МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Автомобили»

НАДЕЖНОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Практикум
для направления специальности
1-37 01 02-02 «Автомобилестроение
(электроника)»

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области транспорта и транспортной деятельности

Минск
БНТУ
2018

УДК 629.33.02-027.4:004.9 (075.8)
ББК 39.33.04я7
Н19

С о с т а в и т е л ь *Г.А. Дыко*

Р е ц е н з е н т ы :
кафедра «Тракторы и автомобили» УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»;
ведущий научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси,
кандидат технических наук *Выгонный А.Г.*

Н19 **Надежность** автомобильных электронных систем : практикум для направления специальности 1-37 01 02-02 «Автомобилестроение (электроника)» / сост. Г.А. Дыко. – Минск : БНТУ, 2018. – 35 с.
ISBN 978-985-550-804-6.

В практикуме приведены основные контрольные вопросы по дисциплине, учебно-методическая литература, задания для практических занятий и методические указания для их выполнения.

Рекомендуется для студентов специальности 1-37 01 02 «Автомобилестроение (по направлениям)», направления 1-37 01 02-02 «Автомобилестроение (электроника)» по дисциплине «Надежность автомобильных электронных систем».

УДК 629.33.02-027.4:004.9 (075.8)
ББК 39.33.04я7

ISBN 978-985-550-804-6

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Надежность автомобильных электронных систем» позволяет студенту освоить необходимые знания по математическим основам теории надежности сложных систем, подходы к вероятностной оценке показателей надежности электронных узлов и устройств, получить практические навыки по расчету вероятности безотказной работы и других показателей надежности систем автомобилей на стадии проектирования.

Данная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентом при изучении ряда дисциплин на младших курсах университета: математики, физики, электротехники и электроники, механики материалов, конструкции автомобилей, проектирования автомобиля.

В результате выполнения заданий на практических занятиях студент углубляет теоретические знания по математическим основам теории надежности технических объектов, видам отказов и неисправностей электронных устройств на разных этапах их эксплуатации, методам прогнозирования надежности электронных узлов автомобиля, подходам к оценке надежности автомобиля в целом как сложной системы; получает практический опыт по определению вероятности безотказной работы и других показателей надежности электронных элементов и систем с применением современных методов и компьютерных программ.

1. ОСНОВНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Числовые статистические характеристики случайных величин.
2. Дискретные случайные величины и их статистические характеристики.
3. Непрерывные случайные величины и их статистические характеристики.
4. Нормальный закон распределения случайных величин.
5. Логарифмически нормальный закон распределения случайных величин.
6. Распределение случайных величин (по закону Вейбулла).
7. Экспоненциальный и равномерный законы распределения случайных величин.
8. Определение надежности технического объекта и ее свойств.
9. Свойство безотказности технического объекта и его показатели.
10. Свойство долговечности технического объекта и его показатели.
11. Свойство ремонтопригодности технического объекта и его показатели.
12. Свойство сохраняемости технического объекта и его показатели.
13. Комплексные показатели надежности технического объекта.
14. Способы прогнозирования надежности технических объектов.
15. Виды прогнозирования надежности технических объектов.
16. Классификация неисправностей и отказов электронных систем.
17. Методы построения математических моделей надежности.

18. Технико-экономические показатели отказов и предельного состояния автомобильных электронных систем и автомобиля в целом.

19. Модели надежности электронных систем и их элементов.

20. Вероятность безотказной работы электронных систем.

21. Обеспечение надежности электронных систем автомобилей.

22. Схемы надежности электронных систем и их элементов.

23. Критерии оценки надежности программного обеспечения бортовых компьютеров и блоков управления.

24. Характеристики программного обеспечения и его испытания.

25. Ошибки программного обеспечения.

26. Показатели надежности программного обеспечения бортовых компьютеров и блоков управления.

27. Модели независимых ресурсов элементов и «слабейшего» звена как модели прогнозирования надежности системы.

28. Модели зависимых ресурсов элементов как модели прогнозирования надежности системы:

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

2.1. Основная литература

1. Капур, К., Ламберсон, Л. Надежность и проектирование систем. – Москва : Мир, 1980. – 608 с.

2. ГОСТ 27.301–83. Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 39 с.

3. Диллон, Б., Сингх, Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – Москва : Мир, 1984. – 318 с.

4. Проектирование полноприводных колесных машин : учебник для вузов : в 2 т. / Б.А. Афанасьев, Н.Ф. Бочаров, Л.Ф. Жеглов и др.; под общ. ред. А.А. Полунгяна. – Москва : изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999–2000. – Т. 1, 520 с.; Т. 2, 610 с.

5. Хокс, Б. Автоматизированное проектирование и производство : пер. с англ. – Москва : Мир, 1991. – 320 с.

2.2. Дополнительная литература

1. Золотов, А.А., Титов, М.И. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем. – Москва : Машиностроение,1988. – 216 с.

2. К вопросу об установлении норм на параметры – критерии отбраковки полупроводниковых приборов и интегральных схем / Н.Н. Горюнов, А.П. Галеев, А.П. Мельников и др. // Надежность и контроль качества. – 1988. – № 10. – С. 11–14.

