

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПО ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Кривобородько В.А.¹, Егорова О.В.²

¹Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий, 0781,
e-mail: vak99@tpu.ru

²Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий, доцент,
e-mail: nagaizeva@tpu.ru

Введение

В рамках проекта «Прорыв», направленного на создание ядерных энергетических технологий нового поколения на базе замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), разрабатывается программный комплекс (ПК) КТ-NIMFA, который предназначен для имитации работы технологических схем ЗЯТЦ. Технологические схемы ЗЯТЦ представляют собой комплексы химических аппаратов, насосов, запорно-регулирующей аппаратуры и т.д., объединенных сетью трубопроводов. В процессе эксплуатации таких комплексов происходит постоянное перераспределение расходов и давлений по линиям их трубопроводной сети, обусловленное изменением положения регулирующей и запорной арматуры, работой насосов и т.п. Возникающее перераспределение расходов и давлений оказывает существенное влияние на процессы, протекающие в химических аппаратах, связанных трубопроводной сетью. Ввиду этого при моделировании технологических схем ЗЯТЦ необходимо учитывать это влияние.

При моделировании гидравлических цепей основной задачей является определение гидравлического режима путем расчета математической модели потокораспределения цепи заданной топологии зарекомендовавшими себя методами контурных расходов (МКР) или узловых давлений (МД) [1]. Целью работы является разработка алгоритма формирования системы уравнений в соответствии с МКР, используя топологию гидравлической цепи, в рамках создания модуля для моделирования потокораспределения в сетях трубопроводов технологических схем ЗЯТЦ для ПК КТ-NIMFA.

Описание алгоритма

В матричном виде математическая модель потокораспределения гидравлической цепи, основанная на МКР, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} A \cdot x = Q, \\ B \cdot S \cdot X \cdot x = B \cdot H; \end{cases} \quad (1)$$

где A – матрица соединений гидравлической цепи; x – вектор расходов на участках; Q – вектор расходов в узлах; B – матрица контуров; S – диагональная матрица сопротивлений участков; X – диагональная матрица из абсолютных значений расходов на участках; H – вектор действующих напоров.

Основной задачей на пути к применению МКР при наличии сведений о технических параметрах элементов гидравлической цепи (типа и диаметра труб, насосов, источников подпиток и т.д.) является составление матрицы соединений (A), отражающей топологию гидравлической цепи, заполнение которой является тривиальной задачей, и матрицы контуров (B).

Нетривиальной является задача формирования матрицы B в связи с вариативностью выделения системы главных контуров, от которой зависит заполненность B , а, следовательно, и количество арифметических операций, возникающих при решении системы (1), что в свою очередь влияет на время расчета. Анализ литературных источников показал, что авторы публикаций, например [1–4], не затрагивают в полной мере вопросы, касающиеся данной темы. Таким образом, стоит задача в определении системы главных контуров, которая обеспечивала бы минимальное заполнение формируемой матрицы контуров B .

Предлагается следующий алгоритм нахождения системы главных контуров, в каждом из которых имеется по меньшей мере один участок, не принадлежащий никакому другому, основанный на идеях А. П. Меренкова и В. Я. Хасилева [1]:

1. Выделяется основное дерево в топологии гидравлической цепи, применяя обход графа поиском в глубину [5]. В результате поиска участки, которые не были включены в дерево, являются хордами, количество которых будет равно количеству независимых контуров.

2. Составляется матрица контуров B путем поиска маршрутов из начала в конец каждой найденной хорды, например, при помощи обхода графа поиском в ширину [5], который будет фиксировать маршруты с минимальным количеством участков в контуре. Элементы матрицы представляются следующим образом:

$$b_{ri} = \begin{cases} 0, & \text{если участок } i \text{ не принадлежит контуру } r; \\ 1, & \text{если участок } i \text{ входит в контур } r \text{ и его ориентация} \\ & \text{совпадает с обходом контура;} \\ -1, & \text{если участок } i \text{ входит в контур } r, \text{ но его ориентация} \\ & \text{не совпадает с обходом контура.} \end{cases} \quad (2)$$

3. Участки графа нумеруются таким образом, что числовое значение номера хорды соответствуют номеру контура. Вследствие этого матрица соединений имеет вид, представленный на рисунке 1.

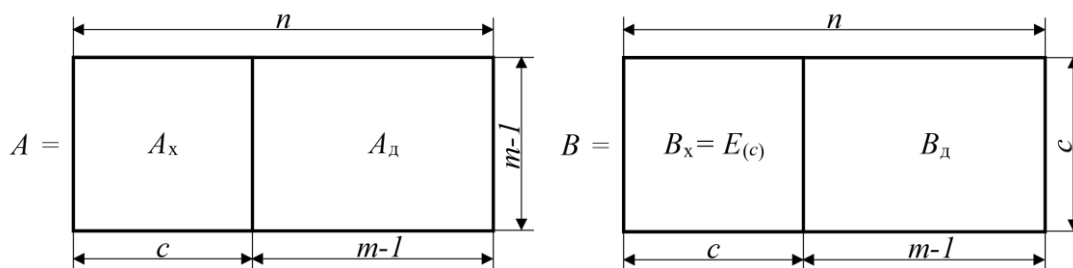


Рис. 1. Структура матрицы соединений A и матрицы контуров B : A_x – матрица соединений, составленная из хорд; A_d – матрица соединений, составленная из дерева; B_x – матрица контуров, составленная из хорд; B_d – матрица контуров, составленная из дерева; n – количество участков схемы; c – количество контуров схемы; m – количество узлов схемы

