

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

А. Я. Найманов, д.т.н. профессор; Г.С. Турчина, ассистент; Ю.В. Гостева, ассистент
 ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. Оценку надежности кольцевой водопроводной сети предлагается выполнять методом сечений с учетом неравнозначности участков при осуществлении транспортной и раздаточной функций. Оценку надежности блока насосных агрегатов водопроводной насосной станции предлагается выполнять с использованием формулы полной вероятности.

Ключевые слова: надежность, вероятность безотказной работы, транспортная и раздаточная функции участков кольцевой водопроводной сети, неравнозначность участков, алгебра логики, мостиковые системы, насосно-силовой агрегат, отказ, коэффициент готовности, средняя наработка на отказ, среднее время восстановления, продолжительность межремонтного периода

Рассматривая системы водоснабжения, можно сказать, что нормативно задокументированного математического подхода в оценке надежности не существует, так же как и отсутствуют конкретные цифры параметров надежности для определения устойчивости системы водоснабжения. Небольшим исключением может служить нормирование длительности и количества перерывов в подаче воды для различных категорий городов [19]. Кроме этого, предлагаемые в литературе расчетные зависимости для оценки одних параметров надежности насосных станций не вполне удобны и громоздки, для других – зачастую не приводятся.

Сегодня можно выделить следующих ученых, которые вели свои изыскания в оценке надежности систем водоснабжения: Гальперин Е.М., Новохатный В.Г., Круценюк И.Ю., Панов М.Я., Щербатов В.И. и Петров Ю.Ф., Самойленко Н.И., Сенчук Т.С., Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. [1, 10, 13, 14, 18], Ильин Ю.А. [7, 8], Науменко И.И. [12], Журба М.Г. [6], Дерюшев Л.Г. [4, 5]. Также следует отметить ученых, чьи отдельные элементы методов исследования косвенным или прямым способом применимы к системам подачи воды: Ионин А.А., Рябинин И.А., Черкесов Г.Н., Горопашная А.В. и другие [3, 9, 17].

Возможное описание комплексной математической модели нахождения параметров надежности кроется во взаимодействии различных методик, увязывающих между собой ряд особенностей рассчитываемой системы и позволяющих учитывать характеристики, связи и факторы конструкций, функционирования и эксплуатации.

Первое, о чем стоит упомянуть при расчете систем подачи и распределения воды, – это двойственный характер функционирования их основ-



*Найманов
Аубекир Ягопирович*



*Турчина
Галина Сергеевна*



*Гостева
Юлия Владимировна*

ных элементов – трубопроводов. С одной стороны, они выполняют задачу транспортировки жидкости к другим участкам, с другой – забор воды из системы. Ни один из существующих методов оценки надежности системы водоснабжения не учитывает эту особенность в полной мере. При этом стоит обратить внимание, что большинство исследователей в своих работах считают участки сети одинаковыми [1, 6, 10, 13], в то время как каждый трубопровод отличен от других: материалом, из которого изготовлен, длиной, преобладающей функцией (транзита или забора воды), диаметрами, соответственно, количеством переносимой и подаваемой жидкости. Также отличительной чертой является местоположение участков в структурной схеме, например, удаленность от водоводов (чем ближе к водоводам – тем более важным является безотказное функционирование) или расположение около зданий и промпредприятий, где необходима бесперебойная подача воды и т. д.

В данной статье будут исследоваться некоторые способы учета неравнозначности участков сети, исходя из различности их диаметра (как следствие, их живого сечения, количества возможного транзита и забора воды) и наличия постоянно нагруженного резерва в виде смежных трубопроводов в кольцевых системах подачи и распределения воды. А также будет рассмотрено получение расчетных зависимостей для оценки параметров надежности насосных станций при различном количестве рабочих и резервных агрегатов в блоках насосно-силовых агрегатов, а также определении межремонтного периода насосных агрегатов.

Для примера рассматривается схема водоснабжения, представленная на рис. 1.

На данной схеме приведены номера узлов, длины участков и диаметры труб для двух вариантов: над чертой – чугунных, под чертой – полиэтиленовых.

