

## ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 004.02: 628.144

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.103624

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОГО ИЗ ЭТАПОВ РАСЧЕТА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНОЙ СЕТИ**

© И. А. Гавриленко

*В статье рассматривается один из этапов расчета функциональной надежности трубопроводной сети. Проводится математическое и цифровое моделирование основных процедур расчета. Разработан алгоритм определения принадлежности ребер и вершин графа сети аварийно-ремонтной зоне. Разработаны математические модели формирования подграфа аварийно-ремонтных зон. Состоятельность математических моделей проверяется и подтверждается просчетами на контрольных примерах*

**Ключевые слова:** *трубопроводная сеть, функциональная надежность, граф, аварийно-ремонтная зона, математическая модель*

**1. Введение**

Проведение расчета функциональной надежности трубопроводной сети относительно конкретного потребителя предполагает предварительное построение графа аварийно-ремонтных зон (АРЗ) относительно данного потребителя и соответствующей графической расчетной модели функциональной надежности. При ручном расчете искомой функциональной надежности граф АРЗ и графическая расчетная модель крайне необходимы, поскольку именно они определяют последовательность расчета смешанных систем надежности, к которым относится трубопроводная сеть. При компьютерном расчете, если конечной целью расчета является только получение значения искомой функциональной надежности, наличие графа АРЗ и графической модели расчета не является обязательным. Но при анализе топологии сети и поиске путей повышения функциональной надежности графические модели (и граф АРЗ, и схема расчета), безусловно, являются определяющими, как и расчетные значения надежности.

Для информационной технологии, ориентированной на компьютерный расчет функциональной надежности достаточно иметь только табличное задание графической модели, которое на предыдущем этапе использовалось для построения графа АРЗ относительно конкретного потребителя.

**2. Литературный обзор**

Методы расчета функциональной надежности рассматриваются многими учеными. Так, в работе [1] предлагается метод поперечных сечений сети между источником и потребителями для сложно структурированных трубопроводных сетей. Однако результатом расчета является оценка, что затрудняет решение задач проектирования сетей по крите-

рию надежности или оперативного управления их функционированием.

Работа [2] освещает тривиальные методы расчета, которые требуют определенной адаптации к трубопроводным сетям. Для практического использования такие методы затруднительны в применении, т. к. требуется большое число необходимых вычислительных операций. В работе [3] приводится расчет для сложно структурированных систем, который также требует существенной адаптации к трубопроводным системам. Обоснование математической корректности и состоятельности полученных математических моделей приводится в [4, 5]. В работе [6] не учитываются функциональные особенности запорной арматуры. Наиболее объективные значения показателей при расчете надежности трубопроводных систем получают при использовании статистических методов, которые рассматриваются авторами в [7, 8]. Однако они становятся неэффективными из-за неспособности работать в режиме реального времени.

Метод, в котором учитываются любые особенности структуры трубопроводной сети, влияющие на функциональную надежность, предложен в [9]. Данное направление на сегодняшний день является наиболее перспективным, однако, требующим некоторых корректив. Так, в расчет функциональной надежности следует внести определенные доработки на этапе разбиения графа трубопроводной сети на подграфы, которые изложены ниже в данном исследовании.

**3. Цели и задачи исследования**

Целью исследования является проведение одного из этапов расчета функциональной надежности трубопроводной сети, касающегося разбиения ис-

ходного взвешенного графа трубопроводной сети на подграфы, каждый из которых соответствует одной аварийно-ремонтной зоне.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать однопроходной алгоритм определения принадлежности ребер и вершин графа трубопроводной сети аварийно-ремонтной зоне.

2. Разработать математические модели формирования подграфа аварийно-ремонтных зон по выходным данным алгоритма.

**4. Основная задача этапа разбиения графа трубопроводной сети на подграфы аварийно-ремонтных зон**

Разбиение исходного взвешенного графа сложной трубопроводной сети на подграфы АРЗ возможно выполнить с помощью рекурсивного алгоритма [10], который реализован на AutoLISP. Однако применение такого алгоритма требует больших затрат памяти, что затрудняет его использование при расчетах сетей большой размерности. В связи с этим возникает необходимость разработки нового подхода к разбиению графа трубопроводной сети на подграфы АРЗ. Другими словами, необходимо разработать метод разбиения, не содержащий рекурсии.

