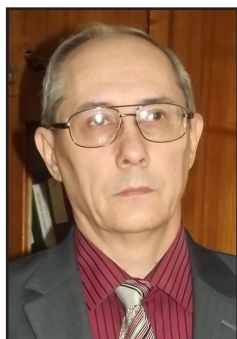




Имитационное моделирование процесса повреждения сетевых трубопроводных структур



Игорь ТАРАРЫЧКИН
Igor A. TARARYCHKIN

Семён БЛИНОВ
Semen P. BLINOV



Simulation Modeling of Process of Damaging of Network Pipeline Structures

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 14)

Обоснованы подходы к оценке функционального состояния трубопроводов при наличии непрерывных технологических процессов и сложных производств. Рассчитаны характеристики стойкости и программа имитационного моделирования процесса повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта. Показано, что способность сопротивляться процессу прогрессирующего повреждения таких систем зависит от их структуры и состава. Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять сравнительный анализ свойств альтернативных структур и принимать обоснованные проектные решения на этапе формирования транспортных систем с заданными свойствами.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт, система, структура, имитационное моделирование.

Тарарычкин Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортные системы» Луганского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина.

Блинов Семён Павлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Математический анализ» Удмуртского государственного университета, Ижевск, Россия.

Трубопроводные транспортные системы широко используются в условиях современного промышленного производства. С их помощью на предприятиях металлургии, нефтегазового комплекса, химических комбинатах осуществляют доставку сырья, полуфабрикатов, готовой продукции [1–2].

Безотказное функционирование таких систем обеспечивает возможность организации непрерывных технологических процессов и сложных производств. Однако доставка трубопроводом различного рода реагентов и опасных веществ связана с определёнными рисками и для самой транспортной технологической системы, и окружающей среды.

Так, отказы отдельных элементов сложных трубопроводных систем в ряде случаев не приводят к заметному изменению режимов функционирования из-за наличия избыточных связей и существования альтернативных путей доставки продукта потребителям. В то же время серия последовательных отказов или повреждений трубопроводов может сопровождаться частичной или полной потерей работоспособности системы.

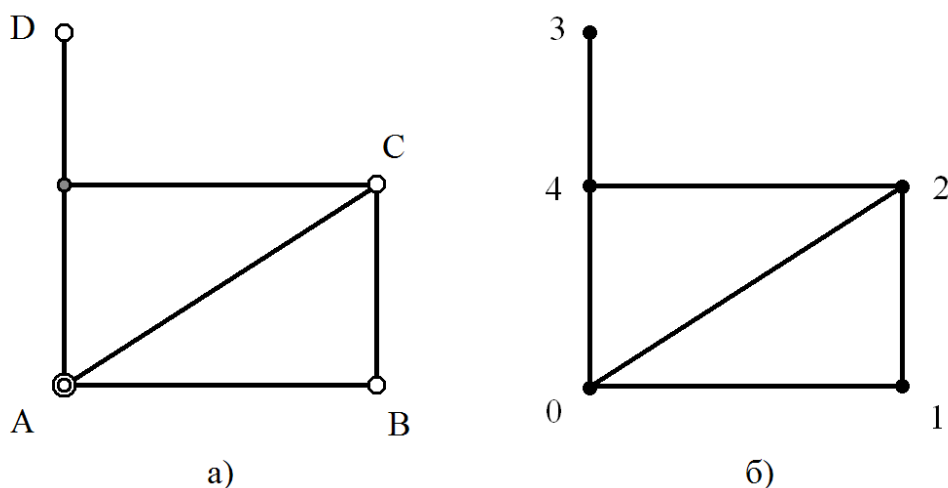


Рис. 1. Сетевая структура (а) и соответствующий размеченный граф трубопроводной транспортной системы (б).

