

Сравнение корреляционных функций за внутригодовой период показало, что корреляция в осенне-зимний период выше. В летне-весенний период она соизмерима со средним значением как за год, так и за V–VIII и IV–X месяцы. Наибольшее значение разностей между корреляционными функциями — для января-февраля и июня-июля. Существование различий определяется в первую очередь характером формирования стока в эти периоды.

Для оценки возможностей пространственной интерполяции с использованием предлагаемых зависимостей восстановлен сток по ряду рек Белоруссии. При подборе репрезентативных рек-аналогов суммарная ошибка интерполяции и исходных данных в процентах от годовых величин модулей стока составляет 5–10, а для месячных значений — 10–20 %.

Л и т е р а т у р а

1. Исследование и расчеты речного стока / Под ред. В.О. Быкова. — М., 1981. — 228 с. 2. А л е к с е е в Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. — Л., 1971. — 363 с. 3. Р о ж д е с т в е н с к и й А.В., Ч е б о т а р е в А.И. Статистические методы в гидрологии. — Л., 1974. — 424 с. 4. С о м о в Н.В. Асинхронность колебания стока крупных рек СССР // Метеорология и гидрология. — 1963. — № 5. — С. 14–21. 5. К а л и н и н Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. — Л., 1968. — 374 с.

УДК 658.512.011.056:628.1

О.А. НОВИК (БелКТИГХ)

МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В АСУ ТПВОДОСНАБЖЕНИЯ

Система централизованного водоснабжения города характеризуется рядом особенностей: значительным территориальным распределением и огромным числом элементов, формирующих систему; непрерывным развитием в пространстве и во времени; иерархической структурой управляемой и управляющей систем и непосредственным наличием субъекта в контуре управления; непрерывностью во времени процессов транспорта и распределения воды; возможностью создания запасов воды в резервуарах насосных станций,

С точки зрения структуры и назначения отдельных элементов эти системы можно представить в виде четырех независимых по характеру и критериям функционирования подсистем (рис. 1). Назначение первых двух подсистем — подготовка воды требуемого количества и качества, третьей и четвертой — обеспечение потребителей водой в виде потоков, формируемых под воздействием разности давлений, которые создаются насосными станциями.

Первые две подсистемы связываются с третьей через резервуар чистой воды, и поэтому функционирование их может рассматриваться отдельно. Раздельно могут строиться и модели подсистем.

Наибольшую сложность представляет задача построения моделей водораспределительной сети, на которой мы и остановимся. Такая модель должна обеспечивать возможность проведения в реальном масштабе времени расче-

тов оптимальных давлений на выходе насосных станций — $P_{нс k}$, обеспечивающих с минимальными затратами требуемые давления в контрольных точках сети P_i^{TP} (k — номер насосной станции, i — номер контрольной точки).

Такие модели уже разработаны в Академии коммунального хозяйства (АКХ) им. К.Д. Памфилова, Харьковском институте инженеров коммунального строительства (ХИИКС), Сибирском энергетическом институте (СЭИ СО АН СССР). Модели ориентируются на наличие линейной регрессионной связи между давлением на выходе насосных станций $P_{нс k}$ и в контрольных точках сети P_i . Такая модель не позволяет учесть процессы водораспределения в сети, реальную связь контрольных точек трубопроводами. Кроме того, она не учитывает нелинейный характер зависимостей в водораспределительной сети и как следствие — имеет невысокую точность расчетов.

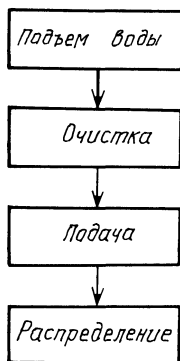


Рис. 1. Структура системы централизованного водоснабжения

Модели, созданные в ХИИКС [2], сложны, требуют проведения большого объема вычислительных работ на дорогостоящих машинах серии ЕС. Последние не могут быть применены для управления технологическим процессом из-за отсутствия устройств сопряжения с объектом.

Разработанные в СЭИ СО АН СССР модели [3] ориентируются в основном на проектирование гидравлических сетей. В оперативном управлении могут быть использованы только отдельные фрагменты таких моделей.

Разработанная автором модель использует преимущества трех указанных ранее: этап планирования заимствован из нелинейной гидравлической модели сети [2], этап стабилизации — из линейной регрессионной модели связи "насосная станция — контрольная точка" [1], метод математического расходомера для расчета сопротивлений — из метода математического расходомера [3]. Иллюстративность такого подхода заключается в возможности реализации модели на мини-ЭВМ (типа СМ-4) и обеспечения точности решения задачи.

В основу модели положены следующие предпосылки: водораспределительная сеть представляет собой систему взаимодействующих двухполюсных элементов — активных (насосные станции) и линий связи; входами сети служат узлы, через которые вода подается в сеть (насосные станции), а выходами все остальные узловые вершины, посредством которых потребители получают воду.

Пример водораспределительной сети представлен на рис. 2.