3. Решетов, Д.Н., Иванов, А.С., Фадеев, В.З. Надежность машин / под ред. Д.Н. Решетова. – Москва : Высш. шк., 1988. – 238 с.

4. Стукачев, В.Н., Ксендзов, В.Н. Прогнозирование в проектировании большегрузных самосвалов / под ред. Я.Е. Фаробина. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 152 с.

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Практическое занятие № 1

Законы распределения случайных величин

Задание. Разработать компьютерную программу в соответствии с предложенным вариантом.

Таблица 1

Варианты заданий

№ варианта	Тема (для всех вариантов): Разработать компьютерную программу…
1	построения графика плотности распределения случайной величины (СВ) по нормированному нормальному закону
2	построения графика плотности распределения СВ по равномерному закону на интервале [a, b]. Рассчитать математическое ожидание СВ
3	построения графика интегральной функции распределения СВ по равномерному закону на интервале [a, b]
4	построения графика плотности распределения СВ по экспоненциальному закону. Рассчитать математическое ожидание СВ, дисперсию и коэффициент вариации
5	построения графика плотности распределения СВ по нормальному закону
6	построения графика плотности распределения СВ по логарифмически нормальному закону (десятичный логарифм lg)
7	построения графика интегральной функции распределения СВ по экспоненциальному закону. Рассчитать среднее квадратическое отклонение СВ и дисперсию
8	построения графика плотности распределения СВ по логарифмически нормальному закону (натуральный логарифм ln)
9	построения графика интегральной функции распределения СВ по трехпараметрическому закону Вейбулла

№ варианта	Тема (для всех вариантов): Разработать компьютерную программу…
10	построения графика плотности распределения СВ по трехпараметрическому закону Вейбулла
11	построения графика плотности распределения СВ по двухпараметрическому закону Вейбулла
12	построения графика интегральной функции распределения СВ по двухпараметрическому закону Вейбулла. Рассчитать математическое ожидание
13	генерации СВ по двухпараметрическому закону Вейбулла. Рассчитать коэффициент вариации
14	генерации СВ по трехпараметрическому закону Вейбулла. Рассчитать дисперсию
15	построения графика интегральной функции распределения СВ по равномерному закону на интервале [0, 1]. Рассчитать математическое ожидание СВ
16	построения графика плотности распределения СВ по равномерному закону на интервале [0, 1] и генерации СВ по нормальному закону
17	построения графика интегральной функции распределения СВ по нормальному закону
18	построения графика интегральной функции распределения по логарифмически нормальному закону (натуральный логарифм ln)
19	построения функции надежности детали по двухпараметрическому закону Вейбулла
20	построения функции надежности детали по трехпараметрическому закону Вейбулла
21	построения функции распределения вероятности отказа детали по трехпараметрическому закону Вейбулла
22	генерации случайных чисел по трехпараметрическому закону Вейбулла и расчета коэффициента вариации
23	построения функции распределения вероятности отказа детали по экспоненциальному закону. Рассчитать дисперсию

№ варианта	Тема (для всех вариантов): Разработать компьютерную программу…
24	построения функции распределения вероятности безотказной работы детали по экспоненциальному закону. Рассчитать математическое ожидание
25	генерации случайных чисел по нормальному закону. Рассчитать математическое ожидание

Практическое занятие № 2

Предварительный расчет надежности электронного устройства

Задание. Рассчитать интенсивность отказов однотипных элементов электронного устройства и среднюю интенсивность отказов устройства в целом, найти среднюю вероятность безотказной работы и среднюю вероятность отказов, среднюю наработку устройства на отказ.

Таблица 2

Исходные данные к заданию

№ варианта	Элементы												
	Микросхемы			Конденсаторы			Платы печатные		Разъемы			Пайка	
	n^*	λ_0^*, × 10^{-6}, 1/ч		n	λ_0, × 10^{-6}, 1/ч		n	λ_0, × 10^{-6}, 1/ч	n	λ_0, × 10^{-6}, 1/ч		n	λ_0, × 10^{-6}, 1/ч
		min	max		min	max				min	max		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	40	0,01	2,5	40	0,04	0,7	1	0,1	51	0,03	0,6	720	0,01
2	44	0,02	2,51	44	0,045	0,8	3	0,3	55	0,02	0,9	680	0,02
3	36	0,015	2,49	36	0,049	0,9	2	0,5	60	0,04	0,7	730	0,05
4	46	0,012	2,2	46	0,05	0,6	1	0,7	54	0,01	0,8	704	0,03
5	39	0,018	2,6	39	0,054	0,5	2	0,2	61	0,05	0,5	650	0,06
6	33	0,019	2,63	33	0,058	0,4	3	0,4	67	0,07	0,4	670	0,055

