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, $\mathbf{I}_D$ – полное число участков с дросселями):

$$\left\| C^r \middle| C_D^r \middle| C^f \right\| \left\| \frac{R^r_{(d)}}{\frac{R^r_{D(d)}}{R^f_{(d)}}} \right\| \left\| \frac{Q^r}{\frac{Q^r_D}{Q^f}} \right\| = \left\| M^T \right\| \left\| \hat{H} \right\| ; \qquad (1)$$

$$\left\| K \right\| \left\| \frac{R^r_{(d)}}{R^r_{D(d)}} \right\| \left\| \frac{Q^r}{Q^r_D} \right\| = \left\| 0 \right\| ; \qquad (2)$$

$$\left\| A^r \middle| A^r_D \middle| A^f \right\| \left\| \frac{Q^r}{\frac{Q^r_D}{Q^f}} \right\| = \left\| \hat{q} \right\| , \qquad (3)$$

где $R_i^r = S_i^r \left(Q_i^r\right)^{\alpha-1}$; $R_i^f = S_i^f \left(Q_i^f\right)^{\alpha-1}$; α – показатель степени в формуле Дарси–Вейсбахи; $\|C\|$, $\|K\|$, $\|A\|$ – топологические единичные матрицы цепных, контурных и узловых элементов бинарного структурного графа (БСТГ) соответственно; $\widehat{H}, \widehat{q}$ – 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.

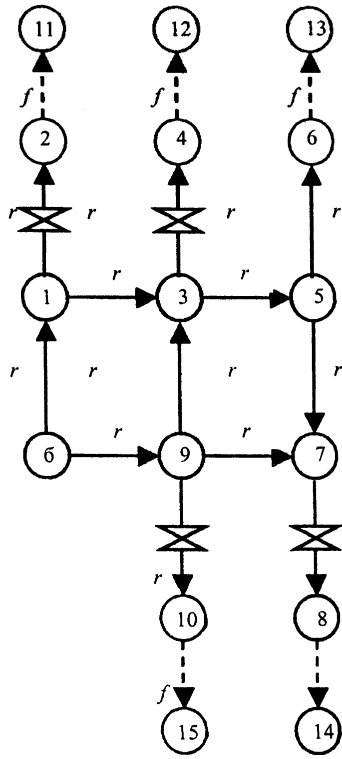

Рис. 1. Бинарный структурный граф водопроводной сети: 2, 4, 6, 8, 10 – энергоузлы расчетной зоны

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:

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

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

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

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

Фактические расходы Q_j^f, будучи «связанными» моделью потокораспределения, независимыми в рамках априорного прогноза не являются. Исключение λ приводит к системе ($\mathbf{J}_n$ – 1) нормальных уравнений, удовлетворяющих условию

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

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:

$$\left\| C^r \middle| C_D^r \middle| C^f \right\| \left\| \begin{array}{c} R^r_{(d)} \\ \hline R^r_{D(d)} \\ \hline R^f_{(d)} \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ \hline Q_D^r \\ \hline Q^f \end{array} \right\| = \left\| M_\bullet^T \right\| \left\| \hat{H} \right\|; \tag{7}$$

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

$$\left\| A^r \middle| A_D^r \middle| A^f \right\| \left\| \begin{array}{c} Q^r \\ \hline Q_D^r \\ \hline Q^f \end{array} \right\| = \left\| \hat{q} \right\|; \tag{9}$$

$$\left\| \mathrm{E}^f \right\| \left\| \Theta^f_{(d)} \right\| \left\| Q^f \right\| = \left\| \mathrm{E}^f \right\| \left\| \Delta^f_{(d)} \right\|, \tag{10}$$

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

Единичная матрица $\left\|E^f\right\|$ 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 ($\mathbf{J}_n$ – 1) × $\mathbf{J}_n$. Размер объединенной квадратной матрицы (7)...(10) составляет $(\mathbf{I} + \mathbf{J}_n - 1) \times (\mathbf{I} + \mathbf{I}_D)$ 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:

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

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

$$\left\| A^r \middle| A_D^r \middle| A^f \right\| \left\| \begin{matrix} Q_{(d)}^r \\ \hline Q_{D(d)}^r \\ \hline Q_{(d)}^f \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \delta \overline{Q}^r \\ \hline \delta \overline{Q}_D^r \\ \hline \delta \overline{Q}^f \end{matrix} \right\| = \| 0 \|; \tag{13}$$

$$\left\| E^f \right\| \left\| \Psi_{(d)}^f \right\| \left\| \delta \overline{Q}^f \right\| = \left\| E^f \right\| \left\| \Phi_{(d)}^f \right\|, \tag{14}$$

где

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

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

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 $Q_{Dj} = \varphi_j \left(S_{Dj} \right)$ 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.

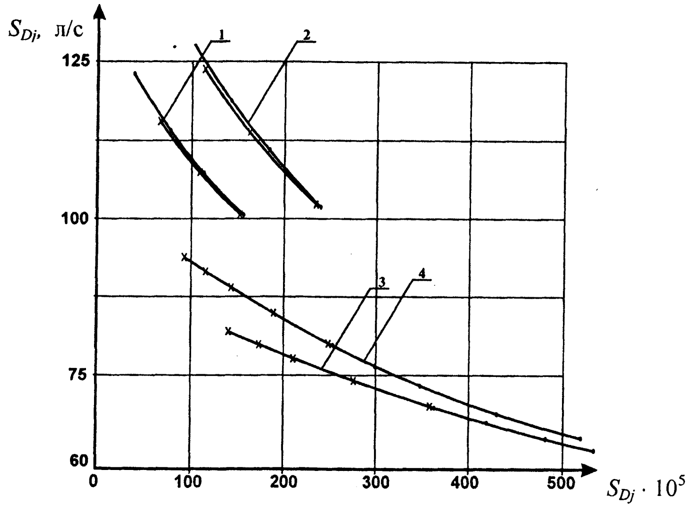

Рис. 2. Дроссельные характеристики системы водоснабжения: 1 – $Q_{D1-2} = \varphi_1(S_{D1-2})$; 2 – $Q_{D7-8} = \varphi_2(S_{D7-8})$; 3 – $Q_{D3-4} = \varphi_3(S_{D3-4})$; 4 – $Q_{D9-10} = \varphi_4(S_{D9-10})$

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}, $j \in \mathbf{I}_D$ и Q_j^f, $j \in \mathbf{J}_n$ 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