Решение задач на графах рассматриваемого типа, как правило, достигается с помощью довольно сложных многопроходных алгоритмов. Для достижения искомого результата приходится организовывать несколько этапов циклической обработки исходных данных. В предлагаемом подходе решение данной задачи достигается с помощью простого однопроходного алгоритма. Однако для использования предлагаемого алгоритма должно удовлетворяться условие: последовательность обработки ребер графа должна обеспечивать связность графа на каждом шаге его построения.

На коммунальных предприятиях с автоматизированным управлением потокораспределением может использоваться нумерация ребер графа, при которой исходные данные будут противоречить выше приведенному условию связности. Для устранения сложившегося противоречия необходимо провести преобразование исходных данных. Такое преобразование является внутренней процедурой для задачи разбиения, и никак не влияет на принятую нумерацию ребер в службах автоматизированной эксплуатации сетей.

Необходимость преобразования исходных данных приводит к двухэтапному решению задачи разбиения. На первом подготовительном этапе производится преобразование исходного массива данных о структуре и составе графа с целью соблюдения условия связности, а на втором – непосредственно разбиение. Первый этап разработан в [11]. В результате получены математические модели разбиения графа трубопроводной сети на подграфы АРЗ, которые определяют последовательность и упорядочивание ребер графа, обеспечивающих его непрерывную связность. Второй этап разбиения требует дополнительных процедур.

**4.1. Задача определения принадлежности ребер и вершин графа трубопроводной сети аварийно-ремонтной зоне**

Основная задача разбиения графа сети на подграфы АРЗ состоит из двух подзадач:

– подзадачи определения принадлежности каждого ребра и каждой вершины графа сети конкретной АРЗ;

– подзадачи определения количества и состава каждой АРЗ.

Вычислимую функцию алгоритма определения принадлежности ребер и вершин  $k$ -й зоне можно представить в виде:

$$A(\mathbf{M}^t, \mathbf{g}_{j-1}, k_{j-1}) = \left[ \begin{array}{l} (d_j = g_{j-1, s_j}) \mid (z_j = 0) \& (g_{j-1, s_j} \neq 0) \& (g_{j-1, f_j} \neq 0), \\ (d_j = g_{j-1, s_j}; g_{j, f_j} = g_{j-1, s_j}) \mid (z_j = 0) \& (g_{j-1, s_j} \neq 0) \& (g_{j-1, f_j} = 0), \\ (d_j = g_{j-1, f_j}; g_{j, s_j} = g_{j-1, f_j}) \mid (z_j = 0) \& (g_{j-1, s_j} = 0) \& (g_{j-1, f_j} \neq 0), \\ (d_j = k_{j-1}; g_{j, s_j} = k_{j-1}; g_{j, f_j} = k_{j-1}; k_j = k_{j-1} + 1) \mid (z_j = 0) \& (g_{j-1, s_j} = 0) \& (g_{j-1, f_j} = 0), \\ (d_j = g_{j-1, f_j}) \mid (z_j = 1) \& (g_{j-1, f_j} \neq 0), \\ (d_j = k_{j-1}; g_{j, f_j} = k_{j-1}; k_j = k_{j-1} + 1) \mid (z_j = 1) \& (g_{j-1, f_j} = 0), \\ (d_j = g_{j-1, s_j}) \mid (z_j = 2) \& (g_{j-1, s_j} \neq 0), \\ (d_j = k_{j-1}; g_{j, s_j} = k_{j-1}; k_j = k_{j-1} + 1) \mid (z_j = 2) \& (g_{j-1, s_j} = 0), \\ (d_j = k_{j-1}; k_j = k_{j-1} + 1) \mid (z_j = 3) \end{array} \right], \tag{1}$$

где  $j = \overline{1, n}$ ,  $k_0 = 1$ ,  $\mathbf{g}_0 = \{g_{0,i}\}_1^m = \{0\}_1^m$ ;  $\mathbf{M}^t$  – матрица, удовлетворяющая условию связности графа.

На рис. 1 приведена схема алгоритма разбиения.

