

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического
мониторинга

Б.В. Крупеников

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНО- СТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Методические указания к практическим занятиям по
дисциплине «Надёжность технических систем и техно-
генный риск»**

Для студентов специальности
**280101 «Безопасность жизнедеятельности
в техносфере»**
и направления подготовки бакалавров
280700 «Техносферная безопасность»

2012

Введение

Развитие современного производства характеризуется непрерывным увеличением удельного веса автоматизированных предприятий, представляющих собой единую техническую систему, состоящую из совокупности управляющих и управляемых объектов, что обусловило повышенное внимание к проблеме сохранения надёжности функционирования сложных производственных систем.

Причины интереса к проблеме надёжности заключаются, прежде всего, в том, что от бесперебойного функционирования технических систем в течение определённого времени зависит сохранение огромных материальных ценностей, воплощённых в средствах и предметах труда, а в некоторых случаях и непосредственно жизнь персонала. Например, нарушение правильности протекания технологических процессов в ряде современных химических предприятий из-за ненадёжности управляющих устройств может привести к образованию повышенных давлений, агрессивных сред, резкому повышению температуры и иным опасным явлениям, способным вызвать аварию. Кроме того, создание автоматизированных производственных систем может оказаться экономически не выгодным, если не будет обеспечена достаточная надёжность управляющих устройств. Проблема надёжности не менее актуальна и для неавтоматизированных производственных систем, ибо любое нарушение их функционирования приводит к срыву выполнения плановых заданий, к неритмичности их работы, нерациональному использованию ресурсов и материалов т.п., т.е. к снижению их эффективности.

Таким образом, проблема надёжности функционирования производственных систем является необходимым условием для решения основных задач, предъявляемых к ним, обеспечения их экономической эффективности и безопасности.

Решение этой проблемы требует систематизации, расширения и углубления знаний в области исследований физических и химических явлений, приводящих к отказам элементов, блоков и узлов технических устройств, в области проектирования изде-

лий, методом организации их проектирования и изготовление, транспортирование и эксплуатации.

Науке о надёжности требуются методы количественных измерений надёжности, необходимо решить вопрос о количественных показателях безотказности, сохраняемости, долговечности и ремонтпригодности.

Длительность безотказного состояния, ремонта до предельного состояния являются случайными величинами. Этот факт, объясняемый физической природой явлений, приводящих к выходу изделий из перечисленных состояний, обусловил применение вероятностных методов для оценки показателей надёжности.

Рассматриваемой случайной величиной является длительность соответствующего состояния, количественную характеристику которого необходимо получить. Например, для количественной характеристики безопасной эксплуатации необходимо рассмотреть длительность работы изделия до первого отказа. Количественными характеристиками безотказности будут интегральная и дифференциальная функции распределения длительности работы изделия до первого отказа, её среднее значение и среднеквадратичное отклонение. Также возможны другие как функциональные, так и числовые характеристики.

Целью проведения данной практической работы является приобретение навыков определения количественных показателей надёжности технологических систем.

1 Основная часть

1.1 Вероятность безотказной работы

Вероятность безотказной (исправной) работы $P(t)$ - это вероятность того, что в заданном интервале времени и при заданных условиях эксплуатации не произойдёт отказа, т.е. не будет нарушена работоспособность производственной системы.

Если обозначить через t время, в течение которого необходимо определить вероятность безотказной работы производст-

венной системы, а через T время непрерывной исправной работы от начала её работы справедливо следующее выражение:

$$P(t) = P(T > t) \quad (1)$$

Из определения вероятности безотказной работы видно, что этот параметр является функцией времени.

Функция вероятности безотказной работы наиболее полно определяет надёжность производственных систем и отдельных элементов, используемых в них. Она обладает следующими очевидными свойствами:

1. $0 < P(t) < 1$;
2. $P(0) = 1$; $P(\infty) = 0$;
3. $P(t)$ — убывающая функция времени.

Типичное изменение вероятности безотказной работы с течением времени показано на рис. 1.

Вероятность безотказной работы определяется из уравнения:

$$P(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0}, \quad (2)$$

где N_0 — число образцов производственной системы (элемента) в начале испытаний (эксплуатации);

n_i , - число вышедших из строя образцов в интервале времени t_i ;

t - время, для которого определяется вероятность безотказной работы;

Δt - принятая продолжительность интервала времени.