Причины возникновения такого рода событий могут быть связаны с внутренними процессами в системе (гидравлические удары, коррозионное повреждение и разгерметизация труб, ошибки управления) или внешними факторами (распространение пожаров, сейсмическая активность, развитие оползней и т.п.) [3].

Подобного рода процессы характеризуются следующим рядом особенностей.

1. Предсказать заранее участки повреждения трубопроводов и последовательность развития аварийной ситуации невозможно.

2. Не представляется возможным составить перечень трубопроводов, которые будут повреждены в результате неконтролируемого развития аварийной ситуации, а также определить последовательность таких повреждений.

3. Масштабы и последствия аварии для всей системы предсказать весьма проблематично. Они могут быть связаны как с частичным, так и полным прекращением доставки целевого продукта одному или нескольким потребителям.

Процесс последовательного перехода в неработоспособное состояние трубопроводной транспортной системы в результате развития серии неконтролируемых отказов правомерно считать, полагаем, прогрессирующим повреждением.

Характерная особенность прогрессирующего повреждения мотивирована тем обстоятельством, что переход отдельных трубо-

проводов в неработоспособное состояние происходит в случайной последовательности. При этом из-за наличия избыточных связей в системе развитие повреждения на разных этапах может сопровождаться как снижением объемов продуктов, доставляемых потребителям, так и их последовательным отключением, вплоть до полного прекращения функционирования системы.

Способность трубопроводной транспортной системы сопротивляться развитию этого процесса зависит прежде всего от её структуры, состава и тесно сопряжена со стойкостью к прогрессирующим повреждениям.

По этой причине особый интерес представляет поиск закономерностей, позволяющих прогнозировать поведение и оценивать стойкость различных сетевых структур при последовательном повреждении их линейных элементов (трубопроводов).

Решению такой задачи помогает разработка имитационной модели процесса прогрессирующего повреждения сетевых структур трубопроводных транспортных систем, включая и создание компьютерной программы, позволяющей оценивать стойкость к повреждениям таких систем для последующего принятия обоснованных проектных решений.

Рассмотрим трубопроводную систему, структурная схема которой показана на рис. 1а.

В составе системы имеется пять узлов, в числе которых источник целевого продук-





Расчётный модуль программы

Формирование системы матриц с пошаговым обнулением элементов матрицы смежности, осуществляемое в случайном порядке и характеризующие процесс постепенного повреждения структуры заданного графа

$$Del(M) := \begin{cases} n \leftarrow rows(M) - 1 \\ \text{while } M_{i \leftarrow round(rnd(n))} j \leftarrow round(rnd(n)) = 0 \\ \quad 1 \\ \quad M_{i,j} \leftarrow M_{j,i} \leftarrow 0 \\ \quad [(i \ j) \ M] \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Зануление случайно выбранного} \\ \text{единичного элемента матрицы } M. \end{array}$$

$$DoloJ(M) := \begin{cases} (n \leftarrow rows(M) - 1 \ k \leftarrow 0 \ a_k \leftarrow M \ Ind_k \leftarrow \langle (i \ j) \rangle) \\ \text{while } \left[N \leftarrow \sum_{i=0}^n \sum (a_k)^{(i)} \right] > 0 \\ \quad k \leftarrow k + 1 \\ \quad (Ind_k \ a_k) \leftarrow Del(a_{k-1}) \\ \quad (Ind \ a) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Последовательное зануление всех единичных} \\ \text{элементов. На каждом шаге зануляется один} \\ \text{случайно выбранный элемент.} \end{array}$$

(n ← rows(M) - 1 k ← 0 a_k ← M)