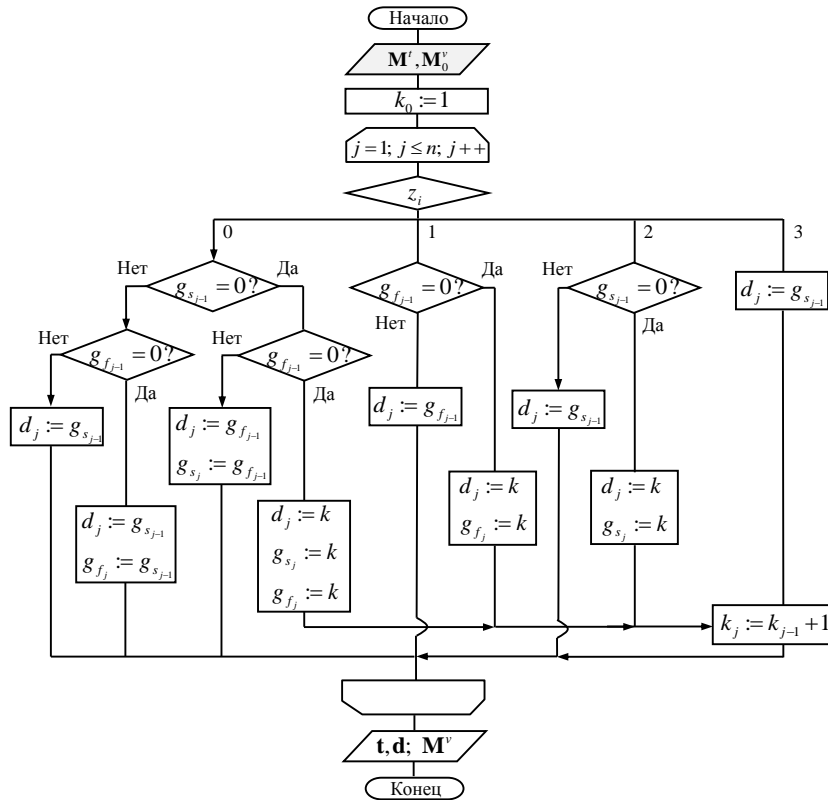


Рис. 1. Схема однопроходного алгоритма определения принадлежности ребер и вершин k-й зоне

На рис. 2 показаны результаты работы программы для контрольного примера. В качестве примера взят граф трубопроводной сети, содержащей 16 ребер и 15 вершин.

$$Z_k^v = \bigcup_{j=1}^m (v_j | d_j = k). \tag{4}$$

Результаты разбиения графа сети на подграфы APЗ и определение состава (ребер и вершин) этих подграфов в условиях контрольного примера в соответствии с математическими моделями (1)–(4) приведены на рис. 3 и в табл. 1.

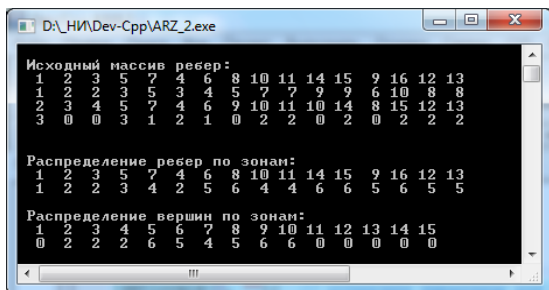


Рис. 2. Результаты контрольного просчета программы принадлежности ребер и вершин графа сети подграфам APЗ

#### 4.2. Задача формирования подграфа аварийно-ремонтных зон

Вторая подзадача разбиения графа сети на подграфы APЗ предназначена для определения общего количества APЗ и их состава.

Математическая модель формирования подграфа APЗ  $Z_k$  по выходным данным алгоритма разбиения имеет вид:

$$Z_k = Z_k^t \cup Z_k^v, \quad i = \overline{1, n_z}, \tag{2}$$

где  $Z_k^t$  – множество ребер подграфа  $Z_k$ ,

$$Z_k^t = \bigcup_{i=1}^n (t_i | d_i = k), \tag{3}$$

где  $Z_k^v$  – множество вершин подграфа  $Z_k$ ,

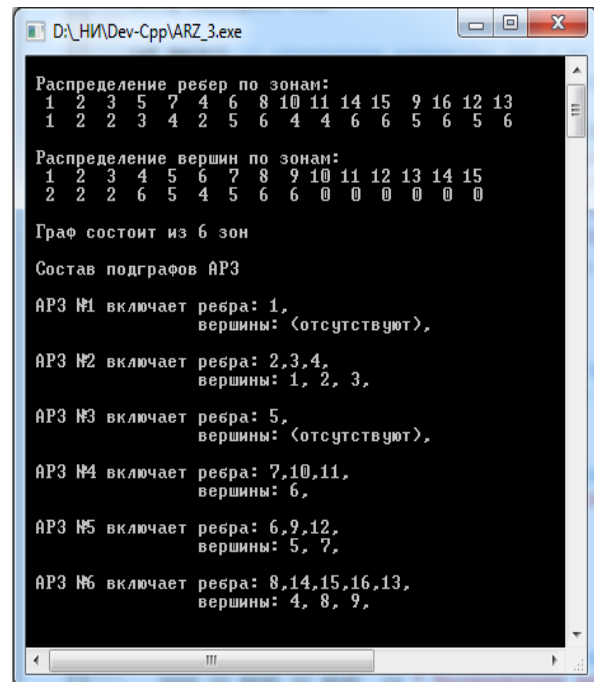


Рис. 3. Результаты контрольного просчета программы определения количества APЗ и их состава

