

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
“Надійність та діагностика електрообладнання ” для студентів
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Кропивницький
2018

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Надійність та діагностика електрообладнання” для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
/ Укл.: к.т.н., доц Котиш А.І., к.т.н., ст. викл. Савеленко І.В

Затверджено на засіданні кафедри ЕТС та ЕМ
(протокол № 14 від 12.04.2018 р.)

Коротка анотація видання. Розглянуті питання визначення кількісних характеристик надійності невідновлюваних і відновлюваних виробів, а також складних систем з різними видами резервування. Використання методів розроблених у теорії імовірностей і математичній статистиці дозволяє підійти з єдиних позицій до опису випадкових подій і процесів виникнення відмов виробів і розраховувати імовірність їх безвідмовної роботи за час експлуатації.

ПРАВИЛА БЕЗПЕКИ

1. При виконанні лабораторних робіт необхідно в першу чергу, дотримуватися основних вимог техніки безпеки в електротехнічних установках.
2. Перед подачею струму на лабораторні стенди студенти повинні бути попереджені про появу напруги в схемах релейного захисту.
3. Будь-які комутаційні перемикання в схемах під напругою заборонені.
4. На першому лабораторному занятті повинен бути проведений інструктаж з правил безпеки.
5. Студенти повинні бути проінструктовані з правил надання першої допомоги при враженні електричним струмом.
6. Перше вмикання стенду в робочий стан – завжди під наглядом викладача або лаборанта.
7. Лабораторія повинна забезпечуватись відповідними вогнегасниками.

ЗМІСТ

	стр.
Вступ.....	5
1 Лабораторна робота №1. "Статистичні характеристики надійності"	6
2 Лабораторна робота №2. "Визначення коефіцієнтів, що характеризують вплив елементів на надійність апаратури".....	8
3 Лабораторна робота №3. "Закони розподілу випадкових величин"..	9
4 Лабораторна робота №4. "Методи оцінки параметрів теоретичних законів розподілу по статистичним даним".....	13
5 Лабораторна робота №5 "Параметр потоку відмов як критерій надійності відновлюваних виробів"	16
6 Лабораторна робота №6. "Розрахунок характеристик надійності виробів при основному з'єднанні елементів (метод середньо групових інтенсивностей відмов)"	21
7 Лабораторна робота №7 "Розрахунок надійності всипної обмотки асинхронних двигунів".....	25
8 Лабораторна робота №8. "Розрахунок надійності резервованих систем".....	27
9 Лабораторна робота №9. "Розрахунок надійності відновлюваних виробів (Метод простору станів)".....	35
Перелік посилань.....	39
Додаток 1. Г - функція.....	40
Додаток 2. Значення інтеграла імовірності.....	41
Додаток 3. Інтенсивності відмов елементів електронної апаратури і поправочні коефіцієнти.....	42
Додаток 4. Дані про наробітки та відмови двигунів-вентиляторів...	50
Додаток 5. Квантилі розподілу χ^2	54

ВСТУП

Кожна наука спирається на основні поняття і визначення. Теорія надійності також має свої основні поняття. До них у першу чергу відноситься поняття надійності. Надійність - це властивість апаратури зберігати свої вихідні характеристики (параметри) у визначених межах при заданих умовах експлуатації.

Надійність є внутрішня властивість апаратури, об'єктивна реальність, властива кожному конкретному зразку апаратури.

З визначення надійності випливає, що надійною вважається не тільки та система, у якій виникає ушкодження, що приводить до непрацездатності апаратури, але також і та, у якій вихідні характеристики виходять за припустимі межі. Наведене поняття надійності відноситься до чисто технічних понять.

В міру розширення пізнань про цю властивість удосконалюються і кількісні характеристики – критерії, за допомогою яких можна найбільше точно охарактеризувати цю властивість. Однак, можна затверджувати, що жодна кількісна характеристика не може цілком охарактеризувати надійність. Надійність – більш глибоке поняття, чим будь-яка її характеристика. Надійність, як властивість апаратури, виявляється в процесі експлуатації і залежить від її умов.

Особливістю методичних вказівок є націлення студентів на вивчення послідовності визначення кількісних характеристик надійності електротехнічних виробів та систем управління електроприводами в цілому, уміння використовувати ЕОМ для статистичних розрахунків.

Досвід, одержаний студентами при виконанні лабораторних робіт, дасть їм впевненість у майбутній інженерній діяльності, виробить міцні знання по методах збору експериментальних даних про відмови, їх статистичному аналізу і виявленню фізичних причин відмов.

Методичні вказівки добре ілюстровані схемами. Послідовність викладання матеріалу відповідає логіці необхідних простих дій студентів, що виключає з їх боку похибки і підвищує продуктивність праці.

Лабораторна робота №1. "Статистичні характеристики надійності".

Теоретичні відомості.

1. Ймовірність безвідмовної роботи (функція надійності) визначається за формулою:
- $$P^*(t) = \frac{N(t)}{N_0} \quad \text{де } N_0 - \text{початкова кількість елементів; } N(t) - \text{кількість працездатних елементів у момент часу } t.$$

2. Ймовірність відмов знаходиться по формулі:

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}; \quad \text{де } n(t) - \text{кількість елементів, що відмовили, до моменту часу } t.$$

$$n(t) = N_0 - N(t)$$

3. Частота (щільність) відмов:

$$a^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t N_0}$$

4. Інтенсивність відмов знаходиться по формулі

$$\lambda^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t N(t)}$$

Приклад.

