

УДК 621.398+681.518.3

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

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНОГО КОМПЛЕКСА ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДИНАМИКИ СРЕДНИХ

*JKkfhijgZ fZlfZlbqkdZy fhëv kbbkfu bggìghñ dhfiedkZ hñkgZgby èy Zlh - fZlbabjhZgghc bgnhifZpbhggh -ledhffimgbdZpbhgghc kbbkfu , hkghZggZy gZ flh^ bgZfbd kjgbo . GZ hkgh\ Zgghc fhëb ihkljhgZ fZlfZlbqkdZy fhëv , dhlhjZy mqbluZL baghk bg- gìghñ hñjmhZgby dhfiedkZ hñkgZgby .*

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

Накапливающийся износ элементов системы водоснабжения, отсутствие средств на полный капитальный ремонт элементов, а также затянувшийся переход на полипропиленовые трубы приводят к большому количеству возникающих аварийных ситуаций на объектах системы водоснабжения. Поэтому 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, кроме прочих, ставилась при разработке автоматизированной информационно-телекоммуникационной системы (ИТС) «Ценсор-Технотроникс», структурная схема которой представлена на рис. 1.

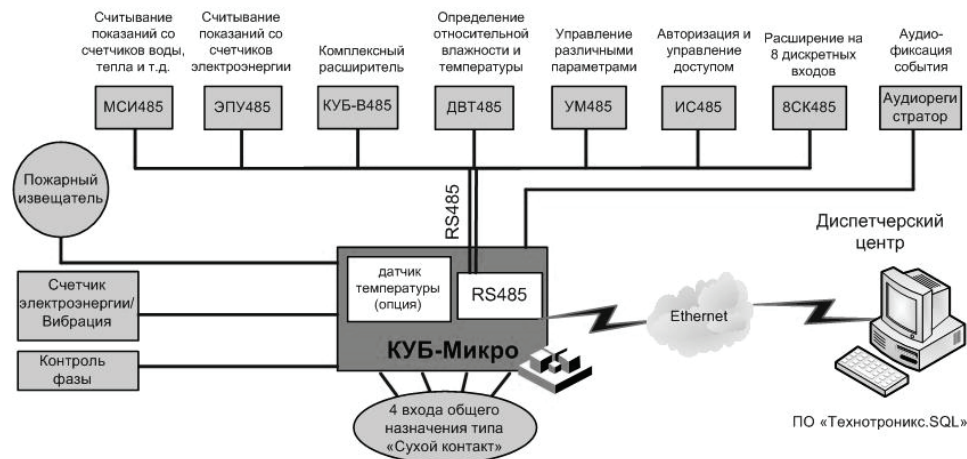


Рис. 1. Структурная схема ИТС «Ценсор-Технотроникс»

Объектовое оборудование (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 объектовое оборудование соединены между собой посредством дискретных каналов связи. В качестве объектового оборудо-

вания в ИТС используется разработанный контроллер управляющий блочный «Контроль, Управление, Безопасность».

Среди многих функций контроллера выделяется 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 трубопровода (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.

Пусть система  $S$  представляет собой совокупность  $E$  видов инженерного оборудования [1]. Каждый вид оборудования выходит из строя и восстанавливается с определенными интенсивностями  $\lambda^i$  и  $\mu^i$ , которые были исследованы и вычислены в предыдущем разделе, отказы видов инженерного оборудования происходят также независимо друг от друга. Таким образом, рассмотрен каждый вид отдельно  $S^1, S^2, \dots, S^M$ , и для каждого вида отдельно записана система дифференциальных уравнений с использованием метода динамики средних.

Итак, одна из  $E$  систем, система  $S^i$ , содержит  $N^i$  однородных элементов, которые могут находиться в двух состояниях:  $\xi_1$  – состояние исправности,  $\xi_2$  – состояние неисправности (рис. 2).

Далее составим уравнения динамики средних и решим их при условии, что в начальный момент все элементы исправны и найдем математические ожидания численностей состояний для характеристики результата.

