

УДК(519.9+518.5): 532.54

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМ

Доктора техн. наук, профессора ПАНОВ М. Я., ЩЕРБАКОВ В. И.,
ассист. МАРТЫНЕНКО Г. Н.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Моделирование процессов оперативного управления гидравлическими системами (ГС) должно строиться на основе прогноза режимов потребления целевого продукта (ЦП). Несомненный интерес представляет построение дроссельных характеристик ГС в области обратного анализа с заманчивой перспективой точного прогноза глубоких изменений режима потребления. Однако задача обратного анализа строится на основе прямоугольной матрицы модели возмущенного состояния (МВС) [1] с неизвестными компонентами $S_i, i \in \{I_D\}$ и ставит целью определение последних (помимо расчета потокораспределения) при априорно заданном режиме потребления ЦП (где S_i – коэффициент гидравлического сопротивления дроссельного элемента i , I_D – полное число участков с дросселями):

$$\|C^r | C_D^r | C^f\| \left\| \begin{array}{c} R_{(d)}^r \\ R_{D(d)}^r \\ R_{(d)}^f \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ Q_D^r \\ Q^f \end{array} \right\| = \|M^T \| \|\hat{H}\| ; \quad (1)$$

$$\|K\| \left\| \begin{array}{c} R_{(d)}^r \\ R_{D(d)}^r \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ Q_D^r \end{array} \right\| = \|0\| ; \quad (2)$$

$$\|A^r | A_D^r | A^f\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ Q_D^r \\ Q^f \end{array} \right\| = \|\hat{q}\| , \quad (3)$$

где $R_i^r = S_i^r (Q_i^r)^{\alpha-1}$; $R_i^f = S_i^f (Q_i^f)^{\alpha-1}$; α – показатель степени в формуле Дарси–Вейсбаха; $\|C\|$, $\|K\|$, $\|A\|$ – топологические единичные матрицы

цепных, контурных и узловых элементов бинарного структурного графа (БСТГ) соответственно; \hat{H}, \hat{q} – фиксированные узловые потенциалы и отборы (включая нулевой); T – признак транспонирования, верхние индексы r и f соответствуют реальным (РЗ) и фиктивным (АП) сетевым структурам; нижний индекс (d) относится к элементам диагональной матрицы.

Из МВС [1] выделен блок с нижним индексом D , причем в этом случае размер прямоугольной матрицы (1)...(3) составляет $\mathbf{I} + (\mathbf{I} + \mathbf{I}_D)$, где \mathbf{I} – полное множество участков БСТГ.

Подобная постановка вынуждает искать дополнительные линейно-независимые связи, избыточные по отношению к связям, синтезирующим структуру МВС. Отметим, что модель возмущенного состояния получена как результат решения вариационной задачи, отражающей принцип наименьшего действия применительно к ГС [1], т. е. связь между переменными формируется на уровне функционала и в вариационном смысле является исчерпывающей. Дополнительную связь следует искать в недрах регрессионного анализа [2], и такая связь устанавливается с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Гидравлическая сетевая система относится к транспортным системам с глубокими внутренними связями и конфигурацией МВС, адаптированной к энерго- и массообмену с окружающей средой через множество энергоузлов \mathbf{J}_n с фиксированным узловым потенциалом, рабочая среда (ЦП) – несжимаема, течение – установившееся, изотермическое. В отличие от методов регрессионного анализа вопрос качества исходной информации здесь не рассматривается, поскольку это не связано с измерительной аппаратурой и ее погрешностью, т. е. такие независимые переменные, как априорно заданные значения расходов среды фиктивных линий ($Q_j^{fa}, j \in \{\mathbf{J}_n\}$) (рис. 1), являются величинами детерминированными, хотя и подверженными влиянию субъективных факторов.

Известно, что МНК строится на минимизации некоей остаточной функции F , в данном случае для множества \mathbf{J}_n компонентов векторов \mathbf{H} и \mathbf{Q} , связанных между собой однозначной зависимостью в форме уравнения Бернулли. Учитывая изложенное выше, представим целевую функцию применительно к ГС на основе МНК:

$$F = \sum_{j \in \mathbf{J}_n} \left[s_j^f (Q_j^{fa})^\alpha - s_j^f (Q_j^f)^\alpha \right]^2 + \left(\sum_{j \in \mathbf{J}_n} Q_j^{fa} - \sum_{j \in \mathbf{J}_n} Q_j^{fa} \right), \quad (4)$$

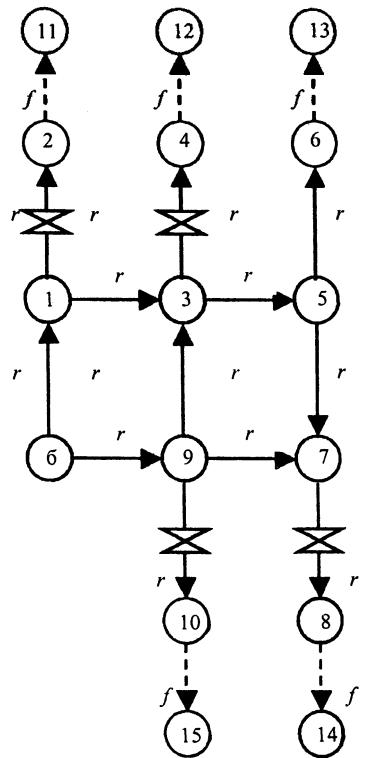


Рис. 1. Бинарный структурный граф водопроводной сети: 2, 4, 6, 8, 10 – энергоузлы расчетной зоны