Вісімсот компонентів системи керування електроприводами спостерігали протягом 30 годин через кожні три години. Щораз фіксували кількість елементів, що відмовили.

- а) Побудувати функції ймовірності безвідмовної роботи $P^*(t)$ та ймовірності відмов $Q^*(t)$.

- б) Побудувати функції частоти $a^*(t)$ й інтенсивності $\lambda^*(t)$ відмов.

Статистичні дані про відмови наведені в таблиці.

Інтервал часу, год	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30
Кількість непрацездатних елементів в даному інтервалі часу	185	42	36	30	17	8	14	9	6	3

Для побудови залежностей $P^*(t), Q^*(t), a^*(t), \lambda^*(t)$ заповнимо наступну таблицю.

Інтервал часу год.	Кількість непрацездатних елементів	Густина відмов $a^*(t)$	Інтенсивність відмов $\lambda^*(t)$	Ймовірність безвідмовної роботи $P^*(t)$	Ймовірність відмов $Q^*(t)$
0-3	185	$185/800 \times 3 = 0.$	$185/800 \times 3 =$	$800/800 = 1$	$0/800 = 0$

		077	0.0771		
3-6	42	42/800x3=0.0175	42/615x3=0.0227	615/800=0.768	185/800=0.231
6-9	36	36/800x3=0.015	36/573x3=0.0209	573/800=0.716	227/800=0.284
9-12	30	30/800x3=0.0125	30/537x3=0.0175	537/800=0.671	263/800=0.329
12-15	17	17/800x3=0.0071	17/507x3=0.0112	507/800=0.633	293/800=0.366
15-18	8	8/800x3=0.0033	8/490x3=0.0054	490/800=0.612	310/800=0.387
18-21	14	14/800x3=0.0058	14/482x3=0.0097	482/800=0.602	318/800=0.397
21-24	9	9/800x3=0.00375	9/468x3=0.0064	468/800=0.585	332/800=0.415
24-27	6	6/800x3=0.0025	6/459x3=0.0044	459/800=0.574	341/800=0.426
27-30	3	3/800x3=0.0013	3/453x3=0.0022	453/800=0.566	347/800=0.434

Завдання для самостійного виконання.

1. Протягом 11000 годин досліджували систему, яка складалася з 80 елементів. Дані про відмови наведені в таблиці.

Побудувати функції $P^*(t), Q^*(t), a^*(t), \lambda^*(t)$ для наведених даних.

Інтервал часу, год	0 20	20 40	40 60	60 80	80 100	100 125	125 150	150 175	175 200	200 225
Кількість елементів непрацездатних в даному інтервалі часу	16	11	10	16	12	16	7	8	3	1

2. Повторити завдання 1 для інших даних про відмови.

а)

Інтервал часу, год	0 1000	1000 2000	2000 3000	3000 4000	4000 5000	5000 6000	6000 7000	7000 8000	8000 9000	9000 10000
Кількість елементів, що відмовили	20	15	10	5	6	5	5	6	4	2

б)

Інтервал часу, год	70 80	80 85	85 90	90 95	95 100	100 105	105 110	110 115	115 120	120 125
--------------------	----------	----------	----------	----------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------

Кількість елементів, що відмовили	2	2	6	18	18	13	19	14	5	2
-----------------------------------	---	---	---	----	----	----	----	----	---	---

Лабораторна робота №2. "Визначення коефіцієнтів, що характеризують вплив елементів на надійність апаратури".

Теоретичні відомості.

Коефіцієнт відмов елементів. $K_o = \frac{n_i}{n}$ n_i – кількість відмов апаратури обумовлених елементами і-го типу за визначений календарний термін. n - загальна кількість відмов апаратури за той же календарний термін.

При випробуванні великого числа зразків апаратури: $n_i = \sum_{j=1}^{N_0} n_{i,j}$, $n = \sum_{j=1}^{N_0} n_j$ де $n_{i,j}$ – число відмов у j-му зразку апаратури, викликаних відмовами елементів і-го типу за визначений календарний термін, n_j – загальне число відмов j-го зразка апаратури за той же календарний термін. N_o – число випробуваних зразків апаратури. Тоді

$$K_o = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} n_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N_0} n_j} \quad \text{Відносний коефіцієнт відмов елементів:} \quad K_{o,o} = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} n_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N_0} n_j} \frac{N}{N_i}$$

N - загальна кількість елементів у всіх зразках, N_i – кількість елементів і-го типу у всіх зразках.

Завдання.

На випробуванні знаходилося 100 зразків автоматичних систем, призначених для тривалої експлуатації. При цьому було зафіксовано протягом 1000 годин роботи 254 відмови. Склад апаратури кожного зразка, число відмов елементів у всіх 100 зразках визначені в таблиці 2.1. Необхідно знайти коефіцієнт відмов і відносний коефіцієнт відмов для кожного типу елементів. Дати висновок про надійність елементів. Побудувати залежності в часі K_o і $K_{o,o}$ електровакуумних приладів, якщо відмови електровакуумних приладів і апаратури були розподілені в часі так, як показано в таблиці 2.2.

