

УДК 621.398+681.518.3

: . У. Zkdbg , технический директор
ООО «Технотроникс» (Пермь)

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫМИ СИТУАЦИЯМИ

JKfhliEz klhoZklbqkdZy fhëv hldZah\ b hkkkZghëgby bggìghh hfjmhZgby dhf -
fmgZevguo liehuo klc èy ZlhZl babjhZggghc bgnhjfZpbhggh -ledhffmgbdZpbhgghc kbbkl -
fu , jrZxsc aZZqm khjZ Zgguo h hagbdghgbb ZZjbc \ klyo liehkgZgby , bo hjZfldb
b mijZegby ZZjbcgufb kblmZpbyfb .

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная система, телеметрия, сети водоснабжения

Решение задачи централизованного сбора данных о возникновении аварийных ситуаций в сетях теплоснабжения, их обработки и управления является весьма актуальным и востребованным на сегодняшний день. Именно эта задача, в частности, ставилась при разработке автоматизированной информационно-телекоммуникационной системы (ИТС) «Ценсор-Технотроникс», упрощенная структурная схема которой представлена на рис. 1.

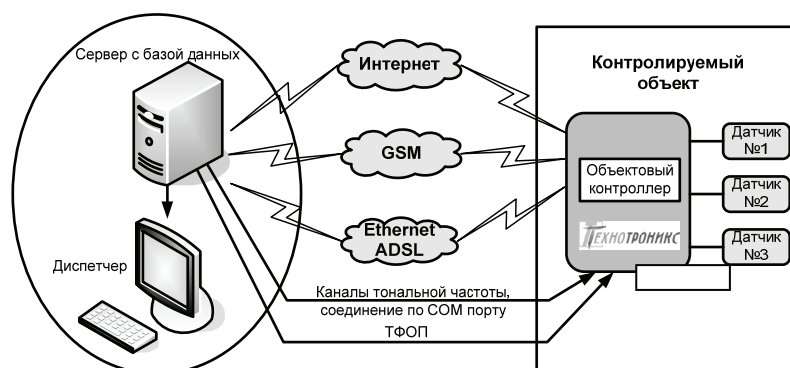


Рис. 1. Структурная схема ИТС «Ценсор-Технотроникс»

Объектовый контроллер принимает данные от датчиков, осуществляет их первичную обработку, направляет подготовленные данные в диспетчерский центр и оказывает управляющие воздействия на контролируемые объекты. Оборудование диспетчерского центра и объектового оборудования соединены между собой через многочисленные каналы связи.

Среди многих функций контроллера имеет место функция технологического контроля, которая, в частности, отвечает за фиксирование аварийных ситуаций на объекте коммунальной сети водоснабжения и управление данными ситуациями. Фиксирование аварийной ситуации осуществляется с помощью датчика протечки воды, который предназначен для аварийной сигнализации при появлении открытой влаги в помещении, а также для выдачи управляющего сигнала на перекрытие тру-

бопровода (трубопроводов) при фиксации факта протечки. Источником влаги, например, могут быть протечки батарей отопления, труб системы водоснабжения либо осадки. Перекрытие трубопровода – это вынужденная экстренная мера, которая, однако, не отменяет принятие решения и выезда бригады ремонтников.

Датчик протечки воды состоит из блока обработки сигнала и чувствительных элементов. Датчик реагирует на прямое попадание воды на чувствительный элемент. В связи с этим чувствительные элементы следует располагать непосредственно в местах возможной протечки. Чувствительные элементы подключаются к блоку обработки сигнала, образуя шлейф сигнализации. Блок обработки сигнала реагирует как на попадание влаги на любой из чувствительных элементов, так и на обрыв шлейфа. В обоих случаях вырабатывается сигнал аварии. При этом управляющий сигнал на перекрытие трубопроводов выдается только при протечке. Количество чувствительных элементов, подключаемых к блоку обработки сигнала, не ограничено. Следует иметь в виду, что чувствительные элементы являются неадресными и при большом их количестве могут возникнуть сложности с определением конкретного места протечки. При поставке определенного количества чувствительных элементов на каждый блок обработки сигнала должен приходиться один оконечный чувствительный элемент. Оконечный чувствительный элемент отличается от обычного наличием резистора, уравновешивающего шлейф сигнализации. Оконечный чувствительный элемент монтируется на шлейфе последним. Датчик протечки имеет два выхода: выход «Авария» и управляющий выход. Выход «Авария» срабатывает при двух событиях – при фиксации факта протечки и при обрыве шлейфа чувствительного элемента. Управляющий выход срабатывает только при фиксации факта протечки.