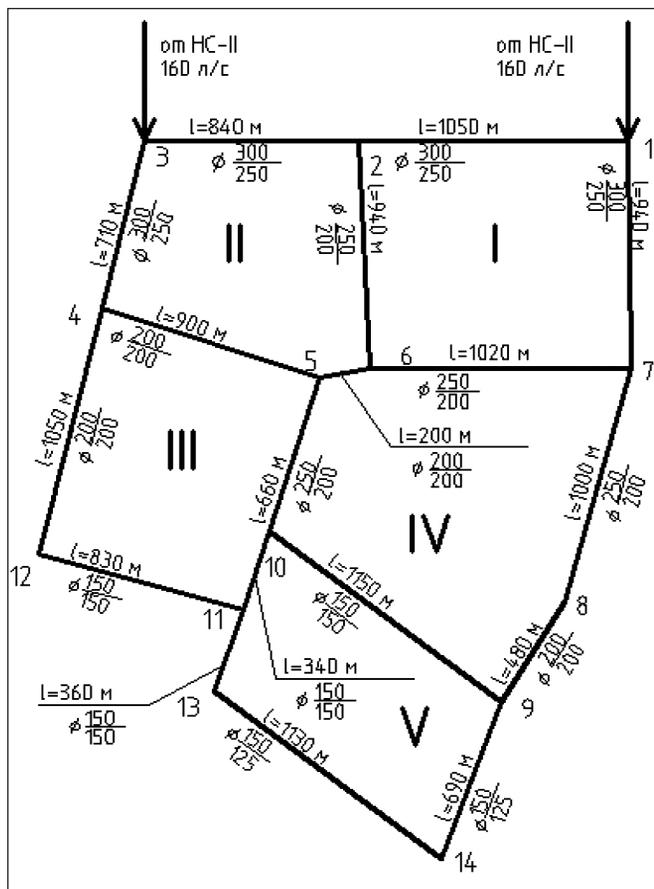


Рис. 1. Схема водопроводной сети

Величины путевых расходов воды в участках известны. Они приведены ниже в таблице 1 при оценке надежности.

Для начала рассчитаем параметры надежности для каждого участка, в частности, вероятность безотказной работы P_i .

$$P_i = e^{-\lambda l} \quad (1)$$

Таблица 1. Результаты расчета показателей надежности участков кольцевой сети без учета значимости (для $t=1$ год; для чугуна $\lambda = 0,43 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$, для полиэтилена $\lambda = 0,02 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$)

Показатели трубопровода			Для полиэтиленовых труб		Для чугунных труб	
№ уч.	l, км	$q_{\text{пут.}}, \text{ л/с}$	d, мм	$P_i = e^{-\lambda l}$	d, мм	$P_i = e^{-\lambda l}$
1	2	3	4	5	6	7
1-2	1,05	22	300	0,636702	250	0,979221
1-7	0,94	20	300	0,667539	250	0,981378
6-7	1,02	22	250	0,644968	200	0,979809
2-6	0,94	21	250	0,667539	200	0,981378
5-6	0,2	5	200	0,917602	200	0,996008
4-5	0,9	20	200	0,679118	200	0,982163
3-4	0,71	15	300	0,736926	250	0,985902
2-3	0,84	18	300	0,696866	250	0,983342
5-10	0,66	15	250	0,752939	200	0,986888
10-11	0,34	9	150	0,863998	150	0,993224

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
11-12	0,83	18	150	0,699868	150	0,983539
4-12	1,05	22	200	0,636702	200	0,979221
7-8	1	22	250	0,650538	200	0,980201
8-9	0,48	14	200	0,813525	200	0,990447
9-10	1,15	26	150	0,609907	150	0,977265
9-14	0,69	15	150	0,743290	125	0,986296
13-14	1,13	26	150	0,615174	125	0,977656
11-13	0,36	10	150	0,856600	150	0,992827
Σ	14,29	320				

Для учета значимости диаметров и количества дублирующих участков в кольцевой системе удобно применить метод «минимальных сечений», нашедший широкое применение в работах Рябинина И.А., и основанной им школы оценки параметров надежности с помощью булевой алгебры [17].

Минимальным сечением называется набор работоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них – к восстановлению работоспособности системы. Минимальных сечений может быть несколько, и в каждом не обязательно наличие всех элементов системы.

Для проведения расчета удобнее воспользоваться обозначениями, принятыми в булевой алгебре, где параллельное соединение можно выразить в виде дизъюнкций (логический оператор «или», ∨), а последовательное – конъюнкций (логический оператор «и», ∧). Эти обозначения использованы в таблице 2.

Дальнейшее решение производим согласно формулам теории вероятности.

