

УДК 656.02 : 338.47

И.А.ГАВРИЛЕНКО, Т.С.ПЕРЕДЕРИЙ, Н.И.САМОЙЛЕНКО, д-р техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА**

Рассматривается влияние мостовых элементов на надежность функционирования технических систем на примере магистрального трубопровода. Дается математическое обоснование оптимально возможному достижению надежности системы в случае структурной и параметрической симметрии мостового соединения ее элементов.

С целью повышения надежности трубопроводного транспорта прибегают к дублированию и троированию ниток трубопровода. Для проведения профилактических и аварийных работ между параллельными участками трубопроводной системы устанавливают перемычки. Установка перемычек приводит к мостовым моделям надежности и, следовательно, способствует дальнейшему повышению надежности всей системы. Мостовые соединения являются достаточно эффективным способом повышения надежности трубопроводных систем, поскольку сооружение дешевой короткой перемычки намного предпочтительнее, чем строительство дополнительной (третьей) нитки трубопровода.

Для гарантированного функционирования трубопроводной системы ее надежность должна быть не ниже некоторой допустимой. Чтобы обеспечить заданную надежность с наименьшими экономическими затратами, необходимо уметь адекватно оценивать надежность действующих или проектируемых систем по имеющимся оценкам надежности отдельных ее элементов.

Решение проблемы адекватной оценки надежности открывает путь к решению многих прикладных задач по эксплуатации и проектированию транспортных систем, в частности, к такой важной задаче, как сравнение по безотказности в работе двух структурных вариантов системы.

Проблема расчета сложных систем с мостовыми соединениями освещается в работах [1-3], анализ которых позволяет сделать вывод о том, что при увеличении числа перемычек громоздкость формул для расчета надежности лавинообразно нарастает. Уже при числе перемычек больше двух расчетные формулы надежности становятся настолько громоздкими, что их практическое использование даже с применением современных вычислительных средств превращается в сложную рутинную процедуру.

Целью настоящей работы является исследование влияния пере-

мычки между параллельными нитками трубопровода на надежность трубопроводной системы и математическое обоснование оптимального выбора варианта ее структуры.

Ограничимся рассмотрением частного случая, когда вероятности безотказной работы всех перемычек  $p_m$  одинаковы. Такая модель с мостовыми соединениями часто встречается в инженерной практике.

При числе перемычек  $n = 0$  мосты в системе отсутствуют, а сама система структурно представляет собой два параллельно соединенных элемента, как показано на рис.1.

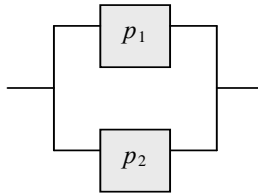


Рис.1 – Параллельная модель надежности:

$p_1$  – вероятность безотказной работы первого элемента за определенный период времени  $T$ ;  $p_2$  – вероятность безотказной работы второго элемента за тот же период времени  $T$ .

На рис.2 представлена схема системы с одним мостом. Каждому плечу мостового соединения поставлена в соответствие вероятность её безотказной работы  $p_{ij}$  ( $i = \{1,2\}, j = \{1,2\}$ ), за некоторый период времени  $T$ . Самому мосту поставлена в соответствие аналогичная вероятность  $p_m$ .

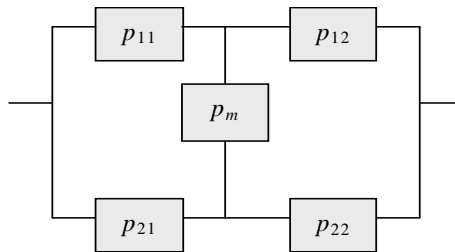


Рис.2 – Схема мостового соединения с одной перемычкой

Введем обозначения:  $A$  – событие, которое заключается в работоспособности системы за некоторый период времени  $T$ ;  $H_1$  – гипотеза, которая заключается в работоспособности моста в течение времени  $T$ ;  $H_2$  – гипотеза, которая заключается в выходе из строя моста в течение времени  $T$ .

Тогда вероятность гипотезы  $H_1$  соответствует величине  $p_m$ , а гипотезы  $H_2$  – величине  $(1 - p_m)$ .