В общем случае граф сети содержит n вершин и l дуг. Каждой j -й дуге поставлен в соответствие расход воды q_j , а узлу i — давление P_i и водопотребление Q_i . В сети соблюдаются первый и второй законы Кирхгофа:

$$\sum_{j \in M_i} (P_{jн} - P_{jk}) = 0; \quad \sum_{j \in G_i} q_j = Q_i,$$

где $P_{jн}$ и P_{jk} — давление в начале и конце дуги, атм; M — множество индексов дуг, образующих контур; G_i — множество индексов дуг, инцидентных i -му узлу.

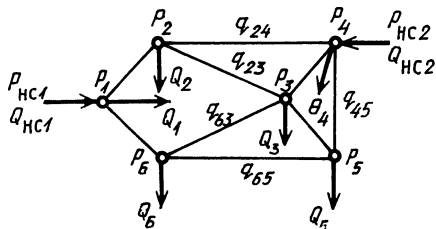


Рис. 2. Водораспределительная сеть

Кроме того, выполняется закон, аналогичный закону Ома для электрических цепей:

$$P_{jk} - P_{jн} = r_j q_j^2,$$

Здесь P_{jk} и $P_{jн}$ — давление в конце и начале j -й дуги соответственно, атм; r_j — сопротивление j -го участка, перерасчитываемое раз в месяц по методу математического расходомера [3]. Последнее делает зависимости в сети нелинейными и исключает применение линейных моделей. В системе водоснабжения измеряемыми параметрами могут быть только: давление $P_{нс_k}$ и подача воды $Q_{нс_k}$ на выходе насосных станций ($k = \overline{1, m}$); давление в узлах водораспределительной сети P_i .

Измерение расходов воды на участках сети q_j и потребления воды потребителями практически затруднено (датчики типа "вертушки" обеспечивают точность измерения порядка 40 % после года эксплуатации, а индукционные расходомеры требуют диаметра участков не более 300 мм). Одним из основных параметров модели являются также требуемые давления P_i^{TP} и водоотборы в узлах сети Q_i^{TP} .

Цель системы водоснабжения в конечном счете определяется обеспечением всех потребителей водой необходимого качества, количества и с наименьшими затратами.

В случае $P_i < P_i^{TP}$ можно говорить, что i -й потребитель не обеспечен водой

в требуемом количестве. Если $P_i > P_i^{TP}$, i -й потребитель получит воду в требуемых количествах, но будет затрачена лишняя энергия на ее подачу. Оптимальным здесь является поддержание $P_i = P_i^{TP}$ (P_i^{TP} учитывает также потерю на транспорт воды потребителям). В качестве целевой функции принимаем

$$\sum_{i=1}^n (P_i - P_i^{TP}) \rightarrow \min, P_i \geq P_i^{TP}. \quad (1)$$

Построенная модель позволяет на основании размера давлений в узлах сети P_i определить $P_{нс_k}$ на выходе насосных станций и их водоподачу $Q_{нс_k}$, обеспечивающие выполнение условия (1).

Следует отметить, что водораспределительная система обладает значительной инерционностью. По данным Академии коммунального хозяйства, период между изменением давления на выходе насосной станции и соответствующим изменением давления в узлах сети составляет 15–20 мин [1].

Значительная инерционность объекта управления, связанная с установлением переходных процессов, а также сложность алгоритма управления водораспределительными сетями приводят к тому, что расчет управляющих воздействий в реальном масштабе времени осуществляется дискретно с периодом $\tau = 15$ мин. Модель учитывает инерционность путем расчета управляющих параметров (давлений на выходе насосных станций $P_{нс_k}$) не для сложившегося вектора водопотреблений в узлах $\{Q_{i,t}\}$ в данный момент t , а для вектора водопотребления в узлах в момент $(t + \tau) - \{Q_{i,t+\tau}\}$. Неполнота информации и нелинейность объекта управления требуют разделения процесса оперативного управления сетями на два этапа: 1) планирование режимов (нелинейная гидравлическая модель сети) и 2) стабилизация режима (регрессионная модель связи давлений на выходе насосных станций $P_{нс_k}$ и в узлах сети P_i). Модель сети позволяет на этапе планирования найти по нелинейным моделям некоторое опорное значение давления на выходе насосных станций $P_{нс_k}^0, t + \tau$, а на этапе стабилизации — определить поправку $\Delta P_{нс_k, t+\tau}$ по линейным моделям регрессионной связи.

Установлена последовательность определения управляющих воздействий по модели:

– расчет отборов воды в узлах сети потребителями $Q_{i,t}$ путем расчетов по уравнениям (1)–(3);

– прогнозирование отборов воды в узлах сети на основании временных рядов водопотребления

$$Q_{i,t+\tau} = A \{Q_{i,t}; Q_{i,t-1}; Q_{i,t-2}; \dots; Q_{i,t-s}\},$$

где A — оператор прогнозирования, s — интервал последействия;

– расчет давления $P_{нс_k}^0$ на выходе насосных станций, обеспечивающих

прогнозные отборы $\{Q_{i,t+\tau}\}$ с учетом минимизации функции $\sum_{i=1}^n (P_{i,t+\tau} - P_i^{TP}) \rightarrow \min$ при условии $P_i \geq P_i^{TP}$.