Обозначим:  $m_1^i$  – среднее число исправных элементов в момент  $t$ ;  $m_2^i$  – среднее число неисправных элементов в тот же момент.

Уравнения для средних численностей состояний будут [1, 2]:

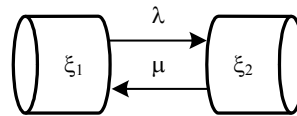


Рис. 2. Граф состояний системы

$$\left. \begin{aligned} dm_1^i(t)/dt &= -\lambda^i \cdot m_1^i(t) + \mu^i \cdot m_2^i(t), \\ dm_2^i(t)/dt &= -\mu^i \cdot m_2^i(t) + \lambda^i \cdot m_1^i(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, M$ ,  $M$  – количество видов инженерного оборудования.

$$\text{Условие нормирования: } m_1^i(t) + m_2^i(t) = N^i. \quad (2)$$

$$\text{Начальные условия имеют вид: } m_1^i(0) = N^i, m_2^i(0) = 0. \quad (3)$$

Решение системы (1).

Из условия (2), сделав подстановку  $m_2^i = N^i - m_1^i$  в (1), получим [3]:

$$dm_1^i(t)/dt = -\lambda^i m_1^i(t) + (N^i - m_1^i(t))\mu^i.$$

Проинтегрируем полученное уравнение, пользуясь начальными условиями (3), получим уравнение средней численности элементов, находящихся в состоянии исправности  $S^i$ -го вида инженерного оборудования:

$$m_1^i(t) = N^i \left[ \left( \lambda^i \cdot e^{-(\lambda^i + \mu^i)t} + \mu^i \right) / (\lambda^i + \mu^i) \right]. \quad (4)$$

$$\text{Таким образом, } p_1^i(t) = \left( \lambda^i \cdot e^{-(\lambda^i + \mu^i)t} + \mu^i \right) / (\lambda^i + \mu^i), \quad (5)$$

где  $p_1^i(t)$  – это вероятность того, что система  $S$   $i$ -го вида инженерного оборудования из  $N^i$  однородных элементов находится в работоспособном состоянии  $\xi_1$ .

Ввиду того, что виды инженерного оборудования взаимно незаменимы, то надежность всей системы  $S$  принимает вид:  $P = \prod_{i=1}^M p_1^i$ . (6)

Система  $S$  разделена на четыре основные вида инженерного оборудования: горячее водоснабжения (ГВС), холодное водоснабжение (ХВС), отопление, канализация. Используя интенсивности потоков  $\lambda^i$  и  $\mu^i$ , можно определить надежность системы инженерного оборудования исследуемого объекта.

Для ГВС функция надежности принимает вид (рис. 3):

$$p_{\text{ГВС}}(t) = (0,062 \cdot e^{-0,064t} + 0,00194) / 0,064 = 0,97 \cdot e^{-0,064t} + 0,03. \quad (7)$$

Для ХВС функция надежности выглядит таким образом (рис. 4):

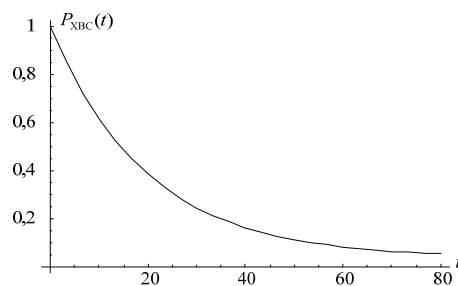
$$p_{\text{ХВС}}(t) = (0,049 \cdot e^{-0,051t} + 0,00198) / 0,051 = 0,96 \cdot e^{-0,051t} + 0,039. \quad (8)$$

Для отопления функция надежности принимает вид (рис. 5):

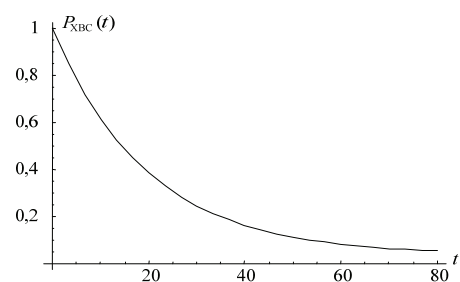
$$p_{\text{Отопление}}(t) = \frac{0,0288 \cdot e^{-0,03t} + 0,0016}{0,03} = 0,96 \cdot e^{-0,03t} + 0,053. \quad (9)$$