Параметр вероятности безотказной работы:

- а) для двух параллельно соединенных элементов;
- б) для последовательного соединения элементов:

$$a) P_{a,b} = 1 - [(1 - P_a) \cdot (1 - P_b)], \quad (2)$$

$$б) P_{a,b} = P_a \cdot P_b \quad (3)$$

Вопросами неравнозначности элементов в различных отраслях науки занимались Рябинин И.А. (электроника, военная техника) [17], Горопашная А.В. (информационные технологии, электроника) [3], Ионин А.А. (газоснабжение) [9], Самойленко Н.И. (водоснабжение) [18] и другие.

Ввиду того, что в водоснабжении понижение подачи воды более 30 % от расчетной считается отказом трубопровода, для улучшения ситуации с доставкой недостающей воды через смежные участки может вводиться резервирование пропускной способности трубопровода. Поэтому для расчета значимости участков в дальнейшем будет более перспективно опираться на площадь живого сечения труб, а не расчетный расход.

Находим величину относительного сечения труб на участке сети C_i :

$$C_i = \frac{f_i}{F} = \frac{d_i^2}{D} = \left(\frac{d_i}{D}\right)^2, \quad (4)$$

Таблица 2. Отображение конъюнктивно-дизъюнктивных связей для нахождения параметров надежности трубопроводов, учитывая постоянное резервирование смежными участками

Расчетный участок	Расчетный и смежные трубопроводы	Расчетный участок	Расчетный и смежные трубопроводы
P_{1-2}	$P_{1-2} \vee P_{1-7} \vee P_{2-3} \vee P_{2-6}$	P_{8-9}	$P_{8-9} \vee P_{7-8} \vee P_{9-10} \vee P_{9-14}$
P_{1-7}	$P_{1-7} \vee P_{1-2} \vee P_{6-7} \vee P_{7-8}$	P_{4-12}	$P_{4-12} \vee P_{3-4} \vee P_{4-5} \vee P_{11-12}$
P_{2-3}	$P_{2-3} \vee P_{1-2} \vee P_{2-6} \vee P_{3-4}$	P_{11-12}	$P_{11-12} \vee P_{4-12} \vee P_{10-11} \vee P_{11-13}$
P_{2-6}	$P_{2-6} \vee P_{1-2} \vee P_{2-3} \vee P_{6-7} \vee P_{5-6}$	P_{5-10}	$P_{5-10} \vee P_{5-6} \vee P_{4-5} \vee P_{9-10} \vee P_{10-11}$
P_{3-4}	$P_{3-4} \vee P_{2-3} \vee P_{4-5} \vee P_{4-12}$	P_{10-11}	$P_{10-11} \vee P_{5-10} \vee P_{9-10} \vee P_{11-12} \vee P_{11-13}$
P_{4-5}	$P_{4-5} \vee P_{3-4} \vee P_{5-6} \vee P_{5-10} \vee P_{4-12}$	P_{9-10}	$P_{9-10} \vee P_{5-10} \vee P_{10-11} \vee P_{8-9} \vee P_{9-14}$
P_{5-6}	$P_{5-6} \vee P_{2-6} \vee P_{6-7} \vee P_{4-5} \vee P_{5-10}$	P_{9-14}	$P_{9-14} \vee P_{8-9} \vee P_{9-10} \vee P_{13-14}$
P_{6-7}	$P_{6-7} \vee P_{1-7} \vee P_{7-8} \vee P_{2-6} \vee P_{5-6}$	P_{13-14}	$P_{13-14} \vee P_{9-14} \vee P_{11-13}$
P_{7-8}	$P_{7-8} \vee P_{1-7} \vee P_{6-7} \vee P_{8-9}$	P_{11-13}	$P_{11-13} \vee P_{10-11} \vee P_{11-12} \vee P_{13-14}$

В первом столбце: вероятность безотказной работы для каждого участка. Во втором столбце представлены участки, входящие в расчетное минимальное сечение; все участки соединены параллельно, в булевой алгебре подобные соединения можно выразить через дизъюнкции (логический оператор «или», ∨).

где: d_i и f_i – диаметр (м) и площадь (м²) сечения труб, которые являются смежными с расчетным участком;

D и F – условный диаметр (м) и площадь сечения трубопровода (м²) для пропуска всего подаваемого в сеть расхода воды Q при скорости течения $V = 1$ м/с.

Так как определяется влияние отключения других участков на снижение подачи воды в расчетном трубопроводе, естественно будет находиться C_i только для смежных труб. Ввиду того, что отключение одного из смежных участков не обязательно приводит к уменьшению подачи воды ниже 70% от расчетной, т.е. параметрическому отказу, следовательно, логично будет соединять данные участки параллельно. При таком соединении получаем следующие выражения для каждого трубопровода (согласно рис. 1).