Формирование матриц достижимости на основе полученной совокупности матриц смежности

$$NormExit(M, r) := \begin{cases} (Ind \ b) \leftarrow DoloJ(M) \\ str \leftarrow (\langle N^* \text{повреждения} \rangle \ \langle \text{Индексы поврежденных элементов} \rangle \ \langle \text{Результат} \rangle) \\ \text{for } k \in 0..last(b) \\ \quad \left[c_k \leftarrow \sum_{i=1}^r (b_k)^i \ d_k \leftarrow c_k > 0 \ u^{(k)} \leftarrow (d_k^T)^{(\emptyset)} \ p_k \leftarrow k \right] \\ u \leftarrow stack[str, (p \ Ind \ u^T)] \\ (b \ c \ d \ u) \end{cases} \quad \begin{array}{l} b - \text{матрицы смежности} \\ c - \text{матрицы достижимости} \\ d - \text{нормированные матрицы} \\ u - \text{результат} \\ p - \text{№ выходные объекты} \end{array}$$

(b c d u) := NormExit(MatSm, r)

Рис. 2. Листинг расчётной части PROG1.

та А и отдельные потребители В, С, Д. Кроме того, система содержит N = 6 трубопроводов, которые в процессе прогрессирующего повреждения переходят в неработоспособное состояние в случайной последовательности.

Если для прекращения подачи целевого продукта потребителю В требуется повредить в среднем n трубопроводов, то отношение $\bar{W}_B = n / N$ является одной из характеристик процесса прогрессирующего повреждения. Возможный диапазон изменения значений степени повреждения: $0 \leq \bar{W}_B \leq 1$.

Показателем стойкости сетевой структуры к прогрессирующим повреждениям F_W

является среднее арифметическое значений всех степеней повреждения, устанавливаемых для анализируемой системы. В данном случае:

$$F_W = \frac{\bar{W}_B + \bar{W}_C + \bar{W}_D}{3}.$$

Показатель стойкости характеризует собой долю от общего числа трубопроводов системы, которые в среднем необходимо повредить для предотвращения доставки целевого продукта всем потребителям.

Задача определения характеристик стойкости анализируемой структуры решалась путем разработки специализированной компьютерной программы. Листинг расчёт-

$$u = \left[\begin{array}{c} \text{«№ повреждения»} \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{«Индексы поврежденных элементов»} \\ \begin{pmatrix} \text{«(i j)»} \\ (0 \ 1) \\ (2 \ 1) \\ (4 \ 0) \\ (0 \ 2) \\ (4 \ 2) \\ (4 \ 3) \end{pmatrix} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{«Результат»} \\ \begin{pmatrix} 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \end{pmatrix} \end{array} \right]$$

Рис. 3. Листинг формы представления результата выполненных расчётов.