Для канализации функция надежности выглядит таким образом (рис. 6):

$$p_{\text{Канализация}}(t) = \frac{0,004 \cdot e^{-0,0041t} + 0,00019}{0,0041} = 0,97 \cdot e^{-0,0041t} + 0,046. \quad (10)$$



Ябк. 3. График функции надежности для ГВС



Ябк. 4. График функции надежности для ХВС

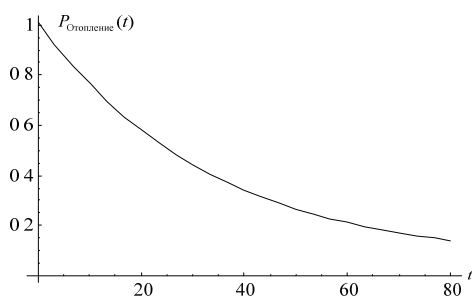


Рис. 5. График функции надежности для отопления

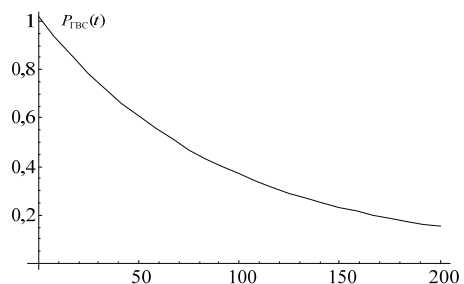


Рис. 6. График функции надежности для канализации

Таким образом, надежность всей системы  $S$  принимает вид (рис. 7):

$$P(t) = (0,97 \cdot e^{-0,064t} + 0,03)(0,96 \cdot e^{-0,051t} + 0,039) \times \\ \times (0,96 \cdot e^{-0,03t} + 0,05)(0,97 \cdot e^{-0,0041t} + 0,046). \quad (11)$$

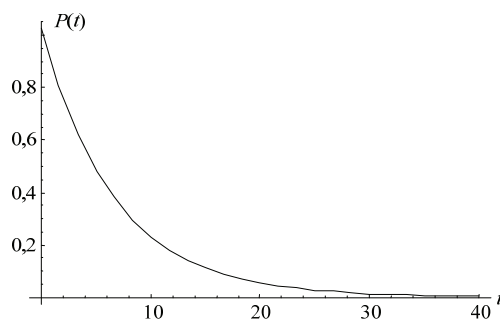


Рис. 7. График функции надежности системы инженерного оборудования

График функции надежности показывает, что через тридцать лет эксплуатации инфраструктура водопотребления и водоотведения системы инженерных коммуникаций должна практически разрушиться. Надежность системы можно повысить путем оказания воздействий на интенсивности потоков  $\lambda$  и  $\mu$ . А что из себя представляет интенсивность ремонта  $\mu$ ?  $\mu$  – это эффективность работы обслуживающего персонала. Каким образом она изменяется [4, 5]? Повышением количества обслуживающего персонала, но у этого повышения существует ограничение, этим ограничением являются средние затраты  $M(n)$ . Вообще говоря, интенсивность отказов связана с износом инженерного оборудования исследуемой системы, и мы можем полагать, что  $\lambda$  изменяется во времени. А эмпирически определенное в данный момент времени  $\lambda = \text{const}$  непригодно для прогнозирования состояния системы.

Приведем статистические данные по отказам на тепло- и водопроводах за период эксплуатации с 2006 по 2008 год.