Для создания вероятностной модели изучаемой системы инженерных коммуникаций все инженерное оборудование, которое находится на обслуживании, представим как некоторую систему S . При выходе из строя (отказе) оборудования или его восстановлении (ремонте) система S переходит из одного состояния в другое в случайные моменты времени t , поэтому математическая модель, описывающая состояние системы S , является динамической вероятностной моделью. Очевидно, что систему S можно рассматривать как физическую систему, в которой каждый вид оборудования имеет определенную надежность, и переход системы из состояния S_i в S_j зависит от многих факторов, таких как качество оборудования, сроки и условия эксплуатации и т. д.

На начальном этапе разработки модели мы позволили себе рассмотреть систему S как систему заявок и к изучению случайного процесса отказов и ремонта оборудования применить схему марковского случайного процесса с дискретными состояниями $S_i (i = \overline{1, N+1})$ системы S и непрерывным временем t .

Составим уравнения Колмогорова, описывающие состояния системы инженерного оборудования S :

$$\begin{cases} dp_1/dt = -\lambda_{1,2}p_1 - \lambda_{1,3}p_1 - \dots - \lambda_{1,N+1}p_1 + \\ + \lambda_{2,1}p_2 + \lambda_{3,1}p_3 + \dots + \lambda_{N+1,1}p_{N+1} \\ \dots \\ dp_2/dt = -\lambda_{2,1}p_2 - \lambda_{2,3}p_2 - \dots - \lambda_{2,N+1}p_2 + \\ + \lambda_{1,2}p_1 + \lambda_{3,2}p_3 + \dots + \lambda_{N+1,2}p_{N+1} \\ dp_{N+1}/dt = -\lambda_{N+1,1}p_{N+1} - \lambda_{N+1,2}p_{N+1} - \dots - \lambda_{N+1,N}p_{N+1} + \\ + \lambda_{1,N+1}p_1 + \lambda_{2,N+1}p_2 + \dots + \lambda_{N,N+1}p_N \end{cases} \quad (1)$$

Если произвести замену: $a_i = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N+1} \lambda_{ij}$, $i = 1, N+1$, то можно записать систему

дифференциальных уравнений (1) в матричном виде [1].

$$\begin{pmatrix} dp_1/dt \\ dp_2/dt \\ dp_3/dt \\ \dots \\ dp_{N+1}/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & \lambda_{21} & \lambda_{31} & \dots & \lambda_{N+1,1} \\ \lambda_{12} & a_2 & \lambda_{32} & \dots & \lambda_{N+1,2} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & a_3 & \dots & \lambda_{N+1,3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{1N+1} & \lambda_{2N+1} & \lambda_{3N+1} & \dots & a_{N+1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_{N+1} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Подставив $p_{N+1} = 1 - (p_1 + p_2 + \dots + p_N)$ в систему (2), получим [2]:

$$dP/dt = AP + F, \quad (3)$$

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} a_1 & \lambda_{21} & \lambda_{31} & \dots & \lambda_{N,1} \\ \lambda_{12} & a_2 & \lambda_{32} & \dots & \lambda_{N,2} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & a_3 & \dots & \lambda_{N,3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{1N} & \lambda_{2N} & \lambda_{3N} & \dots & a_N \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_{N+1} \end{pmatrix}; \quad \frac{dP}{dt} = \begin{pmatrix} dp_1/dt \\ dp_2/dt \\ dp_3/dt \\ \dots \\ dp_{N+1}/dt \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} \lambda_{N+1,1} \\ \lambda_{N+1,2} \\ \lambda_{N+1,3} \\ \dots \\ \lambda_{N+1,N} \end{pmatrix}.$$

Если в начальный момент времени все элементы инженерного оборудования находятся в исправном состоянии, а система соответственно находится в состоянии S_1 , то начальными условиями для решения уравнения (3) являются:

$$p_1(0) = 1, p_i(0) = 0, \text{ где } 1 < i < N+1. \quad (4)$$

При условии, что интенсивности переходов из состояния в состояние $\lambda_{ij} = \lambda$, при $i < j$, и $\lambda_{ij} = \mu$, при $i > j$ постоянны, система (3) является линейной неоднородной системой дифференциальных уравнений, и задача Коши для этой системы имеет единственное решение; а в случае замкнутости рассматриваемой системы по теореме Хинчина это решение является устойчивым [3, 4].