где Q_j^{fa} , Q_j^f – априорно заданное и фактическое значения расхода ЦП через фиктивный участок j ; λ – множитель Лагранжа; $\{J_\pi\}$, $\{J_n\}$ – множества источников и стоков ГС соответственно.

Условия экстремума (минимума) целевой функции позволяют сформировать систему нормальных уравнений

$$\frac{\partial F}{\partial Q_j^{fa}} = 2 \left[S_j^f (Q_j^{fa})^\alpha - S_j^f (Q_j^f)^\alpha \right] \left[\alpha S_j^f (Q_j^{fa})^{\alpha-1} \right] + \lambda = 0, \quad j \in \{J_n\}. \quad (5)$$

Фактические расходы Q_j^f , будучи «связанными» моделью потокораспределения, независимыми в рамках априорного прогноза не являются. Исключение λ приводит к системе $(J_n - 1)$ нормальных уравнений, удовлетворяющих условию

$$(S_j^f)^2 (Q_j^{fa})^{\alpha-1} \left[(Q_j^{fa})^\alpha - (Q_j^f)^\alpha \right] = \text{idem}, \quad j \in \{J_n\}. \quad (6)$$

Полная математическая модель возмущенного состояния ГС в области обратного анализа, формализующая синтез дроссельных характеристик системы и включающая МВС (1)...(3) и систему нормальных уравнений, представлена ниже в матричном виде:

$$\|C^r | C_D^r | C^f\| \left\| \begin{array}{c} R_{(d)}^r \\ R_{D(d)}^r \\ R_{(d)}^f \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ Q_D^r \\ Q^f \end{array} \right\| = \|M_s^T\| \| \hat{H} \|; \quad (7)$$

$$\|K\| \left\| \begin{array}{c} R_{(d)}^r \\ R_{D(d)}^r \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ Q_D^r \end{array} \right\| = \|0\|; \quad (8)$$

$$\|A^r | A_D^r | A^f\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ Q_D^r \\ Q^f \end{array} \right\| = \| \hat{q} \|; \quad (9)$$

$$\|E^f\| \| \Theta_{(d)}^f \| \| Q^f \| = \| E^f \| \| \Delta_{(d)}^f \|, \quad (10)$$

где $\Theta_j^f = (S_j^f)^2 (Q_j^{fa} Q_j^f)^{\alpha-1}$; $\Delta_j^f = (S_j^f)^2 (Q_j^{fa})^{2\alpha-1}$.

Единичная матрица $\|E^f\|$ содержит в каждой строке по два единичных элемента противоположного знака, число столбцов равно числу фиктивных участков, число строк – на единицу меньше в силу условия (6), т. е. ее размеры $(J_n - 1) \times J_n$. Размер объединенной квадратной матрицы (7)...(10) со-

ставляет $(\mathbf{I} + \mathbf{J}_n - 1) \times (\mathbf{I} + \mathbf{I}_D)$ и является предельным, число участков с дросселями строго соответствует числу без единицы ЭУ – стоков. Возможно уменьшение числа дроссельных элементов при соответствующем снижении ранга матрицы (7)...(10), но с сохранением ее квадратной конфигурации. В этом случае часть потоков ЦП через ЭУ, не подконтрольная дросселям, остается не прогнозируемой (рис. 1).

Процедура линеаризации нелинейной модели (7)...(10) может быть проведена хорошо изученными методами (например, методом Ньютона), а соответствующая линейная модель потокораспределения, лежащая в основе алгоритма решения задачи обратного анализа, приведена ниже:

$$\|C^r | C_D^r | C^f\| \left\{ \left\| \frac{\alpha h_{(d)}^r}{\alpha h_{D(d)}^r} \right\| \left\| \frac{\delta \bar{Q}^r}{\delta \bar{Q}_D^r} \right\| + \left\| \frac{h_{(d)}^r}{h_{D(d)}^r} \right\| \left\| \begin{matrix} 0 \\ \delta \bar{S}_D^r \\ 0 \end{matrix} \right\| \right\} = \|0\|; \quad (11)$$

$$\|K\| \left\{ \left\| \frac{\alpha h_{(d)}^r}{\alpha h_{D(d)}^r} \right\| \left\| \frac{\delta \bar{Q}^r}{\delta \bar{Q}_D^r} \right\| + \left\| \frac{h_{(d)}^r}{h_{D(d)}^r} \right\| \left\| \begin{matrix} 0 \\ \delta \bar{S}_D^r \end{matrix} \right\| \right\} = \|0\|; \quad (12)$$

$$\|A^r | A_D^r | A^f\| \left\| \begin{matrix} \frac{Q_{(d)}^r}{Q_{D(d)}^r} \left\| \frac{\delta \bar{Q}^r}{\delta \bar{Q}_D^r} \right\| \\ \frac{Q_{(d)}^f}{Q_{D(d)}^f} \left\| \frac{\delta \bar{Q}^f}{\delta \bar{Q}_D^f} \right\| \end{matrix} \right\| = \|0\|; \quad (13)$$

$$\|E^f\| \|\Psi_{(d)}^f\| \|\delta \bar{Q}^f\| = \|E^f\| \|\Phi_{(d)}^f\|, \quad (14)$$