Вычислим условные вероятности события  $A$  в предположении, что осуществилась та или иная гипотеза. Так, условная вероятность события  $A$  в предположении, что осуществилась гипотеза  $H_1$ , соответствует модели надежности смешанной системы, изображенной на рис.3, т.е.

$$P(A/H_1) = [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21})][1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22})].$$

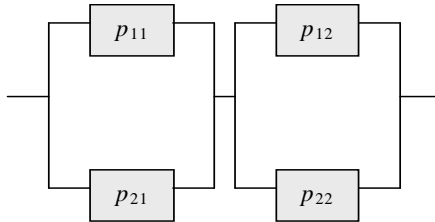


Рис.3 – Модель надежности системы с одним мостом при справедливости гипотезы  $H_1$

Условная вероятность события  $A$  в предположении, что осуществилась гипотеза  $H_2$  соответствует модели надежности системы, со смешанным соединением элементов, изображенной на рис.4, т.е.  $P(A/H_2) = [1 - (1 - p_{11}p_{12})(1 - p_{21}p_{22})]$ .

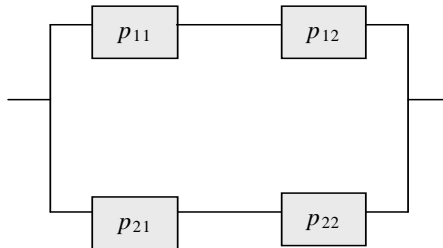


Рис.4 – Модель надежности системы с одним мостом при справедливости гипотезы  $H_2$

Искомая вероятность безотказной работы системы, приведенной на рис.2, равна средней вероятности события  $A$ . Эта величина определяется по формуле полной вероятности:

$$\begin{aligned} P(A) &= \sum_{i=1}^2 P(H_i)P(A/H_i) = P(H_1)P(A/H_1) + P(H_2)P(A/H_2) = \\ &= p_m [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21})][1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22})] + \\ &+ (1 - p_m)[1 - (1 - p_{11}p_{12})(1 - p_{21}p_{22})]. \end{aligned} \quad (1)$$

Выражение (1) является математической моделью надежности для системы с одним мостовым соединением элементов соответственно с неравновесными плечами мостового соединения.

Найдем вероятность безотказной работы системы параллельно соединенных элементов (рис.1) в случае ее разделения на равные части с добавлением одной перемычки, т.е.  $p_{11} = p_{12} = \sqrt{p_1}$  и  $p_{21} = p_{22} = \sqrt{p_2}$  (рис.2).

Обозначим через  $B$  событие безотказной работы системы, изображенной на рис.2. Вероятность безотказной работы всей системы  $P(B)$  определяется выражением (1):

$$P(B) = p_m \left[ 1 - (1 - \sqrt{p_1})(1 - \sqrt{p_2}) \right]^2 + (1 - p_m) [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)]. \quad (2)$$

Найдем также вероятность безотказной работы системы параллельно соединенных элементов в случае ее разделения одним мостом на неравные части, т.е.  $p_{11} \neq p_{12}$  и  $p_{21} \neq p_{22}$  (рис.5), где вероятности безотказной работы элементов соответственно будут равны:

$$p_{11} = \sqrt{\alpha \cdot p_1}; \quad p_{12} = \sqrt{\frac{p_1}{\alpha}}; \quad (3)$$

$$p_{21} = \sqrt{\alpha \cdot p_2}; \quad p_{22} = \sqrt{\frac{p_2}{\alpha}}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – параметр эквивалентности, исключающий нарушения равенства  $p_{11} \cdot p_{12} = p_1$  и равенства  $p_{21} \cdot p_{22} = p_2$ .

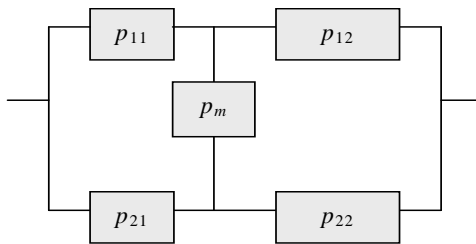


Рис.5 – Система мостового соединения с одной перемычкой, разделенная на неравные части

Аналогично, подставив в выражение (1) формулы (3), (4) и обозначив через  $C$  событие безотказной работы системы, изображенной на рис.5, получим:

$$P(C) = p_m \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\alpha \cdot p_1} \right) \left( 1 - \sqrt{\alpha \cdot p_2} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\frac{p_1}{\alpha}} \right) \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{p_2}{\alpha}} \right) \right] + (1 - p_m) \left[ 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \right] \quad (5)$$