Для електровакуумних приладів, наприклад, коефіцієнт відмов і відносний коефіцієнт відмов визначаються таким чином:

$$K_o = \frac{100}{254}; K_{o,o} = \frac{100 * 7455}{220 * 254} \quad \text{Для елементів інших типів } K_o \text{ і } K_{o,o} \text{ визначаються аналогічно.}$$

Таблиця 2.1

Найменування елементів	Кількість елементів в одному зразку	Кількість відмов елементів у всіх зразках
Електровакуумні прилади	220	100
Напівпровідникові прилади	40	2
Резистори	2140	46
Конденсатори	1800	38
Реле	24	3
Трансформатори	12	1
Електричні обертові пристрої (електродвигуни, сельсини).	20	4
Магнітні підсилювачі	8	0
Дроселі	40	0
Рознімання	25	3
Перемикачі	26	2
Плавкі вставки	14	3
Пайка та провідники	3000	48
Інші деталі	86	4

Таблиця 2.2

Інтервали часу, година	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000
Кількість відмов електровакуумних приладів.	16	13	10	9	8	9	9	8	9	9
Кількість відмов апаратури	35	30	24	21	19	21	21	24	28	31

іК

Коефіцієнти $K_{o..o}$ на кожному інтервалі часу будуть визначатися по формулах:

$$K_o = \frac{n_i}{n}; K_{o..o} = \frac{N}{N_i} K_o \quad \text{Для першого інтервалу часу: } K_o = \frac{16}{35}, K_{o..o} = \frac{16 * 7455 * 100}{35 * 220 * 100}$$

Лабораторна робота №3. "Закони розподілу випадкових величин".

Завдання.

1. Визначити ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов і середній наробіток до першої відмови технічного пристрою, відмови якого в часі підкоряються розподілу Релея, для трьох інтервалів часу його роботи : $t=200$, $t=1000$, $t=3000$ г, якщо параметр розподілу $\sigma=1500$ г.

2. Частота відмов у часі електричної машини на шарикопідшипниках приблизно підпорядковується розподілу Вейбула з параметрами $k = 1,5$ і $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ г}^{-1}$. Визначити ймовірність безвідмовної роботи машини й інтенсивність відмов для трьох проміжків часу роботи $t=500$, $t=1000$, $t=2000$ г, а також обчислити середній наробіток до першої відмови.

3. Під час контрольних випробувань деякої системи на заводі-виготовлювачі виявилися відмови в її роботі, які підкоряються γ – розподілу з параметром асиметрії $K > 1$. Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи й інтенсивність її відмов для двох проміжків часу: $t=200$ і 1000 г, а також обчислити середній наробіток її до першої відмови, якщо параметри $\lambda_0 = 10^{-3} \text{ г}^{-1}$ і $K=2$.

4. Визначити ймовірність безвідмовної роботи і середній наробіток до першої відмови трифазного асинхронного двигуна малої потужності типу АОЛ-22-2 до кінця періоду його нормальної експлуатації $t=T=6000$ г, якщо середня інтенсивність відмов у частках одиниці на одну годину роботи $\lambda = 15 \cdot 10^{-6} \text{ г}^{-1}$. Обчислити також ймовірність безвідмовної роботи цього двигуна, інтенсивність відмов і середній час наробки до першої відмови в період зносу для трьох проміжків часу його роботи, вважаючи від початку періоду нормальної експлуатації $t=8000$, $t=10000$, $t=12000$ г, якщо середня довговічність, чи ресурс двигуна від того ж початку відліку $T_p=12000$ г. та середнє квадратичне відхилення часу між відмовами в нормальному законі $\sigma = 2000$ г.

Вказівки щодо розв'язання задач:

а) Для періоду нормальної експлуатації середній наробіток до першої відмови та ймовірність безвідмовної роботи визначаються по відповідним формулам для експоненціального закону розподілу.

б) У період зносу (коли час роботи перевищує тривалість періоду нормальної експлуатації) надійність двигуна буде поступово знижуватися не тільки від відмов пов'язаних з старінням, але також через можливі в цей період раптових відмов приблизно з тією же інтенсивністю λ , як і в попередній період нормальної експлуатації.

Тому, для визначення ймовірності безвідмовної роботи в період зносу потрібно обчислити надійність (ймовірність безвідмовної роботи) двигуна обумовлену раптовими відмовами розподіленими по експоненціальному закону, а також обчислити надійність, пов'язану з зношуванням двигуна по формулах для нормального розподілу. Потім отримані дві ймовірності перемножити й одержати загальну ймовірність безвідмовної роботи двигуна для кожного з трьох заданих інтервалів часу.

в) Інтенсивність відмов двигуна для трьох проміжків часу в період зносу потрібно визначити по відповідній формулі нормального закону розподілу. Середній час наробки до першої відмови потрібно обчислити також по формулі для нормального розподілу з урахуванням ресурсу роботи T_p .

Статистична обробка результатів експлуатаційних випробувань на надійність.

Отримані матеріали по відмовам устаткування підлягають статистичній обробці. Задачами такої обробки є:

1. Обчислення параметрів отриманого розподілу: $(M(t), D(t), \sigma(t))$.
2. Визначення емпіричної функції розподілу відмов виробів $Q^*(t)$.
3. Встановлення ступеня збіжності емпіричного розподілу з передбачуваним теоретичним розподілом.

Завдання.

1. У результаті обробки даних по випробуванням отриманий наступний ряд значень для часу появи відмов апаратури в годинах: 2, 2, 3, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 9, 13, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 25, 27, 35, 38, 53, 56, 69, 77, 86, 98, 120. Потрібно виявити функцію ймовірності відмов $Q(t)$.
2. У результаті обробки експериментальних даних отриманий наступний ряд для часу відмов апаратури при прискорених випробуваннях: 12, 25, 34, 34, 34, 34, 34, 34, 45, 45, 45, 53, 61, 61, 61, 61, 69, 69, 69, 75, 75, 84, 84, 92, 95.

Потрібно виявити закон розподілу часу появи відмов $Q(t)$.

Послідовність рішення задачі.