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
7	41	0,03	2,7	41	0,06	0,55	4	0,6	56	0,03	0,75	680	0,075
8	35	0,04	2,74	35	0,063	0,65	1	0,8	58	0,08	0,3	640	0,015
9	38	0,015	2,2	38	0,067	0,75	4	0,15	65	0,04	0,42	724	0,024
10	32	0,034	2,3	32	0,045	0,85	3	0,25	63	0,09	0,62	740	0,033
11	37	0,038	2,6	37	0,053	0,95	2	0,35	67	0,02	0,72	750	0,042
12	42	0,017	2,4	42	0,061	0,88	1	0,45	71	0,06	0,82	760	0,051
13	49	0,021	2,75	49	0,07	0,78	3	0,55	70	0,051	0,92	700	0,061
14	43	0,033	2,77	43	0,074	0,68	2	0,65	49	0,072	0,51	800	0,011
15	45	0,029	2,46	45	0,078	0,58	1	0,75	46	0,063	0,71	600	0,021
16	50	0,011	2,48	50	0,08	0,62	1	0,11	83	0,054	0,81	504	0,031
17	51	0,016	2,8	51	0,042	0,72	4	0,22	51	0,074	0,91	591	0,067
18	48	0,022	2,79	48	0,088	0,82	3	0,33	54	0,069	0,29	686	0,027
19	53	0,013	2,81	53	0,043	0,92	2	0,42	57	0,039	0,39	790	0,067
20	57	0,015	2,59	57	0,085	0,96	1	0,53	63	0,043	0,49	710	0,058
21	54	0,014	2,66	54	0,046	0,86	1	0,66	60	0,04	0,99	804	0,048
22	55	0,01	2,68	55	0,065	0,76	5	0,69	50	0,05	0,73	810	0,037
23	34	0,02	2,2	34	0,061	0,67	2	0,49	69	0,04	0,7	610	0,04
24	37	0,014	2,24	37	0,072	0,59	6	0,4	36	0,03	0,57	704	0,032
25	48	0,011	2,0	32	0,69	0,5	4	0,3	30	0,01	0,5	560	0,028

*Примечания**:
n – количество элементов; λ_0 – интенсивность отказов.

Практическое занятие № 3

Расчет показателей безотказности электронного устройства

Задание 1. Рассчитать вероятность безотказной работы за определенное время, частоту отказов и интенсивность отказов на интервале времени для партии электронных устройств, поставленных на испытания, при условии, что за данный интервал времени отказало известное количество устройств.

Таблица 3

Исходные данные к заданию 1

№ варианта	Количество изделий в партии для испытаний N_0	Продолжительность испытаний t, ч	Интервал времени Δt, ч	Количество отказавших устройств за интервал Δt $n(\Delta t)$
1	2	3	4	5
1	45	5	1,7	5
2	55	6,5	3	4
3	30	4	2,1	3
4	40	7	4	7
5	35	8	5	2
6	51	9,4	6	4
7	63	6,1	2	6
8	68	5	2,5	5
9	34	5	2	2
10	43	8	3	3
11	99	15,5	5	9
12	82	24	8,4	3
13	70	36	10,5	5
14	46	12,8	6	2
15	20	60	10	1
16	15	72,4	5	3
17	10	20	2	2
18	28	37	6	5
19	22	24,4	11,5	1
20	17	19	3,6	2
21	31	18	2,9	3
22	29	33	7,6	3
23	18	28,1	2,2	2
24	24	25	3	4
25	26	12	4,5	2

Задание 2. Рассчитать вероятность безотказной работы в течение определенного времени и среднюю наработку до первого отказа электронного устройства, состоящего из заданного количества элементов при условии, что интенсивность отказов элементов одинакова и известна.

Таблица 4

Исходные данные к заданию 2

№ варианта	Количество элементов устройства N	Интенсивность отказов элементов λ, $\times 10^{-6}$, 1/ч	Продолжительность эксплуатации t, ч
1	2	3	4
1	1890	1,4	100
2	1000	1,2	80
3	4500	1,0	110
4	720	1,35	150
5	125	1,41	300
6	180	1,5	200
7	200	1,25	240
8	550	1,6	1000
9	94	1,23	460
10	60	0,95	330
11	140	0,8	375
12	78	1,31	600
13	210	0,5	700
14	145	0,6	750
15	102	0,3	830
16	39	0,24	95
17	66	0,1	124
18	87	0,67	140
19	48	0,71	250
20	92	1,32	500
21	230	1,53	650
22	156	1,66	380
23	150	0,72	50
24	48	0,91	80
25	88	1,22	170

Задание 3. Определить вероятность безотказной работы, частоту отказов, интенсивность отказов и среднюю наработку до первого отказа для разного времени эксплуатации электронного устройства при условии, что случайное время эксплуатации устройства подчиняется закону распределения Рэлея.