Значения параметра потока отказов  $\omega$  в зависимости от года постройки водопровода холодного водоснабжения: 1928–1960,  $\omega_{\text{ср}} = 0,051$ ; 1961–1980,  $\omega_{\text{ср}} = 0,01427$ ; 1981–1990,  $\omega_{\text{ср}} = 0,01329$  (табл. 1).

$$\text{Ежегодное увеличение } \omega = \frac{0,051 - 0,01329}{57 - 16} = 0,00092.$$

Таким образом, интенсивность отказов  $\lambda(t)$  имеет линейный закон распределения  $\lambda(t) = at + b$ , ввиду того, что в начальный момент времени  $t = 0$  интенсивность отказов нулевая  $\lambda(0) = 0$ , то параметр  $b$  можно положить равным 0.

#### Таблица 1. Значения параметра потока отказов системы ХВС

Годы постройки	Длина, км	Период наблюдений			Среднеарифметическое значение $\omega$ , 1/(год.км)
		2006 г.	2007 г.	2008 г.	
1928–1940	0,716	0,05310	0,03960	0,02070	0,03780
1941–1960	5,830	0,02610	0,09000	0,07650	0,06420
1961–1970	34,138	0,02250	0,01395	0,01800	0,01815
1971–1980	5,475	0,00522	0,01557	0,01035	0,01038
1981–1990	22,136	0,01710	0,00567	0,01710	0,01329

Следовательно, закон распределения интенсивности отказов ХВС принимает вид (рис. 8):  $\lambda_{\text{ХВС}}(t) = 0,00092t$ . (12)

Значения параметра потока отказов  $\omega$  в зависимости от года постройки водопровода горячего водоснабжения: 1928–1960,  $\omega_{\text{ср}} = 0,11333$ ; 1961–1980,  $\omega_{\text{ср}} = 0,0915$ ; 1981–1990,  $\omega_{\text{ср}} = 0,02953$  (табл. 2).

#### Таблица 2. Значения параметра потока отказов системы ГВС

Годы постройки	Длина, км	Период наблюдений			Среднеарифметическое значение $\omega$ , 1/(год.км)
		2006 г.	2007 г.	2008 г.	
1928–1940	0,158	0,1180	0,0880	0,046	0,084000000
1941–1960	1,850	0,0580	0,2000	0,170	0,142666667
1961–1970	29,023	0,0500	0,0310	0,040	0,040333333
1971–1980	6,820	0,0116	0,0346	0,023	0,023066667
1981–1990	30,111	0,0380	0,0126	0,038	0,029533333

$$\text{Ежегодное увеличение } \omega = \frac{0,11333 - 0,02953}{57 - 16} = 0,00204.$$

Закон распределения интенсивности отказов ГВС принимает вид (рис. 9):

$$\lambda_{\text{ГВС}}(t) = 0,00204t. \quad (13)$$

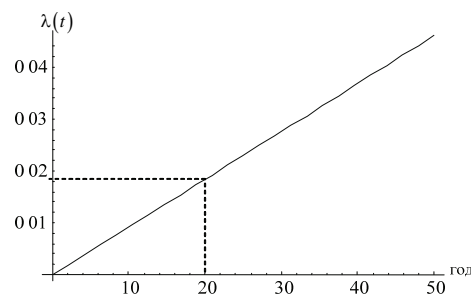


Табл. 8. График интенсивности отказов  $\lambda(t)$  для ХВС

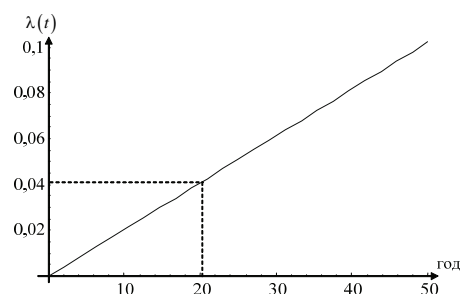


Табл. 9. График интенсивности отказов  $\lambda(t)$  для ГВС

Значения параметра потока отказов  $\omega$  в зависимости от года постройки трубопровода отопления: 1928–1960,  $\omega_{\text{cp}} = 0,068$ ; 1961–1980,  $\omega_{\text{cp}} = 0,0549$ ; 1981–1990,  $\omega_{\text{cp}} = 0,01772$  (табл. 3).