1. Потрібно послідовно заповнити стовпці таблиці:

t_i	n_i	$\Delta t * j$	a_j	H_j	$\frac{H_j}{\sum n_i}$

У першу графу таблиці заноситься значення часу появи відмови (значення часу роботи до відмови); у графу 2 - число зразків апаратури що мають даний час роботи до відмови; у графу 3 заносяться значення заданих інтервалів часу, на які розбивається весь діапазон зміни випадкової величини часу появи відмов; у графу 4 – кількість значень n_i випадкової величини t_i , які потрапляють в інтервали часу третього стовпця; у графу 5 записується накопичена до даного моменту часу кількість відмов H_j ; у графу 6 – значення емпіричної функції розподілу відмов $Q^*(t)$.

Кількість інтервалів часу j , на які розбивається весь діапазон зміни випадкової величини, задається довільно, але брати його більше загальної кількості отриманих у досвіді випадкових величин t_i не рекомендується. Тоді значення постійного інтер-

валу часу Δt визначається шляхом округлення значення виразу $\frac{t_{i,max} - t_{i,min}}{j}$. Для ко-

жного інтервалу третьої графи $[\Delta t * j, \Delta t * (j+1)]$ і для кожного значення випадкової величини t_i перевіряємо наступну умову: $\Delta t * j < t_i \leq \Delta t * (j+1)$. У четверту графу для величини a_j заносимо кількість n_i випадкових величин t_i , що задовольняють зазначеній умові. У п'яту графу заноситься кількість накопичених відмов до моменту часу $(j+1) * \Delta t$. Підрахунок значень п'ятої графи здійснюється за значен-

нями графі четвертої тобто для довільного k -го інтервалу часу $H_k = \sum_{j=1}^k a_k$.

$n = \sum_{i=1}^k n_i$ - загальна кількість відмов, що відбулися. У шостій графі одержуємо значення емпіричної функції розподілу відмов $Q^*(t)$ на кожному інтервалі часу $[\Delta t * j, \Delta t * (j+1)]$.

2.Перевірку відповідності $Q^*(t)$ якому-небудь аналітичному закону розподілу варто проводити в наступному порядку: експоненціальний, нормальний, нормально-логарифмічний, закон Вейбула.

Спершу перевіряємо гіпотезу про наявність експоненціального закону розподілу по його основній властивості: середнє значення випадкової величини дорівнює середньому квадратичному відхиленню випадкової величини від її середнього значення тобто $T_{cp} = \sigma$.

Середнє значення випадкової величини та її дисперсія розраховуються по наступним формулам:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i t_i}{\sum_{i=1}^k n_i}; \quad D^*(t) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (t_i - T_{cp})^2}{\left| \sum_{i=1}^k n_i \right|}; \quad \sigma^* = \sqrt{D^*(t)}.$$

Якщо $T \approx \sigma^*$ то гіпотеза про експоненціальний закон розподілу підтверджується і єдиний параметр цього закону (інтенсивність відмов) визначають по формулі $\lambda = \frac{1}{T_{cp}}$. Якщо умова $T_{cp} \approx \sigma^*$ не виконується, то необхідно перевірити можливість наближення функції $Q^*(t)$ нормальним законом розподілу.

Аналітична функція розподілу відмов $Q(t)$ для нормального закону розподілу має вигляд:

$$Q(t) = \frac{\Phi\left(\frac{t - T_{cp}}{\sqrt{2} * \sigma}\right)}{1 + \Phi\left(\frac{T_{cp}}{\sqrt{2} * \sigma}\right)}; \quad \text{де функція } \Phi(t) \text{ називається інтегралом ймовірності і визначається виразом:}$$

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp(-t^2) dt.$$

Визначивши параметри експоненціального закону розподілу (λ), нормального (T_{cp}, σ), чи будь-якого іншого по статистичним даним і записавши функцію $Q(t)$, необхідно оцінити ступінь збіжності емпіричної $Q^*(t)$ та теоретичної $Q(t)$ кривих розподілу. Для цієї мети необхідно застосувати критерій згоди О.Н. Колмогорова. Оцінка за критерієм згоди О.Н. Колмогорова проводиться в наступному порядку: 1) Для j інтервалів, на які розбивається емпіричний розподіл, розраховується значення функції $Q^*(\Delta t * j) = \frac{H_j}{\sum n_i}$, що зроблено в шостій графі таблиці. 2) Розраховується передбачувана теоретична функція розподілу

для цих же моментів часу $Q(\Delta t * j)$. 3) Знаходиться модуль різниці $Q(\Delta t * j) - Q^*(\Delta t * j)$ для кожного інтервалу j і визначається найбільше з всіх отриманих значень $D_{max} = |Q(\Delta t * j) - Q^*(\Delta t * j)|$. 4) Визначається число $\Lambda_a = D_{max} * \sqrt{n}$. Для задовільної згоди емпіричного і теоретичного розподілу необхідно, щоб $[\Lambda_{max} = 1,5]$. Оптимальний інтервал значень $\Lambda_a \leq 1,0$. $\Lambda_a <$

Лабораторна робота №4. "Методи оцінки параметрів теоретичних законів розподілу по статистичним даним".

У попередній лабораторній роботі оцінка параметрів теоретичних законів розподілу здійснювалася по методу моментів. Цей метод заснований на тому, що порівнюються початкові та центральні емпіричні моменти відповідним початковому та центральному теоретичним моментам. Другим найбільш розповсюдженим методом є метод найбільшої правдоподібності.

Приклад.