Таблица 5

Исходные данные к заданию 3

№ варианта	Время эксплуатации устройства			Параметр распределения Рэлея
	t_1, ч	t_2, ч	t_3, ч	σ, ч
1	600	750	1000	90
2	550	860	1200	75
3	400	495	610	360
4	760	940	1320	600
5	620	840	1100	550
6	450	650	920	400
7	1000	1160	1850	900
8	2300	2720	3200	1860
9	850	1530	1710	790
10	900	1200	2000	820
11	1200	1900	2200	1000
12	5000	6500	7300	3900
13	7500	9850	17500	6800
14	8000	9700	11400	7600
15	3600	8670	13600	3000
16	4500	7700	10500	4100
17	1250	4350	8250	1000
18	4000	5800	11000	3850
19	5500	6500	11300	4970
20	750	990	1220	680
21	1300	3450	4800	1070
22	2100	4250	6300	1910
23	4800	7700	8800	4200
24	6000	8600	10400	5750
25	850	1050	2900	800

Практическое занятие № 4

Расчет и построение функции надежности элемента электронного устройства

Задание 1. Рассчитать показатели надежности элемента электронного устройства (вероятность безотказной работы, число отказов за определенное время эксплуатации, среднюю наработку до первого отказа для разных значений времени эксплуатации) и построить графики функций: зависимости вероятности безотказной работы от времени и зависимости числа отказов от времени при условии, что наработка элемента до отказа подчинена экспоненциальному закону.

Таблица 6

Исходные данные к заданию 1

№ варианта	Интенсивность отказов элемента $\lambda, \times 10^{-6}$,1/ч	Время эксплуатации элемента		
		t_1, ч	t_2, ч	t_3, ч
1	2	3	4	5
1	1,4	400	520	610
2	1,3	350	510	595
3	1,45	300	480	590
4	1,47	440	520	630
5	1,6	510	660	720
6	1,43	320	480	570
7	1.52	340	470	560
8	1,57	360	490	580
9	1.39	310	525	615
10	1.36	355	530	635
11	1,53	560	710	985
12	1,55	420	490	550
13	1,65	1100	1320	1380
14	1,61	670	730	920
15	1,44	910	1050	1200
16	1,58	300	460	610

Окончание табл. 6

1	2	3	4	5
17	1,51	370	485	551
18	1,38	600	700	900
19	1,42	470	610	870
20	1,66	500	700	900
21	1,63	600	800	1000
22	1,37	550	650	750
23	1,29	730	840	960
24	1,31	1080	1210	1290
25	1,45	320	440	660

Задание 2. Рассчитать среднюю интенсивность отказов и двусторонний доверительный интервал интенсивности отказов для заданного числа испытываемых электронных устройств при условии, что известны: время эксплуатации устройств по плану испытаний, число отказавших устройств за этот период, время эксплуатации до отказа и критерий Пирсона.

Таблица 7

Исходные данные к заданию 2

№ варианта	Число испытываемых устройств n	Время эксплуатации устройств по плану испытаний t_0, ч	Число отказавших устройств d	Время эксплуатации до отказа t_i, ч	Критерий Пирсона $P(\chi^2)$
1	2	3	4	5	6
1	70	500	5	150, 200, 300, 350, 450	0,8
2	90	600	7	140, 180, 270, 310, 400	0,6
3	80	550	9	120, 160, 280, 320, 430	0,7
4	100	400	5	110, 195, 226, 420, 485	0,9
5	105	520	6	170, 310, 430, 490, 570	0,65

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5	6
6	84	610	8	155, 206, 310, 380, 460	0,74
7	75	450	4	144, 189, 275, 315, 440	0,81
8	65	720	10	128, 167, 282, 329, 431	0,69
9	78	670	11	117, 199, 228, 421, 486	0,72
10	92	690	7	160, 210, 330, 390, 470	0,83
11	101	710	12	151, 220, 340, 386, 465	0,88
12	98	530	5	149, 185, 273, 319, 455	0,77
13	73	660	11	127, 161, 283, 325, 438	0,61
14	82	680	9	130, 215, 236, 454, 496	0,67
15	64	740	6	175, 275, 380, 471, 530	0,76
16	55	800	8	163, 245, 311, 363, 490	0,92
17	91	540	6	137, 183, 288, 334, 432	0,97
18	104	830	12	120, 173, 284, 342, 413	0,94
19	69	900	15	128, 187, 239, 446, 497	0,9
20	58	910	14	180, 250, 340, 380, 490	0,8
21	45	925	17	190, 287, 324, 467, 493	0,6
22	61	836	8	146, 237, 339, 399, 540	0,82
23	68	1900	24	470, 650, 940, 1380, 1490	0,8
24	75	895	7	290, 487, 524, 767, 793	0,6
25	81	1825	18	846, 1237, 1339, 1399, 1540	0,82

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Практическое занятие № 1

Законы распределения случайных величин

Статистические характеристики случайной величины (СВ), построенные по экспериментальным данным, часто не позволяют проводить анализ характера изменения СВ. Для этого требуется установить закон ее распределения, выраженный в математической форме и представленный в виде интегральной функции распределения и(или) функции плотности вероятности СВ. Математическое выражение закона распределения СВ можно найти исходя из физической сущности явления и математической модели случайного процесса. В общем виде это довольно сложная задача, но во многих практических случаях закон распределения СВ можно предсказать и выбрать на основе анализа статистических данных, результатов и рекомендаций других исследователей и расчетчиков.

Интегральная функция распределения СВ может быть представлена в виде:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)\mathrm{d}x.$$

В таком виде эта функция является непрерывной. Функция $f(x)$, называемая плотностью распределения СВ, является производной интегральной функции:

$$f(x) = \frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x},$$

при этом $f(x) \geq 0$ и $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\mathrm{d}x = 1.$

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные законы распределения случайных величин.