— вычисление коэффициентов регрессии p в уравнении связи $\Delta P_{t+\tau} = p \Delta P_{\text{нс}, t+\tau}$, где $\Delta P_{t+\tau}$ — вектор отклонений давлений в узлах, атм; $\Delta P_{\text{нс}, t+\tau}$ — вектор отклонений давлений на насосных станциях, атм;

— расчет давления на выходе насосных станций $P_{\text{нс}, k, t+\tau} = P_{\text{нс}, k, t+\tau}^0 + \Delta P_{\text{нс}, k, t+\tau}$;

— определение комбинации насосных агрегатов с наименьшими затратами, обеспечивающей расчетное давление $P_{\text{нс}, k, t+\tau}$ и прогнозную водоподачу $Q_{\text{нс}, k, t+\tau}$ на k -й насосной станции в момент $t + \tau$.

Определение отборов воды в узлах $Q_{i,t}$ производится по известным давлениям в узлах сети $P_{i,t}$ и сопротивлениям участков $r_{j,t}$. Сначала находится расход в дугах

$$q_{j,t} = \sqrt{\frac{|P_{jk,t} - P_{jn,t}|}{r_{j,t}}}$$

где $P_{jk,t}$ и $P_{jn,t}$ — давление в конце и начале j -й дуги, атм.

$$Q_{i,t} = \sum_{j \in G_i} q_{j,t}$$

Индексы в дальнейшем будут обозначать: i — часы суток; j — порядковый номер дня; t — момент времени, для которого определяется параметр.

Прогнозирование водопотребления по всем узлам сети производится с помощью метода предельных циклов, рекомендованного Академией коммунального хозяйства [1]. Метод основан на представлении временного ряда водопотребления $\{Q_j\}$ на фазовой плоскости в координатах Q (величина часового расхода) и dQ/dt .

Характер траектории на фазовой плоскости позволяет судить о направлении развития, а ее математическое описание — осуществлять прогнозирование. Если исходный ряд, представленный на фазовой плоскости, усреднить, получим эллипс. Приведение исходного ряда водопотребления к стационарному осуществляется путем учета весовых коэффициентов текущего дня недели и вычитания среднего значения водопотребления из текущего значения водопотребления. На основании весового коэффициента

$$a_j = \frac{\sum_{i=(j-1) \cdot 24 + 1}^{j \cdot 24} Q_i}{24}$$

и централизованных значений расхода

$$Q_i^0 = (Q_i - \bar{Q}_i) a_j \quad (2)$$

определяется производная расхода

$$\frac{dQ_j^0}{dt} = \frac{Q_j^0 - Q_{j-1}^0}{\Delta t} \quad (3)$$

Далее декартовы координаты (2) и (3) заменяются полярными. Усредняются координаты точек, попавших в центральный угол, который соответствует одному часу (т.е. $2\pi/24 \approx 0,26$ рад). В результате получаем прогнозные значения почасовых расходов. Прогнозирование водопотребления ведется отдельно по каждому узлу сети.

Расчет давлений на выходе насосных станций, обеспечивающих минимум отклонения давлений в узлах от требуемых, производится при известных отборах в узлах с помощью гидравлического расчета по методу Ньютона.

Статистические ряды данных об отклонении (за два дня) давлений в узлах сети: $\Delta P_t = P_t^\Phi - P_t^P$ (P_t^Φ и P_t^P — векторы фактических и расчетных давлений в узлах сети) и на выходе насосных станций: $\Delta P_{нс} = P_{нс} - \bar{P}_{нс}$ ($\bar{P}_{нс}$ — среднемесячное значение давления на выходе насосных станций для расчетного часа) связываются линейным уравнением регрессии. Рассчитывается матрица коэффициентов множественной регрессии p и определяется значение

$$\Delta P_{нс, t+\tau} = p^{-1} \Delta P_t$$

Требуемое давление на выходе k -й насосной станции

$$P_{нс, k, t+\tau} = P_{нс, k, t+\tau}^0 + \Delta P_{нс, k, t+\tau}$$

Значения требуемого давления $P_{нс, k, t+\tau}$ и водоподачи $Q_{нс, k, t+\tau}$ являются исходными для определения оптимальной комбинации работающих насосов из числа установленных на k -й насосной станции.

Модель внедрена в виде комплекса программ реального масштаба времени для АСУ ТП водоснабжения г. Бреста.

Л и т е р а т у р а

1. Временная методика проектирования оперативного управления водопроводом. — М., 1977. — 61 с.
2. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. Оперативное управление покораспределением в инженерных сетях. — Харьков, 1980. — 144 с.
3. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. — Новосибирск, 1983. — 169 с.