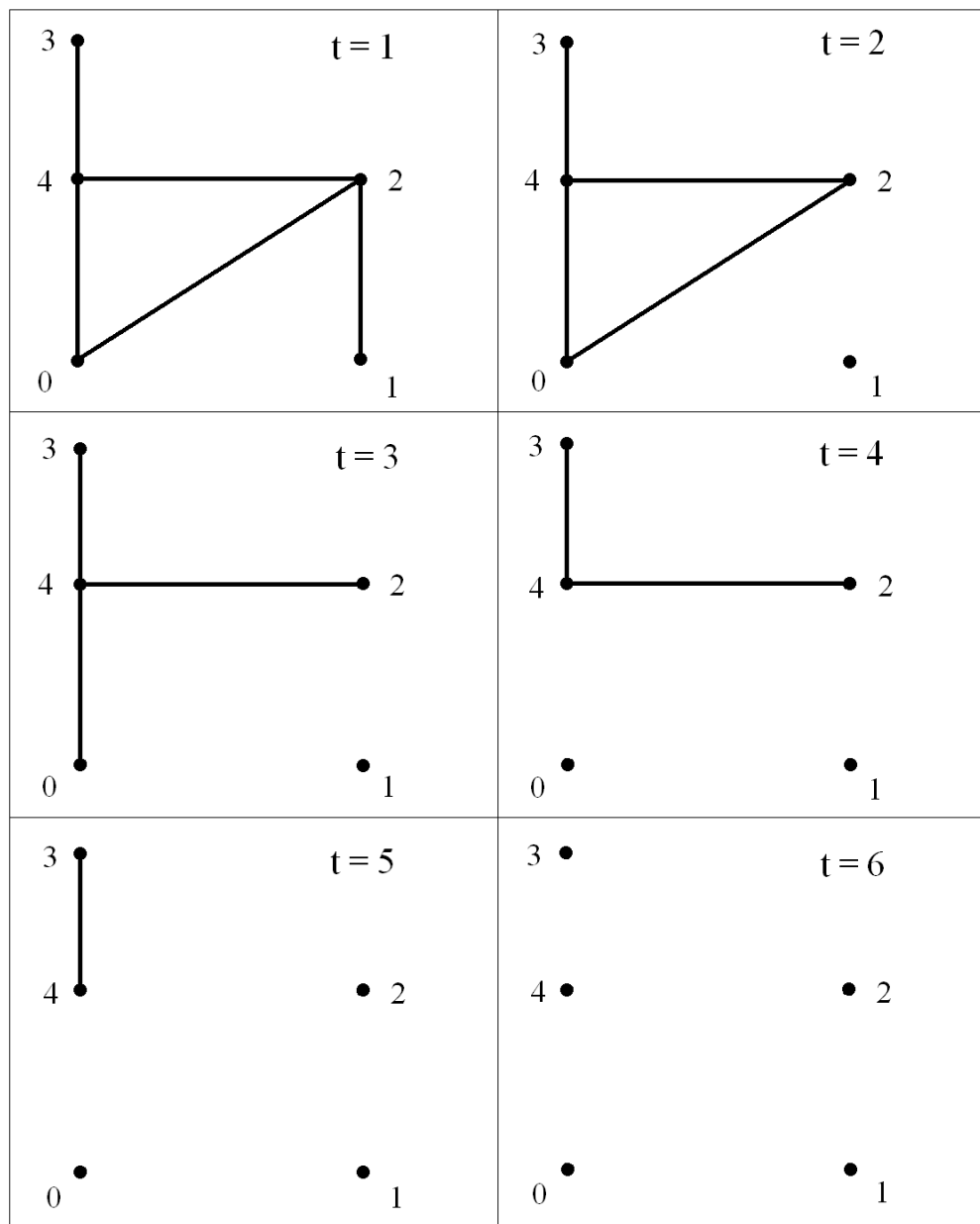


Рис. 4. Структура сетевого объекта, соответствующая различным моментам системного времени t при реализации процедуры прогрессирующего повреждения.



Результаты имитационного моделирования процесса повреждения

Генерация № 1		Генерация № 2	
«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»	«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»
$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (1\ 0) \\ (2\ 1) \\ (2\ 0) \\ (4\ 0) \\ (4\ 2) \\ (4\ 3) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (2\ 4) \\ (2\ 1) \\ (1\ 0) \\ (0\ 2) \\ (3\ 4) \\ (4\ 0) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Генерация № 3		Генерация № 4	
«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»	«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»
$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (0\ 2) \\ (2\ 1) \\ (1\ 0) \\ (3\ 4) \\ (4\ 2) \\ (4\ 0) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (0\ 2) \\ (2\ 1) \\ (0\ 4) \\ (4\ 3) \\ (4\ 2) \\ (1\ 0) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Генерация № 5		Генерация № 6	
«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»	«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»
$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (2\ 1) \\ (1\ 0) \\ (4\ 0) \\ (4\ 2) \\ (2\ 0) \\ (3\ 4) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (4\ 3) \\ (0\ 2) \\ (0\ 1) \\ (4\ 2) \\ (2\ 1) \\ (0\ 4) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Генерация № 7		Генерация № 8	
«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»	«Индексы поврежденных элементов»	«Результат»
$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (3\ 4) \\ (4\ 2) \\ (2\ 0) \\ (0\ 4) \\ (0\ 1) \\ (1\ 2) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{bmatrix} "(i\ j)" \\ (2\ 1) \\ (4\ 2) \\ (0\ 2) \\ (4\ 0) \\ (4\ 3) \\ (0\ 1) \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

ной части программы имитационного моделирования прогрессирующего повреждения PROG1, реализованной в системе MathCAD, приводится на рис. 2.