Равномерный закон. Случайная величина называется равномерно распределенной на интервале [a, b], если ее плотность вероятности на этом интервале постоянна, а вне интервала равна нулю.

Плотность вероятности для данного закона представляется формулой

$f(x) = \dfrac{1}{b-a}$, так как справедливо выражение $\int\limits_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\mathrm{d}x = 1.$

График данной функции показан на рис. 1.

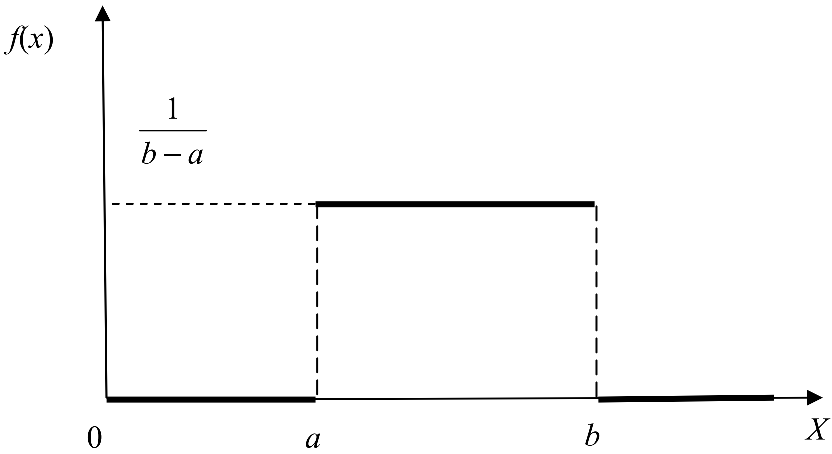

Рис. 1. График плотности вероятности случайной величины по равномерному закону

Математическое ожидание СВ по этому закону записывается

$$M(x) = \int\limits_a^b x \cdot \frac{1}{b-a}\mathrm{d}x = \frac{a+b}{2}.$$

Интегральная функция распределения СВ будет

$$F(x)=\int_a^x f(x)\mathrm{d}x=\int_a^x \frac{\mathrm{d}x}{b-a}=\frac{x-a}{b-a}.$$

Равномерный закон применяется в качестве базового закона для генераторов случайных чисел при компьютерном моделировании случайных величин.

Нормальный закон (закон Гаусса). Этот закон применяется на практике наиболее часто.

Интегральная функция нормального распределения

$$F(x)=\frac{1}{S(x)\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{(x-M(x))^2}{2S^2(x)}\right]\mathrm{d}x,$$

где x – значение случайной величины;

$M(x)$ –математическое ожидание СВ;

$S(x)$ – среднее квадратическое отклонение СВ.

Плотность распределения по нормальному закону

$$f(x)=\frac{1}{S(x)\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(x-M(x))^2}{2S^2(x)}\right].$$

Плотность распределения имеет колоколообразную форму, симметричную относительно значения x, равного математическому ожиданию $M(x)$. Величина $M(x)$ показывает смещение графика $f(x)$ вдоль оси x без изменения его формы. Дисперсия $D(x)$ и среднее квадратическое отклонение $S(x)$ СВ ххарактеризуют разброс значений этой величины вокруг ее математического ожидания. Чем больше $D(x)$ и $S(x)$, тем значительнее разброс.

Математическое ожидание СВ может быть записано формулой

$$M\left(x\right)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}x\cdot f\left(x\right)\mathrm{d}x.$$

Нормированный нормальный закон. Существует частный случай нормального закона, в котором в качестве аргумента используется величина $z=\dfrac{x-M\left(x\right)}{S\left(x\right)}$, которая является безразмерной. Относительно величины z записываются нормированные функции:

плотность распределения

$$f\left(z\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(\frac{z^2}{2}\right)$$

и интегральная функция распределения

$$F\left[z\right]=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{z}\exp\left(\frac{z^2}{2}\right)\mathrm{d}z.$$

В справочных источниках по теории вероятностей и математической статистике часто приводятся таблицы значений этих функций, в которых отсутствуют отрицательные значения аргумента z. Тогда значения функции $F(-z)$ находят, зная значения $F(z)$ и используя равенство $F\left(z\right)+F\left(-z\right)=1$ (*). При помощи интегральной функции можно найти квантили нормального распределения.

Квантиль U_p нормального распределения, соответствующая вероятности P, – это число, удовлетворяющее выражению

$F\left(U_p\right)=P$ (**). Сопоставив выражения (*) и (**), можно записать $U_{1-p}=-U_p$.

Нормальный закон может применяться:

1. для описания распределения суммарной наработки восстанавливаемого изделия до капитального ремонта;
2. описания распределения времени восстановления ремонтируемого изделия;
3. оценки наработки до отказа невосстанавливаемого изделия;
4. процессов, в которых случайная величина зависит от многих факторов, каждый из которых решающе не влияет на эту величину;
5. процессов, в которых случайная величина имеет коэффициент вариации, равный 0,3.