Таким образом, получаются отдельные подсистемы, позволяющие произвести расчет вероятности

работы (P) отдельного участка с учетом влияния параметров смежных участков (снижение подачи воды на них, количество подключенных участков, площадь живого сечения труб). Пример расчета одной из подсистем приведена ниже.

Расчет для участка 1-2 ($d=0,25$ м), материал – полиэтилен. Смежными ему являются участки 1-7 ($d=0,25$ м), 2-3 ($d=0,25$ м) и 2-6 ($d=0,20$ м). Соответственно, сумма всех диаметров составит 0,70 м. Тогда коэффициенты значимости для смежных участков составят $C_{1-7}=0,357$, $C_{2-3}=0,357$, $C_{2-6}=0,286$. Следом перемножаем P_i и C_i . Затем по структурно-логической схеме ведем расчет участков как параллельно соединенных элементов.

Проводим аналогичный расчет всех подсистем, состоящих из основных и смежных трубопроводов, для нахождения уточненных показателей вероятности безотказной работы с учетом значимости участков. Полученные значения приведены в таблице 4.

Таблица 3. Пример расчета одной из подсистем

	№ уч-ка	Диаметр	C_i	$P_i=e^{-\lambda L}$	$C_i \cdot P_i$
Основной	1-2	0,25		0,979221	0,979221
Смежные	1-7	0,25	0,357	0,981378	0,350
	2-3	0,25	0,357	0,983342	0,351
	2-6	0,20	0,286	0,981378	0,281
Σ		0,7	1,0	P (подсист.) = 0,994	

Таблица 4. Расчетные показатели вероятности безотказной работы отдельных участков с учетом влияния пропускной способности смежных участков

Полиэтилен						Чугун					
№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i
1-2	0,994	3-4	0,996	7-8	0,994	1-2	0,832	3-4	0,877	7-8	0,844
1-7	0,994	2-3	0,995	8-9	0,997	1-7	0,839	2-3	0,860	8-9	0,912
6-7	0,992	5-10	0,995	9-10	0,990	6-7	0,841	5-10	0,896	9-10	0,840
2-6	0,992	10-11	0,997	9-14	0,996	2-6	0,850	10-11	0,940	9-14	0,886
5-6	0,998	11-12	0,995	13-14	0,978	5-6	0,961	11-12	0,877	13-14	0,647
4-5	0,993	4-12	0,994	11-13	0,998	4-5	0,862	4-12	0,839	11-13	0,939

Согласно расчету можно проследить простые закономерности: если заложить резерв пропускной способности (диаметр труб), то можно существенно повысить вероятность подачи воды в требуемом количестве в случае поломки какого-либо участка – путем передачи недостающего количества жидкости за счет резерва живого сечения труб. Также естественно наблюдение, что чем большее количество трубопроводов подсоединены к расчетному участку в кольцевых сетях водоснабжения – тем выше показатели их надежности, и наоборот: чем меньше количество резервирующих участков – тем ниже падают их характеристики надежности. Если применить предложенную методику для различных конфигура-

ций расчетной схемы сети водоснабжения, можно с большей вероятностью определить наиболее перспективный подбор резервирующих трубопроводов в кольцевой водопроводной системе подачи и распределения воды. Также данный способ позволяет найти необходимый баланс между капитальными затратами и будущими экономическими выгодами при эксплуатации с точки зрения резерва полезного живого сечения труб.

Несколько иначе оценивается надежность насосных станций. Поскольку насосные станции также являются одним из наиболее ответственных элементов систем водоснабжения, то они с определенной вероятностью не должны допускать перерывов

в подаче воды либо эти перерывы должны быть не более одних суток. Отказы насосных станций могут привести к отказу всей системы. Таким образом, возникает необходимость в изучении методов оценки надёжности насосных станций.

По мнению целого ряда специалистов, при оценке надёжности насосных станций достаточно ограничиться оценкой технологической части станций. Отличительной особенностью этой части является применение в ней двух различных видов резервирования:

- постоянного в трубопроводной обвязке станции;
- замещением в блоке насосных агрегатов.

В связи с этим целесообразно технологическую часть насосной станции представлять состоящей из трех последовательно соединенных блоков:

- блока всасывающих трубопроводов;
- блока насосных агрегатов;
- блока трубопроводов с напорной стороны.

Оценка надёжности каждого блока выполняется отдельно.