Знайти методом найбільшої правдоподібності оцінки параметрів T_{cp} і σ нормального розподілу, якщо в результаті експериментальних спостережень одержали n відмов у моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Частота відмов нормального розподілу визначається по формулі

$$a(t) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}}}{\left(1 + \Phi\left(\frac{T_{cp}}{\sqrt{2} * \sigma}\right)\right)} * \exp\left(-\frac{(t - T_{cp})^2}{2 * \sigma^2}\right) \quad \left(\frac{T_{cp}}{\sqrt{2} * \sigma}\right) \text{ для нормального}$$

го закону розподілу з великим ступенем точності може бути прийнята рівною 2. У зв'язку з цим дуже часто використовують спрощену форму запису частоти відмов нормального розподілу:

$$a(t) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(t - T_{cp})^2}{2 * \sigma^2}\right) \quad . \text{ Складемо функцію правдоподібності L:}$$

$$L = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(t_1 - T_{cp})^2}{2 * \sigma^2}\right) * \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(t_2 - T_{cp})^2}{2 * \sigma^2}\right) * \dots * \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(t_n - T_{cp})^2}{2 * \sigma^2}\right)$$

$$L = \frac{1}{\sigma^n \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - T_{cp})^2}{2\sigma^2} \right\}.$$
 Знайдемо логарифмічну функцію правдоподібності.

$$\ln L = -n \ln \sigma + \ln \left(\frac{1}{\sigma^n \sqrt{2\pi}} \right) - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - T_{cp})^2}{2\sigma^2}.$$
 Знайдемо частинні похідні по T_{cp} і σ .

$$\frac{\partial \ln L}{\partial T_{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i - n T_{cp}}{\sigma^2}; \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \sigma} = \frac{-n}{\sigma} + \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - T_{cp})^2}{\sigma^3}.$$
 Дорівнявши частинні похідні нулю та вирішивши отриману систему двох рівнянь відносно T_{cp} і σ , одержимо:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = M^*(t); \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - T_{cp})^2}{n} = D^*(t); \quad \sigma = \sqrt{D^*(t)}$$
 Шукані оцінки найбільшої правдоподібності знаходяться як статистичні визначення математичного чекання і квадратного кореня з дисперсії.

Оцінки параметрів які отримані по методу найбільшої правдоподібності для інших законів розподілу наступні:

1. Інтенсивність відмов для експоненціального закону розподілу $\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i}$
2. Мода при розподілі випадкової величини за законом Релея $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^2}{2n}}$.
3. Параметри закону розподілу Вейбула k і λ_0 визначаються шляхом розв'язування рівнянь:
$$\frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{n \sum_{i=1}^n t_i^k \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^k} = 0; \quad \lambda_0 = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i^k}.$$

Рівняння, з якого знаходиться параметр k нелінійне і рішення його аналітичними методами знайти неможливо. У цьому випадку необхідно застосовувати ЕОМ для чисельного розв'язання подібних рівнянь.

У запропонованому завданні необхідно знайти закон розподілу відмов електроустаткування силових тягових підстанцій. Є дані про наробітки та відмови кремнієвих випрямлячів (враховуються тільки відмови силових ключів) і двигунів-вентиляторів для примусового охолодження напівпровідникових вентилів. Вихідний матеріал для аналізу і статистичної обробки результатів експлуатації зібраний.

ний за період біля трьох років на 27 тягових підстанціях м. Москви, 26 підстанці-ях м. Києва і 6 м. Харкова.

Послідовність виконання завдання:

1. Використовуючи відомості про наробітки і відмови зазначеного вище електроустаткування виписати значення величин часу наробки до відмови агрегатів відзначених зірочкою, що означає, що даний блок у процесі експлуатації вийшов з ладу (відмовив). Порахувати загальну кількість відмов, тим самим визначити значення n . Для двигунів та випримлячів порядок виконання роботи однаковий.
2. З виписаних значень часу безвідмовної роботи вибрати найбільше і найменше. Розділити весь діапазон наробітку об'єктів на однакові інтервали часу $\Delta t_i = t_i - t_{i-1} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{i}$. i – кількість інтервалів розбивки. Значення Δt округлити. Підрахувати кількість відмов об'єктів які потрапляють в кожний i - й інтервал. Знайти значення частоти відмов для кожного інтервалу Δt_i по формулі $a_i^* = \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i * n}$ де n - загальна кількість відмов ; Δn_i - кількість відмов які потрапляють у i - й інтервал, тобто це кількість t_i для яких виконується умова $(i-1) * \Delta t \leq t_i < i * \Delta t$. Побудувати графік емпіричної частоти відмов. Знайти середнє значення випадкової величини та її середнє квадратичне відхилення. Якщо вони не рівні, то відразу відкинути гіпотезу про можливість експоненціального розподілу. Оскільки основних законів розподілу три: експоненціальний, нормальний та закон Вейбула, то по виду графіка частоти відмов визначити найбільш можливий закон розподілу. При нормальному розподілі частота відмов збільшується до максимуму і потім знову зменшується. Закон Вейбула застосовується у більшості випадків при параметрі $\kappa < 1$. Якщо в початковий період експлуатації частота відмов велика, а потім безупинно зменшується, то є всі підстави зробити перевірку на можливість наближення емпіричної функції розподілу відмов законом Вейбула.
3. Для знаходження параметра κ в законі Вейбула необхідно вирішити наведене вище нелінійне рівняння. Після визначення κ параметр λ_0 знаходиться без утруднень.