Табл. 3. Значения параметра потока отказов системы отопления

Годы постройки	Длина, км	Период наблюдений			Среднеарифметическое значение $\omega$ , 1/(год.км)
		2006 г.	2007 г.	2008 г.	
1928–1940	1,408	0,07080	0,05280	0,0276	0,05040
1941–1960	8,877	0,03480	0,12000	0,1020	0,08560
1961–1970	60,849	0,03000	0,01860	0,0240	0,02420
1971–1980	8,090	0,00696	0,02076	0,0138	0,01384
1981–1990	35,718	0,02280	0,00756	0,0228	0,01772

Ежегодное увеличение  $\omega = (0,068 - 0,01772)/(57 - 16) = 0,00123$ .

Закон распределения интенсивности отказов для отопления (рис. 10) принимает вид:  $\lambda_{\text{отоп}}(t) = 0,00123t$ . (14)

Таким образом, интенсивности отказов всех видов инженерного оборудования в зависимости от износа различны (рис. 11).

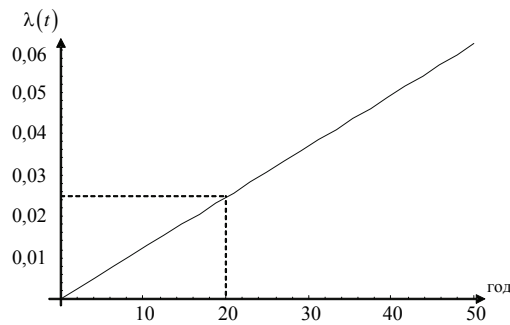


Рис. 10. График интенсивности отказов  $\lambda(t)$  для отопления

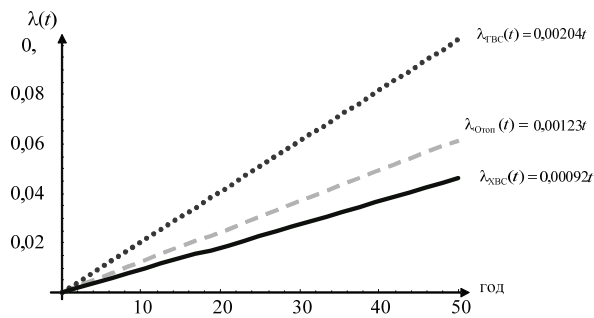


Рис. 11. Графики интенсивности  $\lambda(t)$  для разных видов инженерного оборудования

Для достоверности выведенных формул (12), (13) и (14) проведем проверку, как относятся друг к другу  $\lambda^i = \text{const}$  и  $\lambda^i(t)$ . Основываясь на исследовании потока

отказов и принимая гипотезу о пуассоновском законе распределения, было рассчитано  $\lambda_{\text{ГВС}} = 0,062$ , расчет производился в 2007 г. Средний год службы различных видов инженерных коммуникаций одного из исследуемых объектов до 2004 г. был 31 год, следовательно, по формуле (13)  $\lambda_{\text{ГВС}}(31) = 0,00204 \cdot 31 = 0,063$ . Аналогичным образом рассчитаем  $\lambda^i = \text{const}$  и  $\lambda^i(t)$  для других видов инженерного оборудования (табл. 4).

Таблица 4. Значения параметра потока отказов инженерного оборудования

Вид инженерного оборудования	$\lambda = \text{const}$	$\lambda(t)$	$ \lambda(t) - \lambda $
ГВС	0,062	0,063	0,001
ХВС	0,049	0,026	0,023
Отопление	0,028	0,038	0,010
Среднее отклонение			0,011

Наибольшее отклонение наблюдается на инженерном оборудовании холодного водоснабжения. Это можно объяснить тем, что, возможно, исследования интенсивности потока отказов по критерию Пирсона проводили в период испытаний водопроводов ХВС, а в этот период отказы естественно увеличиваются, но в среднем по году они, конечно же, меньше.