При оценке надёжности насосных станций литературные источники обычно рекомендуют использовать надёжность насосного агрегата. В понятие «насосный агрегат» Ионин А.А. [9] предлагает включать пять последовательно соединенных элементов: задвижку на всасывающей стороне, насос, электродвигатель, задвижку на напорной стороне и обратный клапан. Иногда электродвигатель не включают в расчет надёжности технологической части.

К числу основных параметров надёжности насосных станций (насосных агрегатов) обычно относят вероятность безотказного действия P , коэффициент готовности K_g , среднюю наработку на отказ T_0 и среднее время восстановления (перерыва в работе) T_B . Надёжность агрегата легко вычисляется по известным формулам для системы с последовательным соединением элементов в структурно-логической схеме:

- вероятность безотказной работы насосно-силового агрегата

$$P_{agr} = P_1^2 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4, \quad (5)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4 – вероятность безотказной работы, соответственно, задвижки, насоса, электродвигателя и обратного клапана; коэффициент готовности насосно-силового агрегата

$$K_{g(agr)} = K_{g(1)}^2 \cdot K_{g(2)} \cdot K_{g(3)} \cdot K_{g(4)}, \quad (6)$$

где $K_{g(1)}, K_{g(2)}, K_{g(3)}, K_{g(4)}$ – коэффициент готовности, соответственно, задвижки, насоса, электродвигателя и обратного клапана.

Коэффициент готовности любого элемента вычисляется по формуле

$$K_{g(i)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}, \quad (7)$$

где μ – интенсивность восстановления элемента, ч⁻¹;

λ – интенсивность отказов элемента, ч⁻¹.

Вероятность безотказной работы элемента можно определить, используя формулу (1)

$$P_i = e^{-\lambda t},$$

где t – продолжительность эксплуатации элемента от момента начала эксплуатации (для нового элемента) или от момента окончания ремонта (для не нового элемента).

Величины λ и μ для элементов систем водоснабжения могут приниматься по данным Ильина Ю.А. [7, 8]. Отметим, что величина K_g является стационарной оценкой, т. е. не меняется в течение времени эксплуатации, а P – нестационарной.

Особенностью насосной станции является то, что насосные агрегаты резервируются замещением. Это делает неприменимыми обычные методы составления структурно-логических схем, а также метод структурной декомпозиции и эквивалентирования. Одним из методов оценки надёжности блока насосных агрегатов может быть использование формулы полной вероятности, которая рекомендуется теорией надёжности при резервировании замещением [2]. Структурно-логическая схема блока насосных агрегатов при резервировании замещением и наличии n рабочих и m резервных однотипных агрегатов представлена на рис. 2.

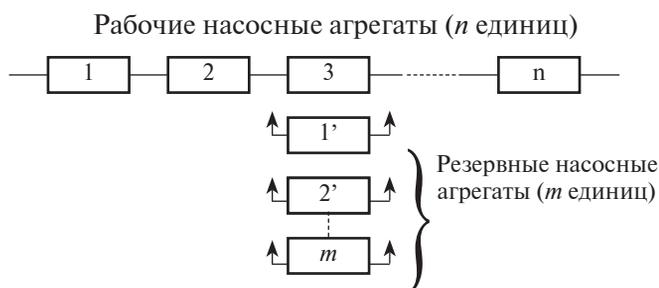


Рис. 2. Структурно-логическая схема блока насосных агрегатов

Резервные агрегаты находятся в режиме ожидания и могут быть включены вместо любого отказавшего рабочего агрегата. Все агрегаты однотипны.

Вероятность нахождения данной системы в работоспособном состоянии равна сумме вероятностей всех возможных работоспособных состояний.

Для системы с n рабочими и m резервными агрегатами при однотипных агрегатах таких состояний может быть $(m + 1)$:

1. Все $(n+m)$ агрегатов работоспособны (исправны).

2. Один агрегат неработоспособен (неисправен), число исправных агрегатов равно $[(n+m)-1]$.

3. Два агрегата неисправны, число исправных агрегатов равно $[(n+m)-2]$.

$(m+1)$. Неработоспособны m агрегатов, число исправных агрегатов равно n .

Если число неработоспособных агрегатов будет больше, чем число резервных агрегатов m , то число работающих агрегатов станет меньше n и насосная станция не будет подавать расчетный расход воды, что означает параметрический отказ насосной станции.