4. Анализируется матрица контуров B . В случае системы главных контуров квадратная подматрица, состоящая из первых r элементов матрицы B , является единичной, как представлено на рисунке 1. Иначе осуществляется исключение линейных комбинаций в матрице B :

- суммируются по модулю строки – количество участков в контуре и столбцы – количество вхождений участков в контуры;
- если сумма в столбце больше двух (признаком плоской схемы является вхождение любой ветви не более чем в два контура [1]), то осуществляется поиск контура, с которым существуют общие участки и исключение линейной комбинации;
- если суммарное количество участков в контуре уменьшилось, то возврат к п. (а), иначе к п. (б) с выбором другого контура.

5. Если после исключения линейных комбинаций сумма участков, которые включены только в один контур, меньше количества контуров, то для контура, не обладающего таким участком, необходимо провести линейную комбинацию с соседним контуром, имеющим минимальное количество участков.

6. Если осуществлены преобразования, то проводится изменение нумерации участков в соответствии с п. 3.

Также стоит учитывать, что при наличии узлов, являющимися общими только для двух участков, в алгоритме, приведенном выше, необходимо рассматривать только один участок, находящийся в последовательном соединении с такими узлами.

Для демонстрации работы приведенного алгоритма использован граф, представленный в графическом виде вместе с найденной системой главных контуров на рисунке 2.

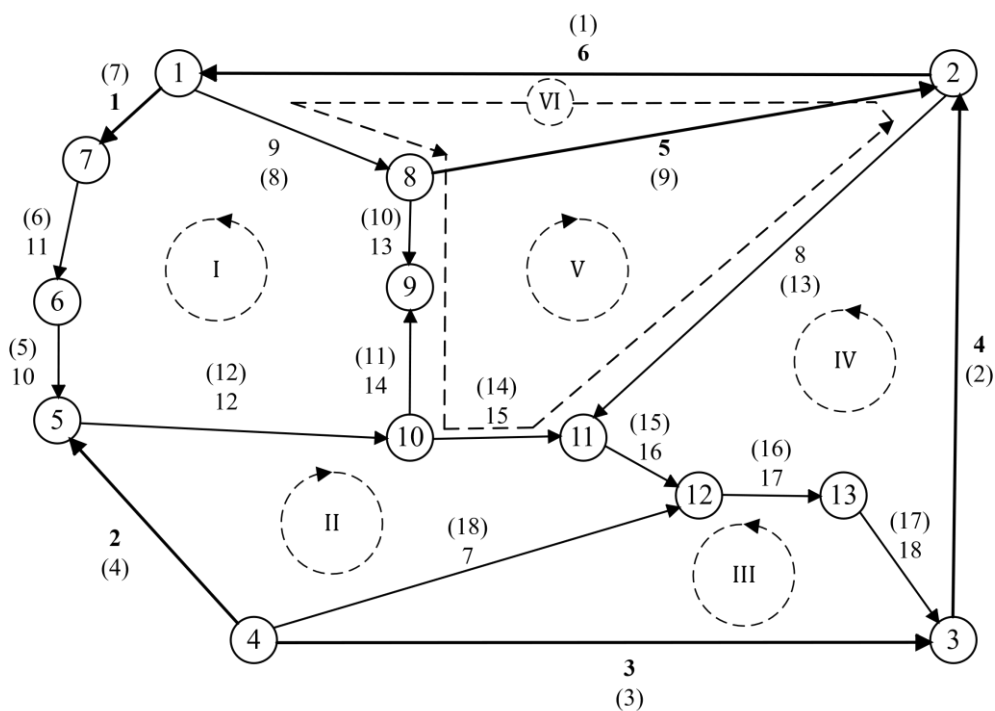


Рис. 2. Найденная система главных контуров: (1)–(18) – индексы участков до изменения нумерации; 1–18 – индексы участков после изменения нумерации; I–VI – номера контуров

Заключение

Таким образом, предложен алгоритм, формирующий матрицу контуров, необходимую для расчета потокораспределения в гидравлической цепи заданной топологии методом контурных расходов или его модификаций. Матрица контуров заполняется таким образом, чтобы минимизировать количество арифметических операций при проведении расчетов.

Список использованных источников

1. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 279 с.
2. Логинов К.В. Модели и алгоритмы расчета режимов работы сложных гидравлических сетей: дис. канд. техн. наук: 05.13.01 / Логинов Константин Валентинович: Омский государственный университет. – Омск, 2004. – 137 с.
3. Михайловский Е.А. Разработка и апробация технологии объектно-ориентированного моделирования гидравлических цепей на примере задач потокораспределения дис. канд. техн. наук: 05.13.18 / Михайловский Егор Анатольевич: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – Иркутск, 2018. – 142 с.
4. Седых И.А. Реализация алгоритма метода контурных расходов для кольцевой гидравлической цепи в программе MATHCAD / И. А. Седых, А. В. Севостьянов, А. И. Ворфоломеева // Вестник ЛГТУ. – 2019. – №3 (41). – С. 11-18.
5. Иванов Б. Н. Дискретная математика. Алгоритмы и программы: уч. пособие / Б. Н. Иванов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 288 с.