Для определения параметров λ и μ было сделано предположение о том, что потоки заявок и ремонта оборудования являются простейшими пуассоновскими потоками. Гипотеза о показательном распределении потоков была проверена с помощью критерия Пирсона. При $\lambda = 0,05$ и $\mu = 0,06$ были найдены вероятности состояния $p_i(t)$ системы S .

Особый интерес представляет предельный случай, когда при $t \rightarrow \infty$, в системе S устанавливается стационарный режим. Для того чтобы вычислить предельные вероятности в системе уравнений Колмогорова, нужно положить dp_i/dt равными нулю. В этом случае имеем систему линейных алгебраических уравнений (3) [5].

$$AP + F = 0, \quad (5)$$

где $A = A(\lambda, \mu)$.

Методы решения следующие.

Аналитическое решение уравнения (3):

$$P'(t) = AP(t), \quad (6)$$

$$P_{\text{о.н}}(t) = P_{\text{о.о}}(t) + P(t),$$

где $P_{\text{о.н}}(t)$ – общее решение неоднородной системы (3), $P_{\text{о.о}}(t)$ – общее решение однородной системы (6), $P(t)$ – частное решение неоднородной системы (3),

$$P_{\text{о.о}}(t) = W(t) \cdot C,$$

где $W(t) = W(P^{(1)}(t), P^{(2)}(t), \dots, P^{(n)}(t))$ – фундаментальная матрица, $\{P^{(i)}(t)\}_1^n$ – совокупность линейных независимых решений, $P^{(i)}(t) = \alpha_i \exp(k_i \cdot t)$, где k_i – корень характеристического уравнения [6].

$$P(t) = W(t) \cdot \int_{t_0}^t W^{-1}(\xi) F(\xi) d\xi, \quad P_{\text{ч.н}}(t) = W(t)W^{-1}(t_0) (P_0 - P(t_0)) + P(t).$$

Численное решение уравнения (3) [7]:

$$\begin{cases} p_1^{(i+1)} = p_1^{(i)} + ha^{(1)} p^{(i)} + f_1 h, \\ p_2^{(i+1)} = p_2^{(i)} + ha^{(2)} p^{(i)} + f_2 h, \\ \dots \\ p_n^{(i+1)} = p_n^{(i)} + ha^{(n)} p^{(i)} + f_n h, \end{cases}$$

h – шаг по времени,

где $p^{(i)} = (p_1^{(i)}, p_2^{(i)}, \dots, p_n^{(i)})^{-1}$ значение на i -м шаге, $a^{(k)} = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk})$, $1 \leq k \leq n$,

$F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$, $p^{(0)} = (p_1^{(0)}, \dots, p_n^{(0)})$, $\|P^{(k+1)} - P^{(k)}\| \leq \varepsilon$, где $\varepsilon = 10^{-6}$.

Численное решение уравнения (5): $CP(t) = BP(t) + D$;

$$|a_{ii}| > \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |a_{ij}|, \quad 1 \leq i \leq n; \quad b_{ij} = -a_{ij} / a_{ii}, \quad i \neq j, \quad b_{ii} = 0; \quad d_i = \frac{b_i}{a_{ii}};$$

$$\begin{cases} p_1^{(k+1)} = b_{1,1} p_1^{(k)} + b_{1,2} p_2^{(k)} + \dots + b_{1,n} p_n^{(k)} + d_1, \\ p_2^{(k+1)} = b_{2,1} p_1^{(k+1)} + b_{2,2} p_2^{(k)} + \dots + b_{2,n} p_n^{(k)} + d_2, \\ \dots \\ p_n^{(k+1)} = b_{n,1} p_1^{(k+1)} + b_{n,2} p_2^{(k+1)} + \dots + b_{n,n} p_n^{(k)} + d_n, \end{cases}$$

$$p^{(0)} = (p_1^{(0)}, \dots, p_n^{(0)}) - \text{н.у.}; \quad \|P^{(k+1)} - P^{(k)}\| \leq \varepsilon, \quad \text{где } \varepsilon = 10^{-6}.$$

Ввиду большой размерности системы (5) ее аналитическое решение слишком трудоемко и неэффективно, поэтому для реализации численного решения был разработан программный продукт, который позволяет не только просчитывать реаль-

ные состояния исследуемой системы, но и моделировать различные ситуации относительно изменений потоков интенсивностей λ и μ [8].

С помощью программного продукта была исследована зависимость вероятностей состояния системы от потока заявок (рис. 2). На диаграмме видно, что при увеличении потока заявок увеличиваются вероятности «больших поломок». Под «большими поломками» будем понимать состояния системы, когда вышло из строя больше половины элементов.