На практике для определения $P(t)$ из статистических данных об отказах производственных систем можно пользоваться следующей статистической оценкой:

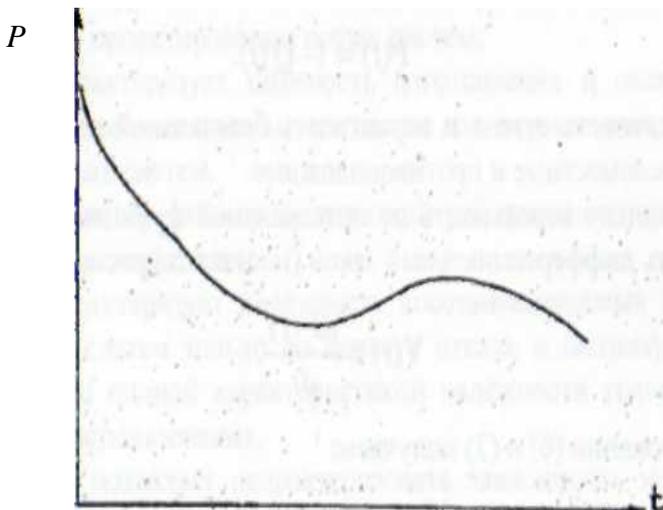


Рис. 1 - Типичная зависимость вероятности безотказной работы системы от времени

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (3)$$

где $n(t)$ - число образцов, отказавших за время t :

$$n(t) = \sum n_i \quad (4)$$

Надёжность производственных систем иногда можно оценивать и другой более удобной характеристикой, какой является вероятность неисправной работы или вероятность отказа.

Вероятность отказа - это вероятность того, что случайная величина T - время отказа - примет значение меньше некоторого наперёд заданного t , для которого определяется эта вероятность, т.е.

$$Q(t) = p(T < t). \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что вероятность отказа является интегральной функцией распределения времени работы T до отказа, т.е.

$$P(t) = 1 - Q(t). \quad (6)$$

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы - события несовместные и противоположные.

Поскольку вероятность от интегральной функции распределения есть дифференциальный закон (плотность) распределения:

$$Y(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \quad (7)$$

то на основании (6) и (7) получаем:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = Q(t) = y(t), \quad (8)$$

т.е. производная от вероятности отказа есть дифференциальный закон распределения времени работы T производственной системы до её отказа.

Для статистического определения вероятности отказа пользуются следующей формулой:

$$Q(t) = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{N_0} = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (9)$$

На практике очень часто вероятность безотказной работы $P(t)$ называют надёжностью работы производственной системы (элемента) в заданном интервале времени, при этом её обозначают $R(t)$, а вероятность отказа $Q(t)$ называют ненадёжностью системы (элемента).

Вероятность безопасной работы $P(t)$ как количественная характеристика надёжности обладает следующими достоинствами:

- 1) характеризует изменение надёжности во времени;

2) даёт возможность достаточно наглядно судить о надёжности производственных систем (их элементов);

3) может быть использована для расчёта надёжности сложных производственных систем до их осуществления, что очень важно при проектировании новых систем;

4) характеризует стоимость изготовления и эксплуатации производственных систем, что важно для оптимизации надёжности сложных систем.

Однако вероятность безотказной работы имеет также и существенные недостатки:

1) характеризует надёжность восстанавливаемых производственных систем только до первого отказа, и поэтому является достаточно полной характеристикой надёжности только систем разового использования;

2) не позволяет охарактеризовать зависимость между временными составляющими цикла эксплуатации. Это не даёт возможности установить, даже в вероятностном смысле, будет ли система готова к действию в данный момент;

3) не всегда удобна для оценки надёжности простых элементов, в особенности таких, у которых отсутствует старение;

4) по известной вероятности безотказной работы довольно трудно вычислить другие количественные характеристики надёжности.

Из-за этих недостатков вероятности безотказной работы довольно трудно вычислить другие количественные характеристики надёжности, что необходимо иметь в виду. Поэтому для полной характеристики надёжности производственных систем наряду с вероятностью безотказной работы нужны и другие количественные характеристики.