Исходными данными для расчётов служат заданное количество узлов и линейных элементов (трубопроводов) в системе. Кроме того, структура анализируемого объекта задается графом, матрица смежности кото-

рого Matism описывается в блоке исходных данных.

Матрица смежности графа [4] представляет собой прямоугольную таблицу, количество строк и столбцов которой равно числу его пронумерованных вершин.

Если между i -й и j -й вершинами размеченного графа существует связь в виде ребра, то элементы матрицы смежности:

Таблица 2

Расчётные характеристики процесса повреждения сетевой структуры

Номер генерации	Характеристики процесса повреждения		
	W_v	W_c	W_d
1	0,333	0,667	0,667
2	0,5	0,667	0,833
3	0,5	0,833	0,667
4	1,0	0,5	0,5
5	0,333	0,833	0,667
6	0,667	0,667	0,167
7	0,833	0,833	0,167
8	1,0	0,5	0,667
Среднее значение	0,645	0,688	0,542

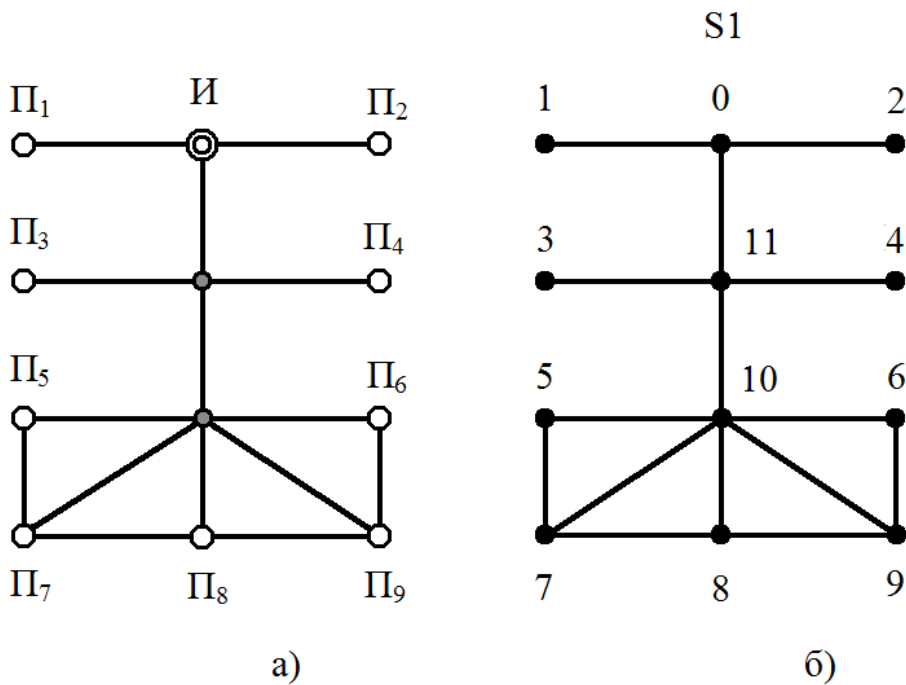


Рис. 5. Структурная схема трубопроводной системы с положением источника в узле И и потребителей в узлах П₁, П₂, ... П₉ (а), а также соответствующий исходной структуре размеченный граф S1 (б).

$a_{i,j} = a_{j,i} = 1$. Если же прямой связи между указанными вершинами нет, то $a_{i,j} = a_{j,i} = 0$.