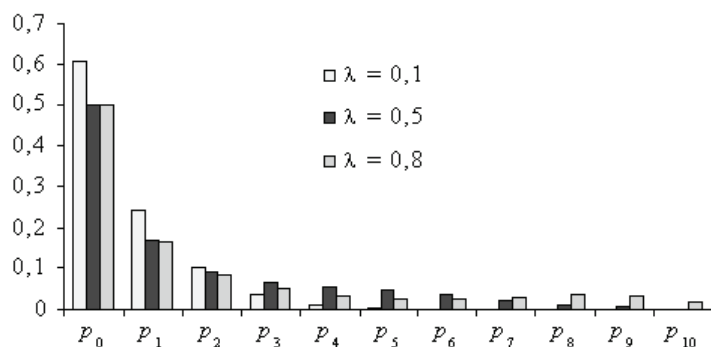


Рис. 2. Зависимость вероятностей поломок десяти узлов от потока заявок

Опасная ситуация сложилась при $\lambda = 0,8$, так как вероятность поломки $p_{10} = 0,0191$ (табл. 1), в отличие от того, что при $\lambda = 0,1$ $p_{10} = 4,23E-08$. Поэтому по виду распределения поломок можно проанализировать состояние объекта наблюдения. Если вероятность «больших поломок» будет большой, то можно сказать, что объект находится в плохом состоянии и требует капитального ремонта.

Поток заявок сильно влияет на распределение вероятностей, и мы не можем его контролировать, так как элементы ломаются независимо от нас, случайным образом. Посмотрим, как влияет поток ремонта на вероятности поломок.

Таблица 1. Распределение вероятностей десяти узлов

Вероятность	$\lambda = 0,1$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 0,8$
p_0	0,6060000	0,50000	0,5000
p_1	0,2410000	0,16800	0,1670
p_2	0,1020000	0,08920	0,0833
p_3	0,0369000	0,06320	0,0501
p_4	0,0112000	0,05390	0,0339
p_5	0,0028300	0,04660	0,0261
p_6	0,0005890	0,03580	0,0251
p_7	0,0000977	0,02320	0,0298
p_8	0,0000121	0,01260	0,0346
p_9	1,01E-06	0,00546	0,0313
p_{10}	4,23E-08	0,00150	0,0191

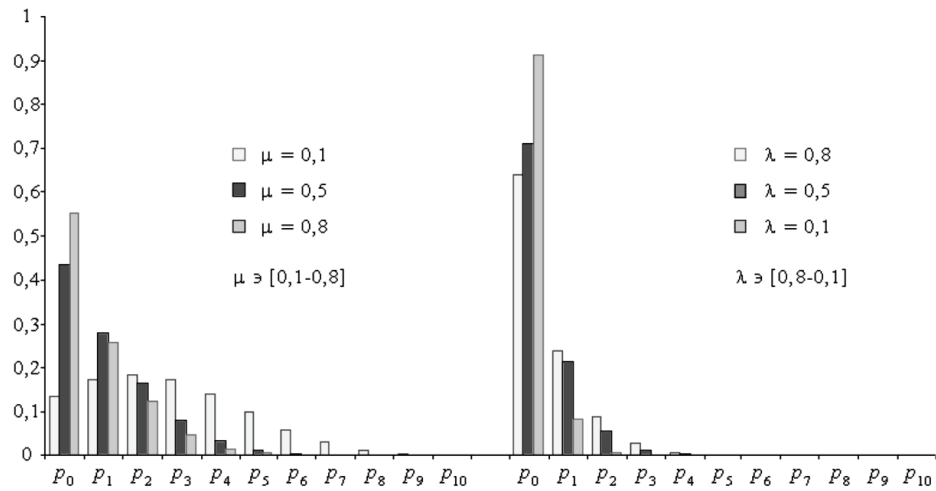


Рис. 3. Зависимость вероятностей поломок десяти узлов от потока заявок и потока восстановления

На рис. 3 представлены распределения поломок десяти элементов при изменении λ и μ . Видно, что поток ремонта тоже влияет на изменение вероятностей состояния системы. То есть увеличивая поток ремонта μ , мы можем увеличить вероятность того, что система будет находиться в состоянии «ничего не сломалось», и значительно снизить вероятность «больших поломок». На рис. 3 видно, что поток заявок значительно сильнее влияет на вероятности состояний, чем поток ремонта. Также они влияют на вероятности состояний обратно пропорционально [9].

