



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО
СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ
КАНАЛИЗАЦИОННОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Тевяшев А. Д., Никитенко Г. В., Матвиенко О. И.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Рост тарифов на электроэнергию ведёт к необходимости использования энергосберегающих технологий управления канализационной насосной станцией (КНС). В докладе рассматривается проблема оптимального стохастического управления режимами работы КНС при переходе на трёхуровневый тариф по электроэнергии. При этом КНС рассматривается как стохастический объект, функционирующий в стохастической среде. Стохастический характер среды проявляется в том, что процессы притока сточных вод в приёмный резервуар КНС (входы объекта управления) носят ярко выраженный случайный характер, кроме того, уровни воды на очистных сооружениях (выходы объекта управления) также являются случайными величинами. Стохастический характер объекта управления проявляется в том, что параметры технологического оборудования КНС априорно неизвестны, а оцениваются по экспериментальным данным выборок конечной длины, которые являются случайными величинами. Специфические особенности КНС - относительно малый объём приёмного резервуара (ПР), жёсткие ограничения на условия его перелива или опорожнения (аварийные ситуации) и одноуровневый тариф на электроэнергию привели к использованию упрощённых детерминированных моделей управления КНС. Учёт реальных условий функционирования КНС, разработка и использование более адекватных математических моделей технологического оборудования КНС и трёхуровневого тарифа на электроэнергию позволяет построить более эффективные по материальным затратам методы управления режимами работы КНС на заданном интервале времени $[0, T]$.

Известно [1], что реализация оптимального стохастического управления может быть построена на использовании различных стратегий управления. В качестве оптимальной (по минимуму суммарной стоимости электроэнергии на перекачку всего объёма сточных вод, поступивших в ПР КНС на интервале времени $[0, T]$) стратегии управления режимами работы КНС используется стратегия, при которой откачка сточных вод из ПР КНС должна быть минимальной на интервале времени с максимальным тарифом и максимальной на интервале времени с минимальным тарифом. При этом на фазовые переменные (уровни сточных вод в ПР) накладываются дополнительные экстремальные ограничения, а именно: к моменту времени перехода тарифа на электроэнергию с меньшего на больший - математическое ожидание уровня воды в ПР должно быть минимальным, а перед моментом времени начала минимального тарифа математическое ожидание уровня воды в ПР должны быть максимальным. Кроме того, для любого момента времени $t \in [0, T]$



вероятность переполнения или опорожнения резервуаров должна быть близка к нулю.

Математическая постановка задачи. Интервал управления $[0, T]$ (одни сутки) разбивается на 24 подынтервала, соответствующих каждому часу $k=0, \dots, 23$. Будем предполагать, что при $k=0$ известны: прогнозы притоков сточных вод в ПР в виде условных математических ожиданий, вычисляемых в момент времени $k=0$, с упреждением $l=1, 2, \dots, 23$; уровень воды в ПР - H_0 ; количество работающих насосных агрегатов (НА) - m_0 . Также известны статические данные: структура КНС, длины, диаметры, геодезические отметки участков трубопровода, типы НА, оценки параметров моделей НА, физические размеры ПР, оценки параметров регулирующих и отсекающих задвижек (РЗ) и обратных клапанов.

Целевая функция задачи оптимального стохастического управления режимами работы КНС на интервале времени $[0, T]$ представляет собой математическое ожидание суммы стоимости затрат электроэнергии всеми работающими НС на интервале времени $[0, T]$:

$$M_{\omega} \sum_{k=0}^{23} \sum_{i=1}^m N_{ik}(q_{ik}(\omega)) \cdot s_k \rightarrow \min_{u(k) \in \Omega}, \quad (1)$$

Область ограничений Ω определяется стохастической моделью квазистационарных режимов работы насосной станции [2], моделью приёмного резервуара и вероятностными ограничениями на фазовые переменные:

$$M_{\omega} \left(h_{KNSk}(\omega) - H_k(\omega) - h_{NArk}(q_{rk}(\omega)) + h_{RZrk}(q_{rk}(\omega)) + \sum_{i \in M} b_{lri}(h_{ik}(q_{ik}(\omega)) + h_i^{(g)}) \right) = 0, \quad (2)$$

$$(r = 1, \dots, m),$$

$$q_{vihk}(\omega) = \sum_{r=1}^m q_{rk}(\omega), \quad q_{rk}(\omega) > 0, \quad (3)$$

$$h_{ik}(q_{ik}(\omega)) = \text{sgn } q_{ik}(\omega) S_i(\omega) q_{ik}^2(\omega), \quad i \in M, \quad (4)$$

$$h_{NAik}(q_{ik}(\omega)) = a_{0i}(\omega) + a_{1i}(\omega) q_{ik}(\omega) + a_{2i}(\omega) q_{ik}^2(\omega), \quad i \in L, \quad (5)$$