Формула полной вероятности работоспособного состояния системы имеет следующий вид

$$P_{\text{сист}} = \sum_{i=n}^{i=n+m} C_{(n+m)}^i \cdot P^i \cdot (1-P)^{(n+m)-i}, \quad (8)$$

где $P_{\text{сист}}$ – вероятность работоспособного состояния системы;

i, n, m – количество, соответственно, исправных, рабочих и резервных элементов;

$C_{(n+m)}^i$ – число перестановок из общего количества элементов $(n+m)$ по количеству исправных агрегатов i , $C_{(n+m)}^i = \frac{(n+m)!}{i![(n+m)-i]!}$;

$$C_{(n+m)}^{(n+m)} = 1$$

P – вероятность работоспособного состояния одного элемента;

$(1-P)$ – вероятность неработоспособного состояния элемента.

При подстановке в формулу (8) в качестве P вероятность безотказного состояния насосного агрегата $P_{\text{агр}}$ получим выражение для вероятности безотказной работы блока насосных агрегатов $P_{\text{БНА}}$

$$P_{\text{БНА}} = \sum_{i=n}^{i=n+m} C_{(n+m)}^i \cdot P_{\text{агр}}^i \cdot (1-P_{\text{агр}})^{(n+m)-i} \quad (9)$$

Если же в формулу (8) подставить в качестве P коэффициент готовности насосного агрегата $K_{\text{з(агр)}}$, то получим выражение для вычисления коэффициента готовности блока насосных агрегатов $K_{\text{з(БНА)}}$

$$K_{\text{з(БНА)}} = \sum_{i=n}^{i=n+m} C_{(n+m)}^i \cdot K_{\text{з(агр)}}^i \cdot (1-K_{\text{з(агр)}})^{[(n+m)-i]} \quad (10)$$

Отметим, что $P_{\text{БНА}}$ является нестационарной величиной, которая изменяется во времени; а $K_{\text{з(БНА)}}$ – стационарная оценка, которая от времени в явном виде не зависит.

Используя формулы (9) и (10), можно получить расчетные зависимости для оценки надежности блока насосных агрегатов для частных случаев при разном количестве рабочих и резервных агрегатов. Удоб-

но вместо индекса (БНА) записывать при параметрах надежности $(n+m)$, т. е. количество рабочих и резервных агрегатов. Ниже представлены преобразованные формулы (9) и (10) для двух вариантов сочетаний количества рабочих и резервных агрегатов. Что касается средней наработки на отказ T_0 и среднего времени восстановления $T_в$, то они рассматриваются ниже отдельно.

1. На насосной станции два рабочих и один резервный агрегат, $n=2, m=1$.

Данная система может находиться в двух работоспособных состояниях:

а) все три агрегата работоспособны, $i=3$,

$$P_{\text{агр}} = C_3^3 P_{\text{агр}}^3 (1-P_{\text{агр}})^{3-3}; C_3^3 = 1; P_{\text{агр}} = P_{\text{агр}}$$

б) работоспособны 2 агрегата, третий – неработоспособен, $i=2$.

$$P_{\text{б}} = C_3^2 P_{\text{агр}}^2 (1-P_{\text{агр}})^{3-2}; C_3^2 = 3;$$

$$P_{\text{б}} = 3P_{\text{агр}}^2 (1-P_{\text{агр}}).$$

Вероятность безотказной работы блока насосных агрегатов

$$P_{(2+1)} = P_{\text{а}} + P_{\text{б}} = P_{\text{агр}}^3 + 3P_{\text{агр}}^2 (1-P_{\text{агр}}).$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов

$$K_{\text{з(2+1)}} = K_{\text{з(а)}} + K_{\text{з(б)}} = K_{\text{з(агр)}}^3 + 3K_{\text{з(агр)}}^2 (1-K_{\text{з(агр)}}).$$

2. На станции три рабочих и два резервных агрегата, $n=3, m=2$.

Система может находиться в трех работоспособных состояниях:

а) все пять агрегатов работоспособны, $i=5$,

$$P_{\text{а}} = P_{\text{агр}}^5;$$

б) четыре агрегата работоспособны, один – неработоспособен, $i=4$,

$$P_{\text{б}} = C_5^4 P_{\text{агр}}^4 (1-P_{\text{агр}}) = 5 P_{\text{агр}}^4 (1-P_{\text{агр}});$$

в) три агрегата работоспособны, два – неработоспособны, $i=3$,

$$P_{\text{в}} = C_5^3 P_{\text{агр}}^3 (1-P_{\text{агр}})^2 = 10 P_{\text{агр}}^3 (1-P_{\text{агр}})^2;$$

