УДК 62-503.57

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛИ МНОГОСВЯЗНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ

Антропов Н. Р.
научный руководитель канд. техн. наук Агафонов Е. Д.
Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнева

Трубопроводные сети являются важной частью многих технологических объектов и систем водо-, тепло-, газо-, нефтеснабжения и эксплуатируются многими предприятиями коммунального хозяйства, энергетики, транспорта нефти и нефтепродуктов. В силу возрастающей сложности реальных трубопроводных систем и постепенного перехода от задач технологического проектирования к задачам эффективного управления гидравлическими сетями, постоянно требуется совершенствование методов их моделирования и расчета.

Гидравлические сети представляют собой сложные многосвязные технические сооружения, состоящие из множества соединенных различным способом труб.Основными особенностями моделей трубопроводных систем являются: большая размерность, нелинейный и многосвязный характер описывающих ее операторов, сложная топология, невозможность замеров всех параметров системы, а также наличие ненаблюдаемых и случайных факторов, влияющих на ее функционирование.

Подходы к моделированию и расчету гидравлических сетей во многом схожи с методами моделирования электрических сетей, т.к. основываются на общих законах сохранения массы и энергии, а также единых законах течения. Но в тоже время, стоит отметить, что гидравлические сети – сложные многосвязные динамические системы, характеристики которых во время работы постоянно меняются по заранее неизвестному закону. В отличие от электрических цепей, чьи эксплуатационные параметры практически не отличаются от проектных, а нагрузки, напряжение и другие характеристики измеряются достаточно точно. Для трубопроводных систем значения гидравлического сопротивления, а также и расходы на ветвях и у потребителей известны, в основном, очень приближено.

В научной и отраслевой литературе [1-4] предлагаются различные подходы к построению моделей гидравлических сетей. Зачастую, речь идет о моделях, основанных на привлечении законов гидродинамики, выраженных в системах уравнений в частных производных для описания распределенных систем. Подход, который используется в таких работах, требует достаточно полной информации о физических характеристиках перекачиваемой жидкости, характере ее течения, внутреннем профиле и геометрической конфигурации трубопровода, исчерпывающей информации о функционировании насосных агрегатов. Во множестве случаев такие модели сложны в вычислительном плане, требуют учета неизвестных, часто неизмеримых или непредсказуемо меняющихся во времени и в пространстве параметров.

В качестве основного подхода к построению моделей технологических режимов в настоящее время принимается процедура создания моделей стационарного течения жидкости. Под термином «стационарная модель» подразумевается статическая модель установившегося режима технологического процесса. Модель представляет собой большую систему нелинейных алгебраических уравнений, сформированную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети [1]:

$$
\begin{aligned}
& c_{11}x_1 + \ldots + c_{1n}x_n = q_1 \\
& \ldots \\
& c_{k-1,1}x_1 + \ldots + c_{k-1,n}x_n = q_{k-1} \\
& c_{k1}s_1|x_1|^{\beta_1 - 1}x_1 + \ldots + c_{kn}s_n|x_n|^{\beta_n - 1}x_n = h_1 \\
& \ldots \\
& c_{n1}s_1|x_1|^{\beta_1 - 1}x_1 + \ldots + c_{nn}s_n|x_n|^{\beta_n - 1}x_n = h_{n-k+1}
\end{aligned}
, \qquad (1)
$$

где n – количество участков в графе сети; k – количество узлов; x_j, $j = 1,2\ldots n$ – расход по j-ой трубе; q_i, $i = 1,2\ldots k-1$ – приток в узле; s_j, $j = 1,2\ldots n$ – гидравлическое сопротивление соответствующей трубы; h_i, $i = 1,2\ldots n-k+1$ – сумма действующих напоров с учетом знака по всем дугам i-го контура; β – коэффициент в законе зависимости величины падения напора от значения расхода; $c_{ij} = \{-1,0,+1\}$ определяется по первому или второму закону Кирхгофа. Для второго закона Кирхгофа и для нелинейных уравнений $c_{ij} = \{-1,+1\}$ (в зависимости от направления обхода), если j-й участок входит в цикл, соответствующий i-му нелинейному уравнению, либо $c_{ij} = 0$.