4. Побудувати емпіричну функцію розподілу часу появи відмов $Q^*(t) = \frac{\sum_i \Delta n_i}{n}$ де $\sum_i \Delta n_i$ - загальне (накопичене) число відмов об'єктів за інтервал часу $(0, \Delta t * i)$.

Побудувати графік емпіричної функції розподілу відмов $Q^*(t)$. Після того, як будуть знайдені параметри теоретичного розподілу по методу найбільшої правдоподібності, побудувати графік знайденої аналітичної функції розподілу часу появи відмов $Q(t)$.

5. Оцінити допустимість наближення емпіричної функції $Q^*(t)$ функцією $Q(t)$ теоретичного закону розподілу використовуючи критерій згоди О. Н. Колмогорова. Значення Λ_a повинне підпорядковуватися умові $\Lambda_a \leq 1$.

Інтервальні оцінки показників надійності.

Задачі.

1. При іспиті на надійність $n = 11$ однотипних асинхронних двигунів до виходу їх з ладу отримані наступні наробітки в годинах: 300, 400, 600, 700, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000. Визначити: оцінку інтенсивності відмов двигунів λ^* ; нижню і верхню довірчі границі λ_n і λ_v з довірчими ймовірностями відповідно $\gamma_1 = 0.95$ і $\gamma_2 = 0.9$; оцінку середнього наробітку до відмови T_{cp}^* та його довірчі границі.
2. На надійність випробуються 40 електронних ламп. Лампи, що відмовили, замінюються новими. Після 573 годин іспитів зареєстрована 15-та відмова, і іспити припинені. Оцінити середній наробіток до відмови і знайти його довірчий інтервал при довірчій ймовірності $\gamma = 0.9$ в припущенні, що відмови підкоряються експонентному закону розподілу.
3. При іспиті на довговічність $n = 11$ однотипних колекторних машин постійного струму, відмови яких в період зносу мають нормальний розподіл, отримані наступні значення часу безвідмовної роботи в годинах: 1500, 1200, 1800, 1600, 2000, 1400, 2200, 1700, 1900, 2100, 2300. Потрібно оцінити середню довговічність машин T_{cp}^* та середнє квадратичне відхилення часу σ^* , а також визначити для них відповідно нижню і верхню довірчі границі з довірчою ймовірністю $\gamma = 0.95$.

Лабораторна робота №5 "Параметр потоку відмов як критерій надійності відновлюваних виробів".

Теоретичні відомості.

Розглянемо наступну модель випробування. Нехай на випробуванні знаходиться N виробів, і вироби, що відмовили, негайно замінюються справними. Іспити вважаються закінченими, якщо число відмов досягає величини, достатньої для оцінки надійності з визначеною довірчою ймовірністю. Основною кількісною характеристикою надійності відновлюваних виробів є параметр потоку відмов $\omega(t)$.

Відповідно до визначення:

$$\omega^* = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t} ; \quad (5.1)$$

де $n(t)$ – число зразків, що відмовили, в інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$; N – число випробуваних зразків; Δt – інтервал часу.

Для ординарних потоків, тобто таких, для яких виконується умова появи не більш однієї відмови в будь-який довільний момент часу, зв'язок між параметром потоку

відмов і частотою відмов виражається інтегральним рівнянням Вольтера другого роду з різницеvim ядром:

$$\omega(t) = a(t) + \int_0^t \omega(\tau) a(t - \tau) d\tau \quad (5.2)$$

При відомій функції параметра потоку відмов $\omega(t)$ можливо знайти частоту відмов, вирішивши дане інтегральне рівняння. По відомій частоті відмов можливо знайти всі кількісні характеристики надійності невідновлюваних елементів, що входять до складу відновлюваних виробів. Наведене інтегральне рівняння є основною залежністю, що зв'язує кількісні характеристики надійності невідновлюваних і відновлюваних виробів при миттєвому відновленні. Рівняння 5.2 можливо записати в операторній формі:

$$\omega(p) = \frac{a(p)}{1 - a(p)} ; \quad a(p) = \frac{\omega(p)}{1 + \omega(p)} ; \quad (5.3)$$

Співвідношення 5.2 дозволяє знайти одну характеристику через іншу, якщо існують перетворення Лапласа функцій $a(p)$ і $\omega(p)$, а також зворотні перетворення виразів 5.3.

В даний час широко використовуються статистичні дані про відмови, отримані в умовах експлуатації апаратури. При цьому вони часто обробляються таким чином, що характеристики надійності є не інтенсивністю чи частотою відмов, а параметром потоку відмов $\omega(t)$. Далі виникає необхідність по відомому параметрі потоку відмов $\omega(t)$ знайти частоту й інтенсивність відмов. Методика розрахунку зводиться к наступним обчислювальним операціям:

1. По статистичним даним про відмови елементів ремонтуємих виробів і по формулі 5.1 обчислюється параметр потоку відмов і будується гістограма $\omega_i(t)$.
2. Гістограма замінюється кривою, що апроксимується рівнянням ;
3. Знаходиться перетворення Лапласа $\omega(p)$ функції $\omega(t)$.
4. По відомій $\omega(p)$ на підставі (5.3) записується перетворення Лапласа $a(p)$ частоти відмов;
5. По відомому зображенню частоти відмов $a(p)$ знаходиться оригінал $a(t)$.
6. Визначається інтенсивність відмов по формулі:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{1 - \int_0^t a(t) dt} ; \quad (5.4)$$

Наведена методика не може бути застосована, якщо не вдається знайти по зображенню $a(p)$ оригінал $a(t)$. У цьому випадку необхідно застосовувати наближені методи рішення інтегрального рівняння. При виконанні лабораторної роботи буде отримана досить складна функція $\omega(t)$, при якій рівняння 5.2 аналітично вирішити неможливо. Тому інтегральне рівняння 5.2 будемо вирішувати чисельним методом (методом послідовних наближень) з використанням ЕОМ. Розрахункова програма написана алгоритмічною мовою Pascal.