Задача 1

В процессе эксплуатации электронной аппаратуры учитывалось число выходящих из строя ламп в течение каждой тысячи часов их работы. При этом наблюдение велось за 1000 однотипных ламп ($N_0 = 1000$). В результате подсчёта отказавших ламп полу-

чены данные, сведённые в табл. 1.

Таблица 1

Количество отказов ламп в i -м интервале времени

№ варианта	Интервал времени Δt , ч.	Число отказов n_i	№ варианта	Интервал времени Δt , ч	Число отказов n_i
1	0-1000	20	8	7000-8000	40
2	1000-2000	25	9	8000-9000	50
3	2000-3000	35	10	9000-10000	30
4	3000-4000	50	11	10000-11000	40
5	4000-5000	30	12	11000-12000	40
6	5000-6000	50	13	12000-13000	50
7	6000-7000	40	14	13000-14000	40

Задача

По данным табл. 1, пользуясь формулой (3), определить вероятность безотказной работы ламп в течение заданного времени.

Например: $P(t = 3000) = \dots P(t = 5000) = \dots$

Определив таким образом $P(t)$ для всего диапазона времени (полученные данные по всем вариантам), построить зависимость вероятностей безотказной работы ламп в аппаратуре от времени их работы (рис. 1). Сделать необходимые выводы.

Задача 2

Определить вероятность отказа ламп в электронной аппаратуре за заданное количество часов работы, воспользовавшись формулой (9).

Например: $Q(3000) = \dots Q(5000) = \dots$

1.2 Среднее время безотказной работы

Средним временем безотказной работы называется математическое ожидание времени безотказной работы.

Среднее время безотказной работы обозначается символом T .

Как всякое математическое ожидание случайной величины среднее время безотказной работы определяется зависимостью:

$$T = \int ty(t)dt = \int tQ(t)dt \quad (10)$$

Подставив в выражение (10) вместо $Q(t)$ в производную от вероятности безотказной работы с обратным знаком и выполнив интегрирование по частям, получим:

$$T = \int tQ(t)dt = -\int tp(t)dt = -tp(t) + \int p(t)dt.$$

Время, как случайная величина не может быть отрицательным:

$$T = -tp(t) + \int p(t)dt. \quad (11)$$

Поскольку $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, то первое слагаемое в выражении (11) равно нулю. Следовательно,

$$T = \int p(t)dt. \quad (12)$$

Выражение (12) устанавливает зависимость между средним временем и вероятностью безотказной работы. Из формулы (12) видно, что среднее время безотказной работы есть площадь под кривой вероятности безотказной работы.

Для определения среднего времени безотказной работы из статистических данных пользуются формулой:

$$T = \frac{i-1}{N_0} n_i t_i, \quad (13)$$

где N_0 - число образцов (элементов), над которыми проводится испытание. Чем больше N_0 , тем точнее определяется среднее время безотказной работы; t_i - время безотказной работы i -го образца.

Из выражения (13) видно, что для определения среднего времени безотказной работы необходимо знать моменты отказов всех

образцов производственных систем (элементов), над которыми проводится эксперимент. Поэтому при большом числе образцов N_0 пользоваться указанной формулой неудобно и предпочитают следующую формулу:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{t_k/\Delta t} n_i t_i}{N_0}, \quad (14)$$

где t_k - время в течении которого отказали все N_0 образцов;
 n_i - число образцов, оказавшихся в i -м интервале;
 t_i - среднее время i -го интервала;
 Δt - выбранная величина интервала времени.

$$t_{cpi} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (15)$$

где n - время начала i -го интервала;
 t_i - время конца i -го интервала.

Среднее время безотказной работы является одной из наиболее наглядных количественных характеристик надёжности. Как математическое ожидание случайной величины, она не может полностью характеризовать время работы производственных систем. Необходимо еще знать дисперсию времени их отказов. Среднее время безотказной работы характеризуется надёжностью производственных систем (элементов) до первого отказа, т.е. оно характеризует надёжность систем (элементов) разового использования.

Задача 3

Определить среднее время безотказной работы ламп электронного устройства по данным табл. 1.

Для определения T воспользоваться формулой (14).

2.3 Среднее время между соседними отказами

Наработкой на отказ называется среднее время (образца) между двумя соседними отказами.