Вероятность безотказного действия блока насосных агрегатов

$$P_{(3+2)} = P_{\text{а}} + P_{\text{б}} + P_{\text{в}} = P_{\text{агр}}^5 + 5P_{\text{агр}}^4 (1-P_{\text{агр}}) + 10P_{\text{агр}}^3 (1-P_{\text{агр}})^2.$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов

$$K_{\text{з(3+2)}} = K_{\text{з(а)}} + K_{\text{з(б)}} + K_{\text{з(в)}} = K_{\text{з(агр)}}^5 + 5K_{\text{з(агр)}}^4 (1-K_{\text{з(агр)}}) + 10K_{\text{з(агр)}}^3 (1-K_{\text{з(агр)}})^2.$$

Аналогичные формулы могут быть составлены и для других количеств рабочих и резервных агрегатов. Количество резервных агрегатов в данных формулах принималось не более двух, поскольку СП 31.13330.2012 [19] не предусматривает большего количества резервных агрегатов при любом количестве рабочих агрегатов. Получаемые с помощью формулы полной вероятности зависимости для оценки параметров надежности блока насосных агрегатов доста-

точно просты и пригодны для инженерных расчетов. Отметим, что именно надежность блока насосных агрегатов и определяет надежность всей насосной станции. На первом этапе надежности остальных блоков могут быть приняты равными единице.

Что касается средней наработки на отказ T_0 и среднего времени восстановления (простоя) $T_в$, то для их оценки можно привлечь следующие соображения. В принципе, среднее время простоя нормировано постановлениями правительства по правилам оказания услуг предприятиями водоснабжения и канализации. В России допускаемый перерыв в подаче воды потребителю составляет 4 часа единовременно при аварии и 8 часов (суммарно) в месяц [16]. В Украине допустимый перерыв в подаче воды составляет не больше 6 часов в сутки и не более 2 раз в месяц, т. е. 12 часов (суммарно) в месяц [15]. Системы водоснабжения ни на какие категории не делятся в [15, 16]. Указанные цифры не согласуются с требованиями СП 31.13330.2012 [19] к водопроводам I, II, III категорий, однако являются обязательными для исполнения. Таким образом, в России величина $T_в$ в расчете на один месяц эксплуатации должна приниматься равной восьми часам, тогда $T_0 = 720 - 8 = 712$ ч. В Украине же, соответственно, $T_в = 12$ ч, $T_0 = 720 - 12 = 708$ ч ($720 -$ число часов в одном месяце).

Исходя из этих цифр, можно вычислить нормативные величины коэффициентов готовности насосных станций за расчетное время 1 месяц:

– для условий России

$$K_z^{норм} = \frac{T_0}{T_0 + T_в} = \frac{712}{720} = 0,9889;$$

– для условий Украины

$$K_z^{норм} = \frac{T_0}{T_0 + T_в} = \frac{708}{720} = 0,9833.$$

В то же время нормативные величины вероятности безотказного действия насосных станций вычисляются по количеству отказов в месяц, которое для условий обеих стран составляет 2 отказа в месяц. Тогда

$$P_{норм} = \frac{30-2}{30} = 0,9333,$$

здесь 30 – среднее число дней работы станции за 1 месяц.

С нормативными величинами $K_z^{норм}$ и $P_{норм}$ необходимо сравнить расчетные величины $K_z(БНА)$ и $P_{БНА}$, полученные по формуле полной вероятности. Если расчетные значения указанных величин больше нормативных, то можно считать принятое количество рабочих и резервных насосных агрегатов достаточным для удовлетворения нормативных требований. В противном же случае надо принимать меры по

повышению надежности станции – увеличить количество резервных агрегатов или применять более надежные насосные агрегаты.

Следует отметить, что используя требования СП 31.13330.2012 [19], можно найти допустимое количество отказов за 1 год эксплуатации [11]. Нормативные величины коэффициентов готовности и вероятностей безотказного действия в расчете на 1 год также вычисляются путем сопоставления требований СП и постановлений правительства [15, 16]. Для условий Украины они составляют [11]:

для водопровода I категории – не более 4 отказов в год; $P_{норм}^{год} = 0,989$; $K_z^{год(норм)} = 0,997$;

для водопровода II категории – не более 12 отказов в год; $P_{норм}^{год} = 0,964$; $K_z^{год(норм)} = 0,992$;

для водопровода III категории – не более 24 отказов в год; $P_{норм}^{год} = 0,940$; $K_z^{год(норм)} = 0,984$;

Таким образом, водопроводы разных категорий отличаются только допустимым количеством отказов в год, длительность же одного отказа одинакова у всех категорий.