В основу модели гидравлической сети (1) стационарного течения жидкости положен закон гидравлического сопротивления, представляемый в виде $h = sx^{\beta}$.При этом говорится, что данный закон с высокой точностью описывает практически все режимы работы сети в зоне «вполне шероховатого трения» [2]. Однако, определение этих зон зачастую не представляется возможным, в виду сложной и многосвязной топологии трубопроводных сетей. К тому же, параметры s_i, β_i системы уравнений (1) принимаются постоянными величинами, но на практике большинство гидравлических сетей не укладываются в такую модель, т.к. значения этих величин в процессе работы сети постоянно меняется. Эти характеристики должны считаться функциями неизвестных расходов x_i и давлений p_j (или напоров h_i), определяющих искомое потокораспределение в гидравлической сети, т.е.

$$s_i = s_i(x_i, h_i), \beta_i = \beta_i(x_i, h_i).$$

В таких условиях нелинейные уравнения системы (1) вовсе теряют свой смысл, т.к. параметры этих уравнений определяются искомым потокораспределением. Значения этих характеристик можно определить по датчикам давлений и расходов, которыми в той или ней мере оснащены трубопроводные и другие гидравлические системы.

Таким образом, в качестве подхода к построению модели разветвленной гидравлической сети целесообразно применить комбинированный подход к описанию многосвязных систем [5].

Модель гидравлической сети, в рамках такого подхода, может быть представлена следующим образом

$$
\begin{aligned}
& c_{11}x_1 + \ldots + c_{1n}x_n = q_1 \\
& \ldots \\
& c_{k-1,1}x_1 + \ldots + c_{k-1,n}x_n = q_{k-1} \\
& x_k = \varphi_k(X^{(k)}, H^{(k)}) \\
& \ldots \\
& x_n = \varphi_n(X^{(n)}, H^{(n)})
\end{aligned}
,
$$

где c_{ij}, x_j, q_i, оговорены выше, $X^{(j)} \subset X$, $H^{(j)} \subset H$, $j = \overline{k,n}$ – векторы, составленные из компонент векторов X, H, входящих в j-ое уравнение, и

$$\varphi_j(X^{(j)}, H^{(j)}) = \frac{\sum_{t=1}^{N} h_j[t]\, \Phi\left(\frac{h_j - h_j[t]}{c_j^h(N)}\right) \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)} - x_i^{(j)}[t]}{c_i^x(N)}\right)}{\sum_{t=1}^{N} \Phi\left(\frac{h_j - h_j[t]}{c_j^h(N)}\right) \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)} - x_i^{(j)}[t]}{c_i^x(N)}\right)}, \ j = \overline{k,n}$$ – непараметрические оценки качественных зависимостей.

В качестве оценки решения системы уравнений (1) принимается статистика [5]:

$$x_j = \frac{\sum_{t=1}^{N} x_j[t] \prod_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_j(N)}\right)}{\sum_{t=1}^{N} \prod_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_j(N)}\right)}, \ j = \overline{1,n},$$

где $\Phi(\cdot)$ – колоколообразная (ядерная) функция; $c_j(N), j = \overline{1,n}$ – параметры размытости, удовлетворяющие некоторым условиям сходимости [5]; $\varepsilon_j[t], j = \overline{1,l}, t = \overline{1,N}$ – компоненты рабочей выборки вектора невязок $\varepsilon[t]$, специальным образом сгенерированной на основе исходной выборки «вход-выход», а именно:

$$\varepsilon_j[t] = c_{j1} x_1[t] + \ldots + c_{jn} x_n[t] - q_j, \ j = \overline{1,k-1},$$

$$\varepsilon_j[t] = c_{j1} s_1 \left|x_1[t]\right|^{\beta_1 - 1} x_1[t] + \ldots + c_{jn} s_n \left|x_n[t]\right|^{\beta_n - 1} x_n[t] - h_j[t], \ j = \overline{k,n}.$$

Таким образом, в рамках предложенного подхода, представляется возможным: включение в одну модель сведений относящихся к разным уровням априорной информации; произведение расчетов, основанных на реально существующей информации об объекте; использование универсальной структуры непараметрических зависимостей, позволяющих описать практически все режимы работы сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинов, К.В., Мызников А.М., Файзуллин Р.Т. Расчет, оптимизация и управление режимами работы больших гидравлических сетей / Математическое моделирование. 2006. т.18. №9. С. 92-106.
2. Мызников, А.М. Моделирование и идентификация параметров сложных гидравлических сетей: дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Мызников Алексей Михайлович. – Тюмень, 2005. 116 с.
3. Мызников, А.М. Уточнение коэффициентов сопротивления в сложных гидравлических сетях по результатам ограниченного числа измерений / Теплофизика и аэромеханика. 2005. т.12. №3. С. 513-516.
4. Кассина, Н.В. Математическое моделирование динамики гидравлических систем с использованием методов аналитической механики и теории нелинейных колебаний: дис. канд. физ.-мат. наук: 0.1.02.06 / Кассина Наталья Васильевна. – Нижний Новгород, 2006. 118 с.
5. Красноштанов, А.П. Метод генерации решений на многосвязных системах в условиях неопределенности: дис. д-ра техн. наук: 05.13.01 / Красноштанов Александр Павлович. – Красноярск, 2001. 295 с..