K., Poznyak A.S., Chernitser A.V. Adaptive locally optimal control // Int. J. System Science. - 1981. - vol. 12. - No 2. - P. 235-254. 7. Camacho, E.F., C. Bordons. Model Predictive Control, Springer, London. - 1999. ***8.*** Mayne, D.Q., J.B. Rawlings, C.V. Rao and P.O.M. Scokaert. Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality // Automatica. - V. 36. - 2000. - P. 89-814. ***9.*** Любчик Л.М., Костюк О.В. Адаптивное прогнозирование волновых непериодических временных рядов // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ. - 1999. - Випуск 51. - С. 26-31.

Поступила в редколлегию 15.11.07