Эта характеристика надёжности обозначается t_{cp} . Определяется по данным об отказах лишь одного образца производственной системы (элемента). Если испытания проводится не с одним, а с несколькими образцами, то среднее время двумя соседними отказами следует определить из выражения:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^M t_{cpi}}{M} \quad (16)$$

где t_{cpi} - среднее время исправной работы между двумя соседними отказами i -го образца производственной системы (элемента), вычисленное по формуле (15); M - число испытываемых образцов.

В отличие от среднего времени безотказной работы, наработка на отказ характеризует надёжность производственных систем длительного использования, работающих в режиме смены отказавших элементов.

Задача 4

Определить среднее время между соседними отказами технического устройства, если в результате испытаний M его образцов была зафиксирована n неисправностей. При этом каждый из испытываемых образцов успешно работал в течение t часов.

Воспользоваться формулой (16) и исходными данными табл. 2.

Исходные данные для работы к задаче 4

Вариант	Количество испытываемых образцов, M	Количество зафиксированных неисправностей, n	Время безотказной (исправной) работы образца, t (ч)
1	36	231	19
2	34	240	21
3	32	232	20
4	33	232	22
5	35	234	21
6	34	229	23
7	37	236	20
8	38	237	24
9	36	235	18
10	34	228	21
11	33	230	19
12	37	231	22
13	35	232	17
14	36	235	21
15	34	237	23
16	32	227	20
17	34	230	18
18	32	226	17
19	33	228	21
20	34	229	22

1.4 Частота отказов

Под частотой отказов понимается плотность вероятности времени работы производственной системы до первого отказа. Статистически вид определяется как отношение числа отказавших систем в единицу времени к первоначальному числу испытываемых систем при условии, что все вышедшие из строя системы не восполняются, т.е. число испытываемых систем во время испытания уменьшается.

Если обозначить частоту отказов символом $Q(t)$, то согласно определению:

$$a(t) = \frac{n(t)}{N_0 \Delta t}, \quad (17)$$

где $n(t)$ — число отказавших систем (элементов) в интервале времени; Δt - интервал времени.

Между частотой отказов и вероятностью безотказной работы к моменту времени t , равно:

$$n(t) = N_0 P(t). \quad (18)$$

Число образцов, которые будут исправно работать к моменту $t+\Delta t$, равно $N(t+\Delta t) = N_0 P(t+\Delta t)$. Следовательно, число отказавших образцов определится как разность:

$$n(t) = N(t) - N(t+\Delta t) = N_0 [P(t+\Delta t)]. \quad (19)$$

Подставим выражение (19) в (17), получим:

$$a(t) = \frac{N_0 (p(t) - p(t + \Delta t))}{N_0 \Delta t} \quad (20)$$

Устремив Δt к нулю и переходя к пределу, получим:

$$a(t) = -P(t) = Q(t).$$

Таким образом, функция частоты отказов $a(t)$ есть производная от функции вероятности безотказной работы $P(t)$, взятая с обратным знаком. Она характеризует скорость снижения вероятности безотказной работы во времени.

Выполнив интегрирование выражения (20) от 0 до t , получим:

$$a(t) = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t + \Delta t) - p(t)}{N_0 \Delta t} = -P(t), \quad (21)$$

$$Q(t) = \int a(t) dt, \quad (22)$$

или

$$P(t) = 1 - \int a(t) dt. \quad (23)$$

Типичная кривая изменения частоты отказов производственных систем во времени показана на рис. 2.

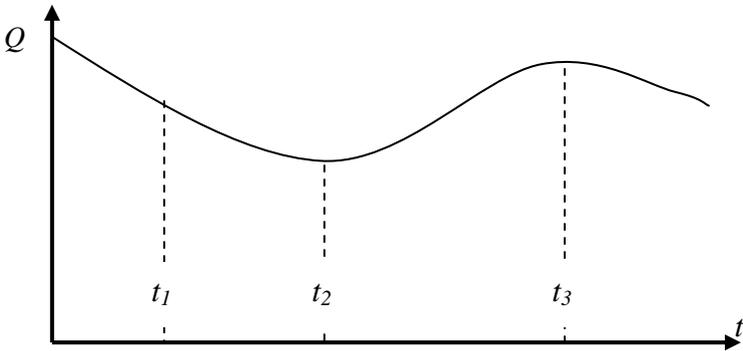


Рис. 2 - Типичная зависимость частоты отказов производственной системы от времени