Приклад.

У результаті експлуатації $N=100$ відновлюваних виробів отримані статистичні дані про відмови, зведені в табл. 5.1. Необхідно знайти середній наробіток до першої відмови виробу T_{cp} , ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ й інтенсивність відмов $\lambda(t)$. У нашому випадку експлуатуються вироби відновлювані, тому вони працюють у режимі зміни елементів, що відмовили. По статистичним даним про відмови можливо обчислити параметр потоку відмов. Значення $\omega(t)$, обчислені по формулі 5.1, наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

n	46	40	36	32	30	28	26	24	24	22	22	20	20	20
Δt 10^3 год.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ω , 10^{-5} 1/год.	23	20	18	16	15	14	13	12	12	11	11	10	10	10

Далі будується гістограма $\omega(t)$.

Крива $\omega(t)$, отримана в результаті згладжування гістограми, апроксимується рівнянням

$$\omega(t) = a + b \cdot \exp(-kt)$$

Знайдемо значення коефіцієнтів a, b, k .

$$\omega(0) = a + b = 23 \cdot 10^{-5}; \quad \omega(\infty) = a = 10^{-4}; \quad b = \omega(0) - a = 13 \cdot 10^{-5};$$

Визначити коефіцієнт k можливо по будь-якій крапці гістограми. Виберемо значення ω при $t=9000$.

За гістограмою знаходимо $\omega(9000) = 1,5 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Тоді

$$a + b \cdot \exp(-k \cdot 9000) = 10^{-4} + 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-k \cdot 9000) = 1,5 \cdot 10^{-4}.$$

З цієї рівності знаходимо $k = 1,22 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Таким чином, параметр потоку відмов можливо апроксимувати рівнянням

$$\omega(t) = 10^{-4} + 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-1,22 \cdot 10^{-4} t)$$

Обчислимо середній час до першої відмови виробу, використовуючи наступну властивість $\omega(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \frac{1}{T_{cp}} = a = 10^{-4} \text{ 1 / час}$$

Знайдемо ймовірність безвідмовної роботи. Спочатку, по відомій $\omega(t)$ визначимо частоту відмов $a(t)$. Скористаємося формулами 5.3.

$$\omega(p) = \int_0^{\infty} \omega(t) \exp(-pt) dt = \frac{10^{-4}}{p} + \frac{1,3 \cdot 10^{-4}}{p + 1,22 \cdot 10^{-4}}; \text{ Тоді}$$

$$a(p) = \frac{\omega(p)}{1 + \omega(p)} = \frac{10^{-5}}{p + 0,36 * 10^{-4}} + \frac{2,4 * 10^{-4}}{p + 3,36 * 10^{-4}} ; \text{ Після зворотного перетворення}$$

Лапласа одержимо:

$$a(t) = 10^{-5} \exp(-0,36 * 10^{-4} t) + 2,4 * 10^{-4} \exp(-3,36 * 10^{-4} t) ; \text{ Ймовірність безвідмовної роботи виробу буде:}$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt = 0,28 * \exp(-0,36 * 10^{-4} t) + 0,72 * \exp(-3,36 * 10^{-4} t) ;$$

Інтенсивність відмов знаходиться по формулі $\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}$.

Задача.

У результаті експлуатації N пасажирських вагонів отримані статистичні дані про відмови їх системи електропостачання. Результати спостережень зведені в таблицю 5.2. Потрібно розрахувати кількісні характеристики надійності електроустаткування пасажирських вагонів за умови миттєвого відновлення виробів, що відмовили. Зазначене допущення виконується, якщо в реальних умовах експлуатації час роботи в багато разів більше часу відновлення, що справедливо в більшості випадків.

Таблиця 5.2.

Інтервали пробігу Δl_i тис. км.	0 - 40	40 - 80	80 - 120	120 - 160	160 - 200	200 - 240	240 - 280	280 - 320	320 - 360	360 - 400
Кількість вагонів N	65	65	65	65	65	65	65	64	57	53
Кількість відмов в інтервалі пробігу n_i	8	6	5	6	7	8	11	15	14	11

Послідовність виконання завдання.

Розрахувати емпіричну функцію параметра потоку відмов $\omega^*(l)$, використовуючи формулу 5.1. Побудувати стовпчикову гістограму й апроксимувати її безупинною аналітичною функцією наступного виду:

$$\omega(l) = c * \exp(-d * l) + b * \exp\left(\frac{-(l-m)^2}{2 * \sigma^2}\right) \quad (5.5)$$

Вираз 5.5 залежить від п'яти невідомих параметрів c, λ, b, m, σ , змінюючи які можливо одержати велике сімейство кривих. Для оцінки оптимальності параметрів апроксимуючої функції $\omega(l)$ приймаємо мінімум суми квадратів відхилень теоретичної функції $\omega(l)$ від експериментальної $\omega^*(l)$. Інакше кажучи, для знаходження невідомих параметрів функції $\omega(l)$ використовується метод найменших квадратів. За допомогою цього методу знаходять невідомі параметри c, d, b, m, σ з умови мінімуму суми квадратів відхилень значень теоретичної функції $\omega(l)$ від значень емпіричної функції $\omega^*(l)$. Критерій оптимальності наближення записується у виді математичної функції:

$$S(c, d, b, m, \sigma) = \sum_{i=1}^k [\omega^*(l_i) - \omega(l_i)]^2$$
 де k – кількість крапок емпіричної функції.