На главной диагонали бинарной матрицы смежности находятся нули. Исключением может быть вариант с наличием в вершине графа петли. Однако в дальнейшем рассматриваются графы, не имеющие петель в своем составе.

Для понимания структуры программы имитационного моделирования на листинге указаны отдельные функциональные блоки, обеспечивающие требуемую последовательность вычислений. При необходимости можно вывести и определить состав матриц, участвующих в промежуточных расчётах.

Динамика повреждения сетевой структуры, описываемой матрицей $Matsm$, оценивалась путем генерации серии матриц смежности со случайным парным обнулением единиц, расположенных симметрично относительно главной диагонали. При этом количество таких матриц будет соответствовать числу единиц, расположенных выше главной диагонали $Matsm$.

Каждая из полученных таким образом матриц смежности будет характеризовать граф повреждаемой сетевой структуры в различные моменты системного времени.

Следующий этап функционирования программы связан с построением совокуп-



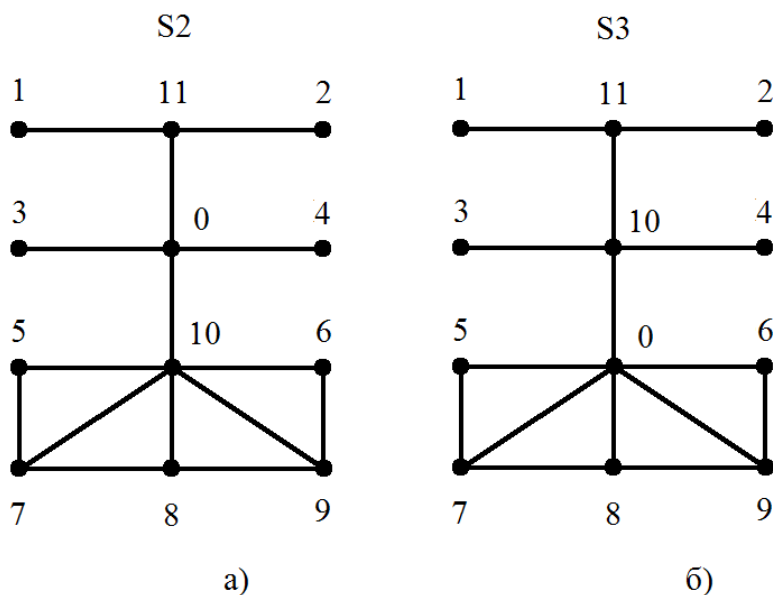


Рис. 6. Размеченные графы S2 (а) и S3 (б) альтернативных структурных схем трубопроводной системы с расположением источника продукта в узлах, которым соответствуют вершины с обозначением 0.

ности матриц достижимости, при этом каждая из них формируется на основе соответствующей матрицы смежности. Матрица достижимости [5] характеризует наличие сообщений между i -й и j -й вершинами и возможность перехода из одной вершины графа в другую с учетом действующей системы внутренних связей.

Результаты моделирования отображаются в виде перечня значений системного времени, обозначений ребер графа, повреждаемых в случайном порядке, а также итоговой матрицы, в состав которой включены первые строки исходной и всех построенных матриц достижимости.

Анализ изменения содержания строк полученной итоговой матрицы позволяет установить, кто из потребителей и в какой момент системного времени теряет связь с источником целевого продукта в процессе прогрессирующего повреждения.

Многочисленный перезапуск программы с фиксацией значений системного времени, при котором происходит разрыв связей между источником и каждым из потребителей продукта, позволяет сформировать базу данных, при помощи которой оцениваются характеристики стойкости сетевой структуры.

Так, рассмотренная ранее структура транспортной системы, показанная на

рис. 1а, характеризуется размеченным графом, представленным на рис. 1б. Для принятого порядка обозначения вершин графа его матрица смежности:

$$Mat_{sm} := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Результат моделирования процесса прогрессирующего повреждения представляется в форме, показанной на рис. 3.