$$\eta_{NAik}(q_{ik}(\omega)) = d_{0i}(\omega) + d_{1i}(\omega) q_{ik}(\omega) + d_{2i}(\omega) q_{ik}^2(\omega), \quad i \in L, \quad (6)$$

$$N_{NAik}(q_{ik}(\omega)) = \frac{h_{NAik}(q_{ik}(\omega)) \cdot q_{ik}(\omega)}{0,9 \cdot \eta_{NAik}(q_{ik}(\omega))}, \quad i \in L, \quad (7)$$

$$h_{RZik}(q_{ik}(\omega)) = \frac{q_{ik}(\omega) C_i(\omega)}{E_{ik}^2}, \quad i \in R, \quad (8)$$

$$H_k(\omega) = H_{k-1}(\omega) + c_k(q_{vhk}(\omega) - q_{vihk}(\omega)), \quad (9)$$

$$P(H_k(\omega) \leq H^{\max}) \geq \alpha, \quad P(H_k(\omega) \geq H^{\min}) \geq \alpha, \quad \alpha \approx 0,97, \quad (10)$$

$$M_{\omega} \{H^{\max} - H_{23}(\omega)\} \geq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0, \quad (11)$$

$$M_{\omega} \{H_0(\omega) - H^{\min}\} \geq \delta, \quad \delta > 0, \quad (12)$$



Секция 2. Современные информационные, ресурсосберегающие, экологически безопасные технологии в энергетике

где $u(k)$ - вектор управления, определяющий количество работающих НА, положение РЗ; $H_k(\omega)$ - уровень воды в приёмном резервуаре на заданном k -ом интервале времени, H^{\min} - минимально допустимый уровень воды в ПР, H^{\max} - максимально допустимый уровень воды в ПР.

Случайные величины характеризуют: $q_{ik}(\omega)$ – расход воды на i -м участке трубопровода на k -ом интервале времени; $h_{ik}(q_{ik}(\omega))$ - падение напора на i -м участке трубопровода на k -ом интервале времени; $h_{KNSk}(\omega)$ – напор на выходе КНС, $h_{NAik}(q_{ik}(\omega))$ – напор i -го НА; $q_{vkh}(\omega), q_{vihk}(\omega)$ - расход воды на входе и выходе ПР на k -ом интервале времени. $S_i(\omega)$ – оценка гидравлического сопротивления i -го участка трубопровода ($i \in M$); $h_{RZik}(q_{ik}(\omega))$ – падение напора на i -ой РЗ; $\eta_{NAik}(q_{ik}(\omega))$ – КПД i -го НА; $a_{0i}(\omega), a_{1i}(\omega), a_{2i}(\omega), d_{0i}(\omega), d_{1i}(\omega), d_{2i}(\omega)$ – оценки параметров НА ($i \in L$); $C_i(\omega)$ – оценка параметров РЗ ($i \in R$); E_{ik} – степень открытия РЗ ($E \in (0,1)$); $h_i^{(g)}$ – геодезическая отметка i -го участка трубопровода ($i \in M$), b_{1ri} – элемент цикломатической матрицы; $N_{NAik}(q_{ik}(\omega))$ - оценка затрат мощности i -ым НА на k -ом интервале времени; c_{zk} - коэффициент, обратно пропорциональный площади ПР; m - количество НА на КНС; s_k - тариф на электроэнергию на k -ом интервале времени; $M\{\cdot\}_\omega$ - математическое ожидание случайной величины $\{\cdot\}$.

В докладе приведен приближённый метод решения рассматриваемой задачи, путём перехода от стохастической задачи (1) – (12) к её детерминированному эквиваленту, решение которого осуществляется модифицированным методом ветвей и границ. Приводятся результаты оценки эффективности предлагаемого метода по сравнению с существующими на примере одной из наиболее крупных КНС Украины. Показано, что использование предложенного метода, при переходе на трёхуровневый тариф по электроэнергии, позволяет более эффективно использовать ёмкость приёмного резервуара КНС и существенно (до 40%) снизить стоимость затрат электроэнергии на перекачку сточных вод КНС на интервале времени $[0, T]$.

1. Бертсекас, Д. Стохастическое оптимальное управление [Текст] / Д. Бертсекас, С. Шрив. – М. : Наука, 1985. – 280 с.

2. Тевяшев, А. Д. Об одной стратегии оперативного планирования режимов работы насосной станции [Текст] / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 3.

3. Teviashev A.D., Matvienko O.I. 2014. About One Approach to Solve the Problem of Management of the Development and Operation of Centralized Water-Supply Systems. Econtechmod. An International Quarterly Journal. Vol. 3, №3., 61-76.

4. Тевяшев, А. Д. Стохастическая модель и метод оперативного планирования режимов работы насосных станций [Текст] : матер. IV междунар. науч. – тех. конф. / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко, Г. В. Никитенко // Вода. Экология. Общество. – Х. : ХНУГ им. Бекетова, 2014. – С. 61–64.