Сравним вероятности  $P(B)$  и  $P(C)$ . Так как в формулах (2), (5) имеются одинаковые слагаемые  $(1 - p_m) \left[ 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \right]$  и одинаковый множитель  $p_m$ , то они не подлежат дальнейшему рассмотрению, так как не влияют на отношение  $\langle P(B) \diamond P(C) \rangle$ , где  $\diamond$  – искомый знак отношения. Исследуем отличающиеся части формул (2), (5), обозначив их, через  $B_1$  и  $C_1$ , соответственно получим:

$$\begin{aligned} B_1 &= \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{p_1} \right) \left( 1 - \sqrt{p_2} \right) \right]^2 = \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{p_1} - \sqrt{p_2} + \sqrt{p_1 p_2} \right) \right]^2 = \\ &= \left[ 1 - 1 + \sqrt{p_1} + \sqrt{p_2} - \sqrt{p_1 p_2} \right]^2 = \\ &= p_1 + 2\sqrt{p_1 p_2} + p_2 - 2\left( \sqrt{p_1} + \sqrt{p_2} \right) \cdot \sqrt{p_1 p_2} + p_1 p_2 = \\ &= p_1 + p_2 + p_1 p_2 + 2\sqrt{p_1 p_2} - 2p_1 \sqrt{p_2} - 2p_2 \sqrt{p_1}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\alpha \cdot p_1} \right) \left( 1 - \sqrt{\alpha \cdot p_2} \right) \right] \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\frac{p_1}{\alpha}} \right) \right] \left( 1 - \sqrt{\frac{p_2}{\alpha}} \right) = \\ &= \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\alpha \cdot p_1} - \sqrt{\alpha \cdot p_2} + \alpha \sqrt{p_1 \cdot p_2} \right) \right] \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\frac{p_1}{\alpha}} - \sqrt{\frac{p_2}{\alpha}} + \frac{\sqrt{p_1 p_2}}{\alpha} \right) \right] = \\ &= \left( \sqrt{\alpha \cdot p_1} + \sqrt{\alpha \cdot p_2} - \alpha \sqrt{p_1 \cdot p_2} \right) \cdot \left( \sqrt{\frac{p_1}{\alpha}} + \sqrt{\frac{p_2}{\alpha}} - \frac{\sqrt{p_1 p_2}}{\alpha} \right) = \\ &= p_1 + \sqrt{p_1 p_2} - p_1 \sqrt{\alpha \cdot p_2} + \sqrt{p_1 p_2} + p_2 - p_2 \sqrt{\alpha \cdot p_1} - \\ &- p_1 \sqrt{\frac{p_2}{\alpha}} - p_2 \sqrt{\frac{p_1}{\alpha}} + p_1 p_2 = p_1 + p_2 + p_1 p_2 + 2\sqrt{p_1 p_2} - \\ &- p_1 \sqrt{p_2} \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha}} + \sqrt{\alpha} \right) - p_2 \sqrt{p_1} \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha}} + \sqrt{\alpha} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Одинаковые слагаемые в формулах (6) и (7)  $p_1 + p_2 + p_1 p_2 + 2\sqrt{p_1 p_2}$  могут быть сокращены. Исследуем различающиеся части формул (6) и (7), обозначив их через  $B_2$  и  $C_2$  соот-

ветственно:

$$B_2 = -2p_1\sqrt{p_2} - 2p_2\sqrt{p_1}; \quad (8)$$

$$C_2 = -p_1\sqrt{p_2}\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} + \sqrt{\alpha}\right) - p_2\sqrt{p_1}\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} + \sqrt{\alpha}\right). \quad (9)$$

В новом отношении

$$\left[-2(p_1\sqrt{p_2} + p_2\sqrt{p_1})\right] \delta \left[-\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} + \sqrt{\alpha}\right)(p_1\sqrt{p_2} + p_2\sqrt{p_1})\right] \quad (10)$$

выделим отличительные сомножители:

$$2 \text{ и } \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} + \sqrt{\alpha}\right), \text{ где } \alpha \in (0; +\infty).$$

Исследуем функцию

$$f(\alpha) = 1/\sqrt{\alpha} + \sqrt{\alpha} \quad (11)$$

и ее производные:

$$f'(\alpha) = -\frac{1}{2\alpha^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{2\alpha^{\frac{1}{2}}}; \quad f''(\alpha) = \frac{3}{4\alpha^{\frac{5}{2}}} - \frac{1}{4\alpha^{\frac{3}{2}}}.$$