Табл. 2. Распределение вероятностей десяти узлов при изменении потока заявок и ремонта

Вероятность	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,8$	$\lambda = 0,8$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 0,1$
p_0	0,1331000	0,43430	0,550000	0,638000	0,71000	0,912700
p_1	0,1701000	0,27970	0,258800	0,238400	0,21570	0,081790
p_2	0,1856000	0,16210	0,120900	0,087500	0,05600	0,005221
p_3	0,1726000	0,07814	0,047760	0,026820	0,01180	0,000253
p_4	0,1391000	0,03146	0,015780	0,006800	0,00202	9,60E-06
p_5	0,0973100	0,01057	0,004357	0,001420	0,00028	2,80E-07
p_6	0,0582500	0,00292	0,000989	0,000243	3,10E-05	6,70E-09
p_7	0,0289700	0,00064	0,000179	3,20E-05	2,60E-06	1,20E-10
p_8	0,0113300	0,00011	2,42E-05	3,20E-06	1,70E-07	1,50E-12
p_9	0,0031310	1,19E-05	2,20E-06	2,10E-07	7,06E-09	1,20E-14
p_{10}	0,0004623	6,67E-07	1,00E-07	7,20E-09	1,40E-10	0

Из табл. 2 видно что, при $\lambda = 0,1$ практически полностью исчезают вероятности «больших поломок», а $p_0 = 0,9127$. При $\mu = 0,8$ имеем $p_0 = 0,55$.

Вообще говоря, на поток ремонта мы можем повлиять, увеличив эффективность работы или количество рабочих, тем самым уменьшая вероятность поломок системы.

Список литературы

1. Bevbg < . : ., Ihagyd W =. Линейная алгебра : учебник / ред. А. Н. Тихонов. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 296 с. – (Курс высшей математики и математической физики ; вып. 6).
2. N[ee] <. Введение в теорию вероятностей и ее приложения : в 2 т. ; пер. с пересмотрен. 3-го англ. изд. Ю. В. Прохорова ; предисл. А. Н. Колмогорова. – М. : Наука, 1984. – Т. 1 – 537 с. Т. 2 – 751 с.
3. fmfZ < . ?. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике : учеб. пособие для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1979. – 400 с.
4. Eyebg < . ?, IhihbgZ H. F., Kfzgh < . <. Математические модели расчета надежности инженерных коммуникаций и оборудования при многоуровневой модели управления крупным предприятием // Аудит и финансовый анализ. – 2006. – № 4. – С. 189–220.
5. Jh < . : . Проектирование организации крупных производственно-хозяйственных комплексов и управления ими // Плановое хоз-во. – 1975. – № 5. – С. 18–27.
6. FurdbgZ : . >. Математика. Специальные курсы. – М. : Наука, 1971. – 240 с.
7. Zzh G. K., Qdh G. I., Dhfydh =. F. Численные методы : учеб. пособие. – М. : Наука, 1987. – 600 с.
8. <hedh ? . : . Численные методы : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.
9. EbofZ B. B., Kdhjhoh^ : . <. Введение в теорию случайных процессов. – М. : Наука, 1977. – 568 с.

A. Ya. Raskin, Engineering Manager of LLC Tehnotronics, Perm

Stochastic Model of Failures and Recovery of Engineering Services of Water Supply Networks for an Information-Telecommunication Control System of Emergencies

The stochastic model of failures and recovery of the thermal networks engineering equipment for the automated information-telecommunication system solving a problem of data gathering about failures in heat supply networks, their processing and management of emergencies is considered.

Keywords: information-telecommunication system, telemetry, water networks

Получено: 30.03.11

УДК 621.785.54

J. J. KZmZgh\ , старший преподаватель;
J. F. e\ , доктор технических наук, профессор;
<. Aabg , кандидат технических наук, доцент;
J. F. =Zeb\ , кандидат технических наук, доцент;
J. J. Zobfh\ , магистрант

Камская государственная инженерно-экономическая академия (ИНЭКА)
г. Набережные Челны

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА НА ОСНОВЕ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

IjklZg ZgZebajamevZlh\ wdkijbfglZevguo bkkehZgbc aZbfhZklby ieZafu k ih-
joghklvx flZeeZ , ihdZaZgZ gklZhevghklv ihdZaZlec dZqklZ loghehZqkdhh ijhpkkZ . ey
bo klZpebaZpbb ghphbfn bkkehZlv kidljZevgu_ oZjZdljklbdb baemqgby ieZafu .