где

$$\psi_j^f = \alpha (S_j^f)^2 Q_j^\alpha (Q_j^{fa})^{\alpha-1};$$

$$\Phi_i^f = S_i^2 Q_i^{fa} \left\{ (Q_i^{fa})^{2(\alpha-1)} [1 + (2\alpha - 1)\delta \bar{Q}_i^{fa}] - Q_i^\alpha [1 + (\alpha - 1)\delta \bar{Q}_i^{fa}] \right\}.$$

Для анализа механизма формирования дроссельных характеристик используются результаты вычислительного эксперимента (алгоритмический язык Delphi 5) по моделированию потокораспределения в области обратного анализа для системы водоснабжения (рис. 1). СПРВ оснащена новыми стальными трубами с водонапорной башней (поз. «б», рис. 1) и четырьмя дросселями, установленными на ответвлениях к энергоузлам РЗ. Прогноз потребления формируется пятью априорно заданными значениями Q_j^{fa} . Довольно широкий (7...67 %) диапазон изменения априорно задаваемых значений расходов дал возможность синтезировать четыре дроссельные характеристики (поз. 1...4, рис. 2). Конфигурация характеристики j -го дросселя может изменяться, будучи в немалой степени зависящей от диапазона варьирования Q_j^{fa} , однако при сохранении устойчивой взаимосвязи $Q_{Dj} = \varphi_j(S_{Dj})$ с дисперсией, не превышающей 2 %. При этом отдельные

фрагменты характеристики либо «накладываются» друг на друга (поз. 1, 2, рис. 2), либо «разворачиваются» друг за другом в единую линию (поз. 3, 4, рис. 2), формируя в обоих случаях рабочий диапазон характеристики.

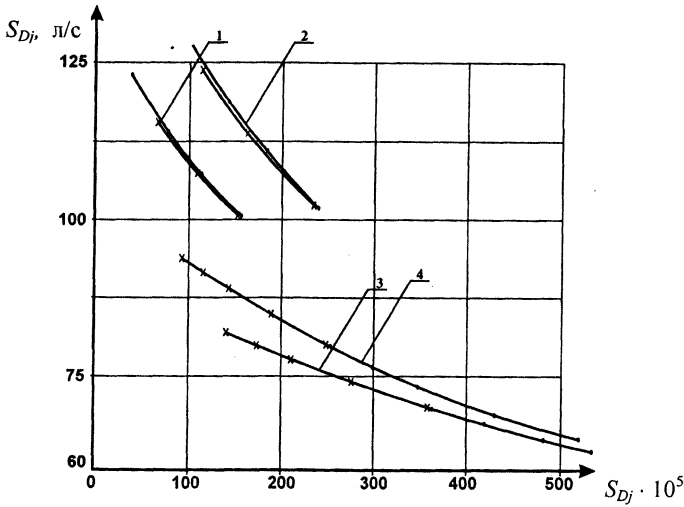


Рис. 2. Дроссельные характеристики системы водоснабжения: 1 – $Q_{D1-2} = \varphi_1(S_{D1-2})$; 2 – $Q_{D7-8} = \varphi_2(S_{D7-8})$; 3 – $Q_{D3-4} = \varphi_3(S_{D3-4})$; 4 – $Q_{D9-10} = \varphi_4(S_{D9-10})$

ВЫВОД

Предложен алгоритм прогноза потребления ЦП: а) предварительный прогноз на основе заданного пользователем диапазона изменения Q_j^{fa} , который состоит в моделировании потокораспределения итерационным решением системы уравнений (11)...(14) и построении дроссельных характеристик; б) точный прогноз на основе полученных характеристик, состоящий в задании значений переменных S_{Dj} , заимствованных из уже построенных характеристик и включенных в базу данных модели (1)...(3) с моделированием потокораспределения.

Значения S_{Dj} , $j \in I_D$ и Q_j^f , $j \in J_n$ по сути и составляют необходимую информацию для осуществления процесса оперативного управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков В. И., Панов М. Я., Квасов И. С. Анализ, оптимальный синтез и реновация городских систем водоснабжения и газоснабжения. – Воронеж: Воронеж. гос. архит.-строит. ун-т, 2001. – 304 с.
2. Основы компьютерного моделирования / Под ред. В. В. Рыкова – М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2000. – 288 с.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения
и пожарной безопасности

Поступила 18.04.2003