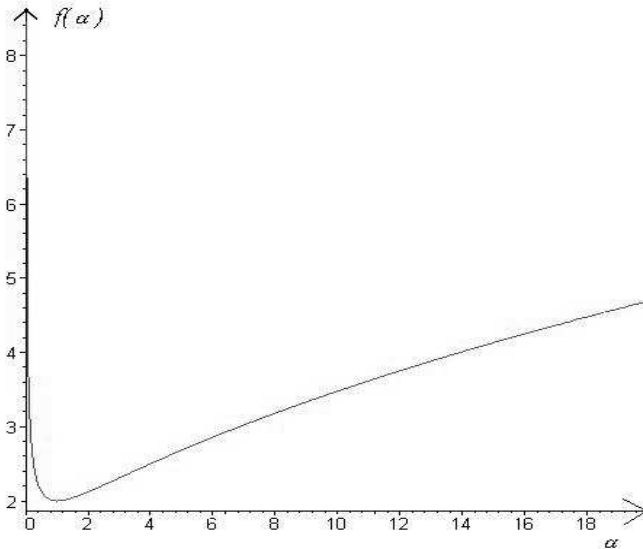


Рис.6 – График функции  $f(\alpha)$

Как видно из рис.6, на интервале (0, 1) функция  $f(\alpha)$  убывает, далее  $f(\alpha)$  растет, т.е. на интервале (1,  $+\infty$ ) первая производная  $f'(\alpha) > 0$ , а вторая  $f''(\alpha) \rightarrow 0$ . В точке  $\alpha=1$  функция  $f(\alpha)=2$ ,  $f'(\alpha)=0$  и  $f''(\alpha)=0,5$ . В силу сказанного, в точке  $\alpha=1$  функция  $f(\alpha)$  имеет глобальный минимум, тогда получаем:

$$2 \leq f(\alpha), \quad (12)$$

где  $f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} + \sqrt{\alpha}$ .

Подставив неравенство (12) в выражение (10) для  $B_2$  и  $C_2$ , имеем:

$$-2(p_1\sqrt{p_2} + p_2\sqrt{p_1}) \geq -(1/\sqrt{\alpha} + \sqrt{\alpha})(p_1\sqrt{p_2} + p_2\sqrt{p_1}).$$

Следовательно, отношение  $\langle P(B) \rangle / \langle P(C) \rangle$  примет вид неравенства  $\langle P(B) \rangle \geq \langle P(C) \rangle$ . Равенство достигается тогда и только тогда, когда  $\alpha=1$ . Таким образом, для схемы, изображенной на рис.2, вероятность безотказной работы системы принимает наибольшее значение в случае разделения элементов перемычкой на равные части.

Таким образом, в результате проведенных исследований технических систем с точки зрения их надежности:

- построена математическая модель (1) технической системы с асимметричной (с неравновесными плечами) мостовой структурой; получена функция ущербности (11), показывающая степень снижения надежности в зависимости от нарушения параметрической симметрии;
- показано, что задача выбора одномостовой системы с наивысшей надежностью сводится к задаче безусловной оптимизации (минимизации), в которой в качестве критерия оптимизации выступает функция ущербности (11);
- решение задачи безусловной минимизации функции (11) дает строгое математическое обоснование тому, что в качестве оптимального варианта должна выбираться система со структурной и параметрической симметрией;
- все полученные результаты данного исследования справедливы для параллельных ниток трубопровода с разными диаметрами или материалами труб, поскольку исследования проводились для общего случая ( $p_1 \neq p_2$ ).

- 1.Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
- 2.Ионин А.А. Надежность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.
- 3.Рудь И.А. Расчет надежности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.20. – К.: Техніка, 1999. – С.37-42.

*Получено 14.06.2006*

УДК 621.31.004

С.К.ЧЕРНОВ, канд. техн. наук  
ГП НПКГ «Зоря» - «Машипроект», г.Николаев

### **ОДИН ИЗ ПРОЕКТОВ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ – ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВОК «ВОДОЛЕЙ» ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Рассматривается современное состояние предприятий электро- и теплоснабжения населения городов. Предлагается новая высокоэффективная техника для модернизации таких предприятий с целью увеличения их мощности, повышения надежности их работы и экологических характеристик.

В последние годы в мире происходит постоянный рост цен на энергоносители. Состояние современной энергетики Украины характеризуется постепенным старением оборудования тепловых электростанций, низким КПД и соответственно ростом удельного расхода топлива на киловатт выработанной мощности. Большинство коммунальных предприятий городов за последние годы не получают достаточно финансирования для ремонта и модернизации оборудования и сетей. С целью покрытия убытков коммунальных энергетических предприятий городские советы вынуждены рассматривать вопрос о повышении тарифов на электро- и теплоснабжение городов. Поэтому проблема энергосбережения для Украины стала проблемой национальной безопасности страны.

Обеспечение жителей городов электрической и тепловой энергией по доступным ценам стоит довольно остро. Реализация энергосберегающих проектов в энергоснабжающих и теплоснабжающих предприятиях, повышение надежности их работы, минимизации влияния их на окружающую среду, является определяющим.

Один из путей решения этой проблемы – модернизация тепловых электростанций. Наиболее эффективный способ модернизации существующих тепловых электростанций – использование газотурбинных установок, позволяющих наиболее эффективно использовать топливно-энергетические ресурсы для снижения их общего потребления.