Важной величиной для эксплуатационников является длительность межремонтного периода насосного агрегата $T_{межрем}$. Она определяется следующим образом. В формуле полной вероятности для данного количества рабочих и резервных агрегатов задаем $P_{БНА} = P_{норм}$. Например, для трех рабочих и двух резервных агрегатов

$$P_{агр}^5 + 5P_{агр}^4(1 - P_{агр}) + 10P_{агр}^3(1 - P_{агр})^2 = P_{норм} = 0,9333.$$

Отсюда находим величину $P_{агр}$, которая должна иметь место в конце межремонтного периода. Далее выражаем из формулы $P_i = e^{-\lambda t}$ время t , которое и является межремонтным периодом $T_{межрем} = t = -\frac{\ln P_{агр}}{\lambda}$. Величина λ принимается по справочникам для данной марки насоса.

$$T_{межрем} = -\frac{\ln 0,9333}{1,6 \cdot 10^{-4}} = 431,43 \text{ ч.}$$

Таким образом, для практического применения предложена методика оценки надежности блока насосных агрегатов. Выведены расчетные зависимости для определения коэффициентов готовности и вероятности безотказного действия блока насосно-силовых агрегатов при различных количествах рабочих и резервных агрегатов. Показана возможность определения межремонтного периода насосных агрегатов.

Список литературы:

1. Гальперин, Е.М. Расчет кольцевых водопроводных сетей с учетом надежности функционирования [Текст] / Е. М. Гальперин – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1989. – 104 с.

2. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надежности [Текст] / Т.А. Голинкевич. – М.: Высшая школа, 1985. – 168 с.
3. Горопашная, А.В. Адаптация логико-вероятностных методов оценки веса, зависимости, вклада, ущерба и активности элементов для немонотонных логических функций. [Текст] / International Scientific School. Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems, MA SR-2007, September 4-8, 2007, S.-Petersburg, Russia, p.540. – Pp. 409–412.
4. Дерюшев, Л.Г. Показатели надежности трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения [Текст] / Л.Г. Дерюшев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 12. – С. 6–9.
5. Дерюшев, Л.Г. Оценка надежности систем водоснабжения [Текст] / Л.Г. Дерюшев, А.В. Минаев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1988. – № 11. – С. 4–5.
6. Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание второе, переработанное и дополненное [Текст]: Учебное пособие. Том 1 / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 288 с.
7. Ильин, Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования [Текст] / Ю. А. Ильин – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
8. Ильин, Ю.А. Расчет надежности подачи воды [Текст] / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
9. Ионин, А.А. Надежность систем тепловых сетей [Текст] / А.А. Ионин. – М.: Стройиздат, 1989. – 265 с.: ил. – (НК: Надежность и качество).
10. Круценюк, И.Ю. Математические методы и модели оценки вероятности безотказной работы сети водоснабжения на примере г. Норильска. – дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ [Текст] / И.Ю. Круценюк. – Норильск: Норильский индустриальный институт. – 2005. – 193 с.
11. Найманов, А.Я. Возможные нормативы надежности систем водоснабжения и водоотведения [Текст] / А.Я. Найманов, А.А. Найманова // Науковий вісник будівництва, Харків, Харк. нац. ун-т будівн. і арх., 2013. – № 71. – С. 397–402.
12. Науменко, И.И. Надежность сооружений гидромелиоративных систем [Текст]: учебное пособие / И.И. Науменко. – К.: Вища школа, 1990. – 239 с.
13. Новохатній, В.Г. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання. дис. на здобуття вч. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.23.04. – Водопостачання та каналізація. – 2012. – 350 с.
14. Панов, М.Я., Петров, Ю.Ф., Шербатов, В.И. Модели управления функционированием систем подачи и распределения воды. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2013. – 271 с.
15. Правила надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення / із змінами / Затверджено Постановою КМУ від 21 липня 2005 р. № 630, м. Київ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/630-2005-p>.
16. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов /с изменениями/. Утверждено Постановлением Правительства РФ от 6 мая 2011 г. № 354, г. Москва. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102147807>.
17. Рябинин, И.А., Черкесов, Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с., ил. – (Б-ка инженера по надежности).
18. Самойленко, Н.И., Сенчук, Т.С. Функциональная надежность магистральных трубопроводных транспортных систем [Текст]: Монография / Н.И. Самойленко, Т.С. Сенчук. – Х.: Издательство «ХТМТ», ХНАІХ, 2009. – 276 с.
19. Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02.-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст]: СП 31.13330.2012 – М.: Минрегион России, 2011. – 124 с.