Таблица 1

Результаты контрольного просчета программы определения количества АРЗ и их состава

№ подграфа (АРЗ)	Элементы подграфа АРЗ	
	Рёбра подграфа (трубопроводные участки)	Вершины подграфа (колодцы)
1	{ $t_1$ }	–
2	{ $t_2, t_3, t_4$ }	{ $v_1, v_2, v_3$ }
3	{ $t_5$ }	–
4	{ $t_7, t_{10}, t_{11}$ }	{ $v_6$ }
5	{ $t_6, t_9, t_{12}$ }	{ $v_5, v_7$ }
6	{ $t_8, t_{14}, t_{15}, t_{16}, t_{13}$ }	{ $v_4, v_8, v_9$ }

Контрольный просчет по определению количества АРЗ и их состава выполнен с помощью программы, написанной на языке С++.

### 5. Результаты исследования и их обсуждение

Формализованы и реализованы в виде универсальной программы процедуры разбиения графа трубопроводной сети на подграфы аварийно-ремонтных зон независимо от типа и сложности структуры трубопроводной сети. Программа, написанная в соответствии с однопроходным алгоритмом (рис. 1) и вычислимой функции (1), а также программная реализация решения подзадачи определения количества АРЗ и их состава, в соответствии с математическими моделями (2)–(4) представлены на алгоритмическом языке С++. Программы одинаково успешно работают при древовидных, сетевых и мостиковых структурах трубопроводной сети.

### 6. Выводы

1. Разработан алгоритм определения принадлежности ребер и вершин отдельной аварийно-ремонтной зоне.

2. Разработаны математические модели формирования подграфа аварийно-ремонтных зон по выходным данным алгоритма.

Контрольные просчеты отлаженных программ показали состоятельность разработанных математических моделей и подтвердили возможность использования текстовых экранов мониторов для решения графических задач, возникающих в процессе проектирования и эксплуатации трубопроводных систем. Программы работают в режиме реального времени, что позволяет эффективно использовать их для принятия решений диспетчером по управлению функционированием трубопроводной сети.

### Литература

- Ильин, Ю. А. Надёжность водопроводных сооружений и оборудования [Текст] / Ю. А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1985. – 242 с.
- Абрамов, Н. Н. Надёжность систем водоснабжения [Текст] / Н. Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1984. – 216 с.
- Лосев, Э. А. Топологические методы нахождения вероятностных характеристик системы электроснабжения промышленных предприятий [Текст]: сб. науч. тр. / Э. А. Лосев. – М.: Энергоатомиздат, ВНИИПЭМ, 1987. – С. 111–115.
- Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
- Коваленко, И. Н. Исследования по анализу надежности сложных систем [Текст] / И. Н. Коваленко. – К.: Наукова думка, 1976. – 211 с.
- Ионин, А. А. Надёжность систем тепловых сетей [Текст] / А. А. Ионин. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.
- Барлоу, Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность [Текст] / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
- Беляев, Ю. К. Статистические методы в теории надежности [Текст] / Ю. К. Беляев. – М.: Знание, 1978. – 66 с.
- Самойленко, Н. И. Адекватность моделей функциональной надежности трубопроводных систем [Текст]: монография / Н. И. Самойленко, А. Б. Костенко, Т. С. Сенчук и др.; ред. Н. И. Самойленко. – Х.: Издательство «НТМТ», 2009. – 115 с.
- Samoilenko, M. I. On emergency localization in water supply networks [Text] / M. I. Samoilenko, M. N. Samoilenko // In Proc. of the Third International Congress on Industrial and Applied Mathematics. – Hamburg, 1995. – P. 127–131.
- Самойленко, Н. И. Разработка математических моделей упорядочивания графа трубопроводной распределительной сети [Текст] / Н. И. Самойленко, И. А. Гавриленко, Т. С. Сенчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 3, № 4 (75). – С. 21–25. doi: 10.15587/1729-4061.2015.42811

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Грицунов О. В.  
Дата надходження рукопису 27.04.2017*

**Гавриленко Ирина Александровна**, ассистент, кафедра прикладной математики и информационных технологий, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: i.gavrilenko@ukr.net