Логарифмически нормальный закон. При изучении и исследовании случайных величин может применяться нормальный закон, в котором аргументом является логарифм случайной величины. В этом виде закон называется логарифмически нормальным.

Интегральная функция логарифмически нормального распределения записывается:

для десятичного логарифма случайной величины (СВ)

$$F\left(x\right)=\int_0^x \frac{0,4343}{\sqrt{2\pi}\cdot x\cdot \mathrm{lgx}}\exp\left[-\frac{(\lg x-M\left(\lg x\right))^2}{2S^2\left(\lg x\right)}\right]\mathrm{d}x,$$

для натурального логарифма СВ

$$F\left(x\right)=\int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot x\cdot \ln x}\exp\left[-\frac{(\ln x-M\left(\ln x\right))^2}{2S^2\left(\ln x\right)}\right]\mathrm{d}x.$$

Функция плотности вероятности по логарифмически нормальному закону будет:

для десятичного логарифма СВ

$$F(x)=\frac{0,4343}{\sqrt{2\pi}\cdot x\cdot S(\lg x)}\exp\left[-\frac{(\lg x-M(\lg x))^2}{2S^2(\lg x)}\right],$$

для натурального логарифма СВ

$$F(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot x\cdot S(\ln x)}\exp\left[-\frac{(\ln x-M(\ln x))^2}{2S^2(\ln x)}\right].$$

Логарифмически нормальный закон рекомендуется применять, например:

1. для описания распределения числа циклов переменных напряжений, действующих на детали;
2. описания случайных явлений, характеризуемых рекуррентным соотношением

$$x_t=x_{t-1}+\xi_t(x_{t-1}),$$

где x_t – параметр явления в момент времени t;

x_{t-1} – параметр явления в предыдущий момент времени $(t-1)$;

$\xi_t(x_{t-1})$ – некоторая случайная функция, зависящая от предыдущего значения параметра.

Закон Вейбулла. Этот закон существует в виде двухпараметрического и трехпараметрического законов.

Числовыми параметрами данного закона являются:

параметр формы (угловой коэффициент) β ($\beta > 0$);

параметр масштаба (ресурсная характеристика) θ ($\theta > 0$);

параметр сдвига (минимальная наработка) δ ($\delta \geq 0$).

Если параметр сдвига равен нулю, то закон принимает двухпараметрический вид.

Интегральная функция распределения случайной величины по двухпараметрическому закону Вейбулла

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\beta}} \quad \text{при } \mathrm{x} \geq 0.$$

При подстановке в данную формулу значения $x = \theta$ получаем $F(x) = 1 - {}^{1}\!/_{e} = 0,632.$ С точки зрения теории надежности, это значение – вероятность появления отказа элемента до наработки, равной θ, то есть значение аргумента θ делит площадь под графиком интегральной функции в отношении 0,632 : 0,368 при любых значениях углового коэффициента β, и поэтому параметр масштаба θ называют ресурсной характеристикой.

Функция плотности вероятности для двухпараметрического закона

$$f(x) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\beta}\right].$$

Интегральная функция трехпараметрического закона Вейбулла будет иметь вид

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\delta}{\theta-\delta}\right)^{\beta}}.$$

Функция плотности вероятности трехпараметрического закона Вейбулла записывается

$$f(x) = \frac{\beta}{\theta-\delta}\left(\frac{x-\delta}{\theta-\delta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\delta}{\theta-\delta}\right)^{\beta}\right].$$

Математическое ожидание СВ, распределенной по закону Вейбулла, представляется выражением

$$M\left(x\right)=\theta\cdot b_{\beta},$$

где b_{β} – коэффициент ($b_{\beta}=\Gamma\left(1+\dfrac{1}{\beta}\right)$);

$\Gamma(1 + 1/\beta)$ – гамма-функция Эйлера.

Среднее квадратическое отклонение СВ будет

$$S\left(x\right)=\theta\cdot c_{\beta},$$

где c_{β} – коэффициент ($c_{\beta}=\sqrt{\Gamma\left(1+\dfrac{2}{\beta}\right)-b^{2}_{\beta}}$).

Коэффициент вариации равен

$$v\left(x\right)=\frac{S\left(x\right)}{M\left(x\right)}=\frac{c_{\beta}}{b_{\beta}}.$$

Параметр формы β определяет форму графика распределения. При увеличении этого параметра математическое ожидание СВ стремится к ресурсной характеристике, а дисперсия стремится к нулю.

Практика исследования узлов и деталей автомобилей показывает, что закон Вейбулла лучше других законов подходит для описания распределений пределов упругости и прочности ряда материалов, наработки до отказа многих невосстанавливаемых деталей (например, подшипников качения), у которых отказ наступает вследствие усталостного разрушения и др.

Экспоненциальный закон. В интегральной форме этот закон записывается так:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda \cdot x),$$

в дифференциальной форме (плотность вероятности)

$$f(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x) \quad \text{при} \quad x \geq 0.$$

где λ – параметр распределения.