Соответствующая полученному решению динамика процесса прогрессирующего повреждения структуры графа показана на рис. 4.

При оценке свойств анализируемой структуры процесс повреждения повторялся 8 раз, что недостаточно для формирования полноценной базы статистических данных, однако позволяет продемонстрировать функционирование компьютерной программы и оценить возможности реализуемой процедуры имитационного моделирования.

Результаты реализации процесса прогрессирующего повреждения приведены в таблице 1.

Обработка полученных данных помогает установить характеристики стойкости анализируемой структуры, значения которых приведены в таблице 2.

Результаты моделирования позволяют заключить, что для отключения потребителя В от источника целевого продукта необходимо повредить примерно 65 % всех трубопроводов системы. Для отключения потребителей С и D следует в среднем повредить соответственно 69 % и 54 % трубопроводов.

Расчётное значение показателя стойкости для рассматриваемой сетевой структуры: $F_w = 0,625$. Это означает, что для прекращения доставки целевого продукта всем потребителям требуется повредить в среднем около 63 % от общего числа трубопроводов системы.

Рассмотрим возможности разработанной компьютерной программы при решении практической задачи. Предположим, для трубопроводной системы, исходная структурная схема которой дана на рис. 5а, надо определить место расположения источника целевого продукта, при котором обеспечивается достижение её наибольшей стойкости к процессу прогрессирующего повреждения.

Размеченный граф исходной структурной схемы с расположением источника целевого продукта в вершине 0, а потребителей в вершинах 1, 2 ... 7 показан на рис. 5б. Полученное в результате моделирования значение показателя стойкости структуры S1: $F_w = 0,467$.

Альтернативные варианты формирования структуры трубопроводной транспортной системы с изменением положения источника целевого продукта показаны на рис. 6.

Установленные в результате компьютерного моделирования значения показателей стойкости для альтернативных вариантов формирования сетевой структуры с размеченным графом S2: $F_w = 0,508$ и графом S3: $F_w = 0,544$.

Полученный результат означает, что повреждение структуры S1 по механизму прогрессирующего повреждения связано

с переходом в неработоспособное состояние около 46 % трубопроводов базового варианта. Из рассмотренных альтернативных вариантов наилучшим показателем характеризуется сетевая структура S3. При её использовании повреждение системы объясняется переходом в неработоспособное состояние примерно 55 % от общего числа всех трубопроводов.

Таким образом, при принятии проектного решения предпочтение следует отдать именно последнему варианту формирования сетевой структуры. При этом нужно отметить, что уровень затрат на проектирование и изготовление каждой из рассмотренных систем оказывается примерно одинаковым, поскольку все структурные отличия связаны лишь с изменением расположения источника целевого продукта.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны характеристики стойкости и программа имитационного моделирования процесса прогрессирующего повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта.

2. Расчёт ожидаемых характеристик стойкости к повреждениям таких систем позволяет принимать обоснованные проектные решения при сравнении альтернативных вариантов. Так, сопоставление показателей стойкости для структур S1, S2 и S3 дает основание заключить, что наиболее приемлемыми свойствами обладает система, построенная на базе структуры S3, для которой установлено расчётное значение $F_w = 0,544$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровков В. М., Калитюк А. А. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов. — М.: Академия, 2007. — 240 с.
2. Алиев Р. А., Белоусов В. Д., Немудров А. Г. Трубопроводный транспорт нефти и газа: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1988. — 368 с.
3. Рябинин И. А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. — СПб.: Политехника, 2000. — 248 с.
4. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети. — М.: Наука, 1973. — 368 с.
5. Кристофиденс Н. Теория графов. Алгоритмический подход. — М.: Мир, 1978. — 432 с.

Координаты авторов: **Тарарычкин И. А.** – donbass_8888@mail.ru, **Блинов С. П.** – blinov38@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.10.2016, принята к публикации 14.01.2017.