Рассмотрим модель с учетом износа инженерного оборудования. По аналогии с предыдущей математической моделью составим уравнения для средних численностей состояний:

$$\left. \begin{aligned} dm_1^i(t)/dt &= -\lambda^i(t) \cdot m_1^i(t) + \mu \cdot m_2^i(t) \\ dm_2^i(t)/dt &= -\mu \cdot m_2^i(t) + \lambda^i(t) \cdot m_1^i(t) \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

$$\lambda^i(t) = a^i \cdot t, \quad (16)$$

где  $a^i$  – см. (12), (13) и (14);  $i = 1, \dots, M$ ;  $M$  – количество видов инженерного оборудования.

$$\text{Условие нормирования: } m_1^i(t) + m_2^i(t) = N^i. \quad (17)$$

$$\text{Начальные условия имеют вид: } m_1^i(0) = N^i, m_2^i(0) = 0. \quad (18)$$

$$\text{Подставим (15) в (16): } \left. \begin{aligned} dm_1^i/dt &= -a^i t \cdot m_1^i + \mu \cdot m_2^i \\ dm_2^i/dt &= -\mu \cdot m_2^i + a^i t \cdot m_1^i \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Учитывая условия нормирования (17) и (18), решаем системы (19):

$$m_1^i(t) = N \left( e^{-\mu t - \frac{a^i t^2}{2}} + \sqrt{\frac{\pi}{2a^i}} e^{-\frac{\mu^2}{2a^i} - \mu t - \frac{a^i t^2}{2}} \left( \text{Erfi} \left[ \frac{\mu + a^i t}{\sqrt{2a^i}} \right] - \text{Erfi} \left[ \frac{\mu}{\sqrt{2a^i}} \right] \right) \right). \quad (20)$$

$$\text{Пренебрегая частью выражения (20) } \sqrt{\frac{\pi}{2a^i}} e^{-\frac{\mu^2}{2a^i} - \mu t - \frac{a^i t^2}{2}} \left( \text{Erfi} \left[ \frac{\mu + a^i t}{\sqrt{2a^i}} \right] - \text{Erfi} \left[ \frac{\mu}{\sqrt{2a^i}} \right] \right),$$

получим функцию надежности  $i$ -го вида инженерного оборудования:

$$p_1^i(t) = \exp(-\mu^i t - a^i t^2/2). \quad (21)$$

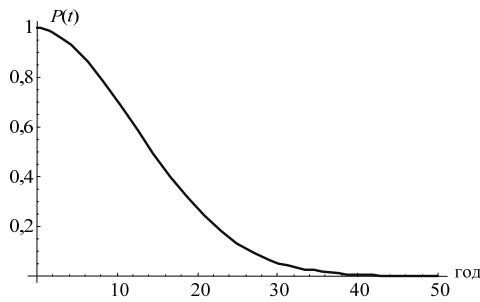
Функция надежности системы инженерного оборудования имеет вид:

$$P(t) = \exp\left(-t \sum_{i=1}^M \mu^i - \frac{1}{2} t^2 \sum_{i=1}^M a^i\right). \quad (22)$$

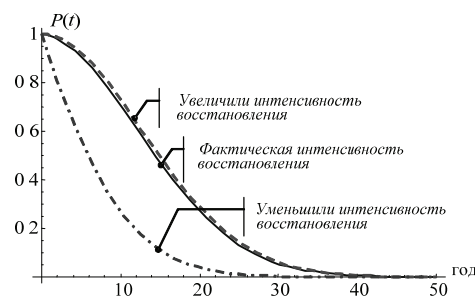
Подставляя найденные функции распределения интенсивностей отказов в (22), получим функцию распределения надежности исследуемой системы инженерного оборудования:

$$P(t) = \exp\left(-0,00194t - \frac{0,00204t^2}{2}\right) \exp\left(-0,00198t - \frac{0,00092t^2}{2}\right) \times \\ \times \exp\left(-0,0016t - \frac{0,0012t^2}{2}\right) = \exp(-0,0035t - 0,0062t^2). \quad (23)$$

Зная функцию надежности системы, можно прогнозировать и исследовать управляющие воздействия на изучаемую систему. Например, некоторое управляющее лицо задается целью увеличить надежность системы (т. е. добиться такого результата, чтобы через 20 лет надежность системы была не 0,3, как видно из рис. 12, например, 0,6. Проанализируем влияние интенсивности ремонта  $\mu$  на надежность системы, ведь было бы логичным рассуждать, что, увеличивая интенсивность работ по восстановлению, увеличится и надежность (рис. 13).