На этой кривой можно выделить три характерных участка. За время от 0 до t_2 частота отказов сначала возрастает, а затем резко снижается. Это объясняется тем, что в начальный период эксплуатации число отказов обычно повышено за счёт элементов, имевших конструктивные дефекты. Этот период обычно называется периодом приработки элементов. На участке времени от t_1 до t_2 частота отказов уменьшается незначительно. Этот участок характеризует нормальную работу элементов. Рост кривой отказов на участке времени от t_2 до t_3 объясняется износом элементов. Падение кривой частоты отказов после t_3 объясняется не увеличением надёжности

элементов, вследствие чего число отказавших элементов будет небольшим.

Достоинством частоты отказов как количественной характеристики надёжности является, во-первых, возможность судить по её величине о числе элементов, которые могут выйти из строя на каком-то промежутке времени. Во-вторых, частота отказов позволяет довольно просто вычислить количество отказавших образцов производственной системы в промежутке времени Δt и тем самым определить необходимое количество запасных элементов, что весьма важно для обеспечения нормальной эксплуатации производственных систем.

Действительно, необходимое количество запасных элементов должно удовлетворять условию:

$$n_3 > n(t) = a(t)N_0\Delta t. \quad (24)$$

Например, если известно, что $a(t) = 0,2 \cdot 10^{-4}$, а в системе работает 1000 элементов, то за 1000 часов работы из строя может выйти $n = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot 1000 = 20$ элементов.

Однако по величине частоты отказов нельзя судить о надёжности тех или иных элементов. На первый взгляд кажется, что чем меньше частота отказов, тем надёжность элементов выше. Например, уменьшение частоты отказов за пределами точки t_3 на рис. 2 обусловлено лишь уменьшением общего количества исправно работающих элементов, а не увеличением их надёжности. Поэтому частоту отказов можно использовать лишь для оценки надёжности производственных систем разового использования.

Задача 5

Определить зависимость частоты отказов от времени для ламп, установленных в электронном справочнике, по данным табл. 1.

Воспользоваться формулой (17).

Например: $a = (500) = \dots$

$A = (1500) = \dots$

Определив таким образом $a(t)$ для всего диапазона времени, построить зависимость частоты отказов производственной системы от времени. Воспользоваться рис. 2.

Сделать необходимые выводы.

В данном методическом указании рассмотрена лишь часть показателей надёжности технических систем.

Контрольные вопросы

1. Цель работы
2. Вероятность безотказной работы
3. Достоинства и недостатки вероятности безотказной работы как количественной характеристики надёжности.
4. Среднее время безотказной работы; достоинства и недостатки.
5. Нарботка на отказ; достоинства и недостатки.
6. Частота отказов; достоинства и недостатки.

Литература

1. Корчагин А.Б., Сердюк В.С., Бокарев А.И. Надёжность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие в 2-х частях. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. - Ч. 1 : Основы теории. – 228 с. Ч. 2 : Практикум. – 140 с.
2. Безопасность жизнедеятельности: Учебник для вузов/ Под ред. С.В. Белова. – 8-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008. – 616 с.
3. Гладун И. В. Управление охраной окружающей среды и рациональным природопользованием. - Хабаровск, 2011. – 676 с.
4. Малкин В.С. Надёжность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 432, [1] сГнеденко Б.В., Беляев В.К. Математические методы в теории надёжности. - М.: Наука, 1965. — 524 с.
5. Окорочков В.Р. Надёжность производственных систем. - Л.: Изд-воЛГУ, 1972.- 167 с.
6. Мартынов Г.К., Фомин В.Н. Показатели надёжности технических устройств. - М., 1969. - 84с.
7. Зотова Л.В. Критерий эффективной долговременности и надёжности техники. - М.: Экономика, 1973. - 103 с.
8. Барлоу Р., Прощан Ф. Математическая теория надёжности. - М.: Сов. радио, 1969. - 488 с.

9. Алымов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск: Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов. - М.: Академкнига, 2007. -118с.

10.Половко А.М., Гуров СВ. Основы теории надёжности : практикум. - СПб.: БХВ-Петербург, 2006. - 506 с.