Сравнение формул для интегральных и дифференциальных функций экспоненциального закона и закона Вейбулла (двухпараметрический вид) показывает, что экспоненциальный закон является частным случаем закона Вейбулла при параметре формы, равным 1, и параметре масштаба, равным 1/λ. В справочных источниках по теории вероятностей и математической статистике приводятся таблицы функции $f(x) = \exp(-x)$.

Числовые характеристики случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону, выражаются следующим образом:

математическое ожидание $M(x) = \dfrac{1}{\lambda}$;

дисперсия $D(x) = \dfrac{1}{\lambda^2}$;

коэффициент вариации $v(x) = 1$.

Рекомендуется применять экспоненциальный закон для описания распределения наработки до внезапных отказов, в процессе формирования которых практически не происходит изнашивания и старения деталей (элементов) устройств.

Практическое занятие № 2

Предварительный расчет надежности электронного устройства

Требования к надежности разрабатываемого электронного устройства задаются в техническом задании на его разработку. На ранних стадиях проектирования определяется программа обеспечения надежности, которая на последующих стадиях детализируется и уточняется. Одной из составляющих этой программы является расчет надежности проектируемого устройства. Первые расчеты делают на ранних стадиях. С уточнением информации о создаваемом устройстве корректируются и расчеты надежности. Современные методы расчета надежности позволяют получить количественные характеристики надежности проектируемого устройства и сопоставить их с заданными в техническом задании.

Расчеты надежности электронных устройств в основном сводятся к определению вероятности безотказной работы и средней наработки до первого отказа по известным интенсивностям отказов элементов устройств. В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на эксплуатацию электронных устройств и их надежность, обычно последовательно выполняют три расчета надежности: предварительный, ориентировочный и окончательный.

Предварительный расчет позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности устройства. Он используется при проверке требований по надежности, установленных заказчиком в техническом задании, и проводится, когда разработаны принципиальные электрические схемы на устройство. При этом расчете учитывается влияние на надежность устройства типов и количества применяемых элементов и делаются следующие допущения: все элементы работают в нормальном режиме, предусмотренном техническими условиями на элементы; интенсивности отказов элементов принимаются постоянными как для периода нормальной работы по справочникам по надежности. Также принимается, что соединение элементов в схеме устройства, с точки зрения надежности, последовательное, то есть отказ одного элемента ведет к отказу всего устройства.

Предварительный расчет надежности электронного устройства позволяет определить рациональный состав элементов в устройстве и наметить пути обеспечения надежности.

Типовыми элементами, входящими в состав электронных устройств, являются полупроводниковые интегральные микросхемы, керамические конденсаторы постоянной емкости, элементы монтажа (печатные платы, разъемы) и пайка.

Расчет показателей надежности производится в следующей последовательности.

1. Находим интенсивность отказов однотипных элементов

$$\lambda_{\min \text{Э}} = n \cdot \lambda_{\min}, \ 1/\text{ч},$$

$$\lambda_{\max \text{Э}} = n \cdot \lambda_{\max}$$

$$\text{или} \ \ \lambda_{\sum \text{Э}} = n \cdot \lambda_i,$$

где n – количество однотипных элементов;

$\lambda_{\min}$ – минимальная интенсивность отказов одного элемента;

$\lambda_{\min\text{Э}}$ – минимальная интенсивность нескольких однотипных элементов;

$\lambda_{\max}$ – максимальная интенсивность отказов одного элемента;

$\lambda_{\max\text{Э}}$ – максимальная интенсивность нескольких однотипных элементов;

$\lambda_{\sum\text{Э}}$ – суммарная интенсивность отказов нескольких однотипных элементов;

λ_i – интенсивность отказов одного элемента.

2. Определяем интенсивность отказов устройства:

минимальную

$$\lambda_{y\min} = \sum \lambda_{\min Э};$$

максимальную

$$\lambda_{y\max} = \sum \lambda_{\max Э};$$

среднюю

$$\lambda_{\text{уср}} = \frac{\lambda_{\text{ymin}} + \lambda_{\text{ymax}}}{2} + \lambda_{\sum Э},$$

где $\lambda_{\text{уср}}$ – средняя интенсивность отказов устройства;

λ_{ymin} и λ_{ymax} – минимальная и максимальная интенсивности отказов устройства.

3. Рассчитываем среднюю вероятность безотказной работы устройства

$$P(t)_{\text{ср}} = e^{-\lambda_{\text{уср}} \cdot t},$$

где t – суммарное время работы устройства за весь период эксплуатации ($t = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdot t_4 \cdot K_{\text{иу}}$;

t_1 – количество рабочих часов в сутки;

t_2 – количество рабочих дней в неделю;

t_3 – количество недель в году;

t_4 – количество лет эксплуатации;

$K_{\text{иу}}$ – коэффициент использования устройства).

Находим среднюю вероятность отказа устройства

$$R(t)_{\text{ср}} = 1 - P(t)_{\text{ср}}.$$

4. Рассчитываем среднюю наработку устройства

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\text{уср}}}, \text{ ч.}$$

Практическое занятие № 3

Расчет показателей безотказности электронного устройства

Задание 1.