Льк. 12. График функции  $P(t)$  инженерного оборудования



Льк. 13. График  $P(t)$  в зависимости от интенсивности восстановления инженерного оборудования

Таким образом, мы видим, что, увеличивая интенсивность восстановления, надежность возрастает на слишком малую величину, тогда как небольшое уменьшение интенсивности восстановления приводит к резкому снижению надежности.

Отсюда можно сделать вывод, что восстановление ведется, если можно так выразиться, в оптимальном режиме, и качественное влияние на надежность имеет только интенсивность отказов, которая, в свою очередь, зависит от износа, а он, соответственно, зависит от года постройки и последнего капитального ремонта объектов исследуемой системы предприятия. Так, на рис. 14 видно, что при незначительном уменьшении интенсивности отказов мы практически добиваемся поставленной задачи о достижения надежности значения 0,6 по прошествии 20 лет.



Но, к сожалению, на уменьшение интенсивности отказов (или на уменьшение износа) значительно влияет недофинансирование, которое происходит не только в настоящие дни, но уже происходило несколько десятилетий ранее.

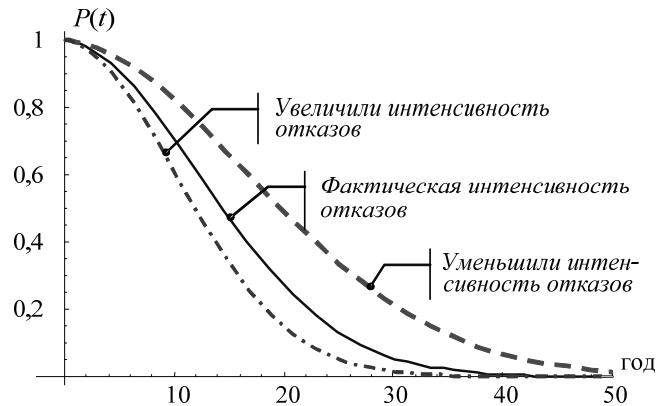


Рис. 14. График  $P(t)$  в зависимости от интенсивности отказов инженерного оборудования

Таким образом, ввиду того, что на объектах нет возможности производить капитальный ремонт всего нуждающегося в нем инженерного оборудования, следует в каждый текущий момент решать одну из важнейших задач — это оптимальное распределение средств на капитальный ремонт.

#### Список литературы

1. Ефремов < .?, ИшгбгЗ Н. Ф., Кфзgh < . . Математические модели расчета надежности инженерных коммуникаций и оборудования при многоуровневой модели управления крупным предприятием // Аудит и финансовый анализ. — 2006. — № 4. — С. 189–220.
2. Дзбq□ < . : Системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка. — Ростов н/Д : Изд-во Рост. ун-та, 1977. — 256 с.
3. Фд□□ G. F. Дифференциальные уравнения : учеб. пособие для вузов. — М. : Просвещение, 1988. — 254 с.
4. БдheZ□ < . ; . Повышение эффективности управления системами теплоснабжения (на примере Москвы). — М. : Стройиздат, 1990. — 112 с.
5. К\_fzgh□ < ., Ефбg < ?. Применение многокритериальной теории полезности для построения целевой функции управления долгосрочным развитием компании // Вестн. Моск. акад. рынка труда и информ. технологий. — 2006. — № 2. — С. 12–19.

\*\*\*

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

#### Research of the Engineering Complex of Water Supply for Information-Telecommunication System by Means of the Method of Dynamics of Averages

The mathematical model of an engineering complex of water supply for the automated information-telecommunication system, based on a method of dynamics of averages is considered. On the basis of the given model the mathematical model which considers deterioration of the engineering equipment of a water supply complex is constructed.

**Keywords:** information and telecommunication system, telemetry, water supply network

Получено: 30.03.11