Последовательность расчета:

а) определяется вероятность безотказной работы для партии электронных устройств

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

N_0 – количество устройств в партии;

$n(\Delta t)$ – количество отказавших устройств за интервал времени Δt;

б) рассчитывается средняя частота отказов устройств

$$\overline{\alpha(t)} = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t};$$

в) рассчитывается средняя интенсивность отказов для партии устройств

$$\overline{\lambda(t)} = \frac{\overline{\alpha(t)}}{P(t)}.$$

Задание 2.

Последовательность расчета:

а) рассчитывается вероятность безотказной работы электронного устройства

$$P(t) = e^{-\overline{\lambda_{\text{у}}} \cdot t},$$

$\overline{\lambda_{\text{у}}}$ – средняя интенсивность отказов устройства ($\overline{\lambda_{\text{у}}} = \overline{\lambda} \cdot N$,
где $\overline{\lambda}$ – средняя интенсивность отказов элементов устройства);

t – время эксплуатации.

Определяется средняя наработка до первого отказа устройства

$$\overline{T_1} = \frac{1}{\overline{\lambda_{\text{у}}}}.$$

Задание 3.

Распределение Рэлея. Для распределения случайных величин по закону Рэлея:

а) плотность вероятности записывается следующей формулой

$$f(x, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \; x \geq 0 \;\text{ и }\; \sigma > 0$$

где x – случайная величина;

σ – параметр распределения (параметр масштаба);

б) функция распределения представляется формулой

$$P(X \leq x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \;\; x \geq 0.$$

в) параметры распределения выражаются

$x \in [0; \infty]$;

$\sigma > 0$;

математическое ожидание = $\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma$;

медиана $= \sigma \sqrt{\ln(4)}$;

мода = σ;

дисперсия = $\left(2-\frac{\pi}{2}\right)\sigma^2$;

коэффициент асимметрии $\frac{2\sqrt{\pi(\pi-3)}}{(4-\pi)^{3/2}}$.

Последовательность расчета.

1. Определяются вероятности безотказной работы электронного устройства для нескольких значений времени эксплуатации

$$P(t_1)=e^{-\frac{t_i^2}{2\cdot\sigma^2}},$$

где t_i – время эксплуатации устройства (I = 1, 2, 3).

Рассчитываются частоты отказов устройства для разных значений времени эксплуатации

$$\alpha(t_i)=\frac{t_i}{\sigma^2}e\frac{t_i^2}{2\cdot\sigma^2}.$$

2. Определяются интенсивности отказов устройства для разных значений времени эксплуатации

$$\lambda(t_i)=\frac{t_i}{\sigma^2}.$$

3. Рассчитывается средняя наработка устройства до первого отказа

$$\overline{T_1}=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma.$$

Практическое занятие № 4

Расчет и построение функции надежности элемента электронного устройства

Задание 1.

Последовательность расчета.

1. Рассчитывается вероятность безотказной работы элемента для нескольких значений времени его эксплуатации

$$P\left(t_i\right)=e^{-\lambda \cdot t_i},$$

t_i – i-е время эксплуатации элемента (i = 1, 2, 3);

λ – интенсивность отказов элемента.

2. По полученным значениям вероятностей $P(t_i)$ и заданным значениям времени t_i строим график зависимости $P(t) = f(t)$ – функцию надежности элемента.

3. Определяется число отказов элемента устройства за заданное время эксплуатации

$$\alpha\left(t\right)=\lambda \cdot e^{\lambda \cdot t_i}.$$

4. По найденным значениям числа отказов элемента строим график зависимости $\alpha\left(t\right)=f\left(t\right)$.

5. Рассчитывается средняя наработка элемента до первого отказа

$$\overline{T_1}=\frac{1}{\lambda}.$$

Задание 2.

Последовательность расчета.

1. Определяется суммарная наработка электронных устройств

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{d} t_i + (n-d)t_0,$$

где d – число отказавших устройств;

n – число испытываемых устройств;

t_0 – время эксплуатации устройств по плану испытаний;

t_i – время эксплуатации до отказа.

2. Рассчитывается средняя интенсивность отказов устройств

$$\bar{\lambda} = \frac{d}{T_{\Sigma}}.$$

3. Определяется доверительный интервал для интенсивности отказов:

верхняя граница

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\chi^2(\alpha_2)\cdot d}{T_{\Sigma}};$$

нижняя граница

$$\lambda_{\text{н}} = \frac{\chi^2(1-\alpha_2)\cdot d}{T_{\Sigma}},$$

где $\chi^2(\alpha_2)$ и $\chi^2(1-\alpha_2)$ – критерий Пирсона.

Двусторонний доверительный интервал будет

$$[\lambda_{\text{н}}, \lambda_{\text{в}}].$$

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

ДЫКО Геннадий Александрович

НАДЕЖНОСТЬ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ
СИСТЕМ

Практикум
для направления специальности
1-37 01 02-02 «Автомобилестроение
(электроника)»

Редактор *Т. В. Мейкшане*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 04.07.2018. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,03. Уч.-изд. л. 1,59. Тираж 100. Заказ 320.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.