Більш повно функція S п'яти невідомих параметрів запишеться так:

$$S(c, d, b, m, \sigma) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{c \exp(-d \cdot \frac{(l_i - m)^2}{2 \cdot \sigma^2})}{1} \right)^2$$

Мінімізацію функції S можливо здійснити в системі MATHCAD, використовуючи спеціальні процедури оптимізації. Для початку процесу оптимізації необхідно задати початкові наближення шуканих параметрів. Розрахуємо початкові наближення в такій послідовності. Прийmemo, що при малих значеннях пробігу явища зносу не спостерігаються і нормальна складова функції $\omega(l)$ дорівнює нулю. Тоді

$\omega^*(0) = c$
 Значення $\omega^*(1 \cdot \Delta l) = \omega^*(0) \cdot \exp(-1 \cdot \Delta l \cdot d)$ d знайдемо, використовуючи другу крапку емпіричної функції $\omega^*(l)$.
 ношення:

Тоді нульове наближення d знайдемо
 зі співвід-

$$d = \frac{-\ln\left(\frac{\omega^*(1 \cdot \Delta l)}{\omega^*(0)}\right)}{\Delta l}$$

Розглянемо крапку максимуму гістограми $\omega^*(l)$. Видно, що екстремум має місце при $l = 320$. Це значення прийmemo за нульове наближення параметра $m = 320$. Далі знайдемо нульове наближення середнього квадратичного відхилення σ нормальної складової параметра потоку, знаючи середнє значення m . По властивості нормального розподілу: $\sigma \approx \frac{m}{3}$.

Початкове наближення параметра b знайдемо з урахуванням того, що при $l = 320 = m$ експоненціальною складовою параметра потоку відмов можливо зневажити, оскільки майже усі відмови будуть пов'язані з процесом зношування. Тоді:

$$\omega^*(m) = b$$

Коли визначили початкові наближення шуканих параметрів, у MATHCAD мінімізуємо функцію S , тобто знаходимо значення параметрів c, d, b, m, σ при яких функція S досягає мінімуму. Далі потрібно побудувати графіки $\omega^*(l)$ й $\omega(l)$ в одних ко-

ординатних осях і переконалися в правильності апроксимації. Потім відкрити програму Integ. pas, написану мовою Pascal, ввести знайдені коефіцієнти теоретичної функції параметра потоку відмов і вирішити інтегральне рівняння 5.2, що зв'язує параметр потоку і частоту відмов. Програма результати розрахунку $\lambda(l), a(l), Q(l)$ записує у файл на жорсткий диск. Одержавши графіки кількісних характеристик надійності, потрібно знову повернутися в середовище MATHCAD і зчитати з файла, шлях до якого відомий, масиви числових значень $\lambda(l), a(l), Q(l)$, що були розраховані програмою Integ. pas. За значеннями нового масиву сформованого в MATHCAD потрібно побудувати чотири графіки: $\omega(l), \lambda(l), a(l), Q(l)$.

Лабораторна робота №6. "Розрахунок характеристик надійності виробів при основному з'єднанні елементів (метод середньогрупових інтенсивностей відмов)".

На практиці найбільш часто інтенсивність відмов виробів є величиною постійною. При цьому час виникнення відмов підлягає експоненціальному закону розподілу, тобто для нормального періоду роботи апаратури справедлива умова $\lambda = const$. Для визначення надійності виробу необхідно знати:

1. Число елементів з розбивкою їх по типам та режимам роботи.
2. Залежності інтенсивності відмов елементів λ_i від електричного режиму роботи і заданих зовнішніх умов.
3. Логічну структуру системи. При основному з'єднанні елементів відмова одного з них приводить до відмови всієї системи. Звідси випливає, що приймається логічно послідовне з'єднання елементів у блоки, а блоків у єдину систему. При розробці та виготовленні елементів передбачаються визначеними нормальні

умови роботи: температура $+25 \pm 10^0 \text{ } ^\circ\text{C}$, номінальний електричний режим тобто $K_n = 1$, відносна вологість $60 \pm 20\%$. Інтенсивність відмов елементів у номінальному режимі експлуатації називається номінальною інтенсивністю відмов λ_{0i} . Інтенсивність відмов елементів при експлуатації в реальних умовах λ_i дорівнює номінальній інтенсивності відмов λ_{0i} , помноженої на поправочні коефіцієнти a_i і K_i .

Для кожного електричного елемента інтенсивність відмов коректують за допомогою коефіцієнта корекції $a_i = f(t, K_n)$, що враховує одночасно вплив навколишньої температури й електричного навантаження (K_n). Значення a_i для різних елементів при різних температурах навколишнього середовища і коефіцієнті навантаження наводяться в довідковій літературі по надійності. Вібрація апаратури враховується коефіцієнтом K_1 . Ударні навантаження враховуються коефіцієнтом K_2 , вологість – коефіцієнтом K_3 , атмосферний тиск – коефіцієнтом K_4 .

Таблиця 6.1 - Поправочні коефіцієнти в залежності від впливу механічних факторів на неамортизовану апаратуру.

Умови експлуатації апаратури.	Вібрація, K_1	Ударні навантаження, K_2	Результуючий вплив, $K_1 * K_2$
-------------------------------	-----------------	----------------------------	---------------------------------

Лабораторні	1,0	1,0	1,0
Стационарні	1,04	1,03	1,07
Корабельні	1,3	1,05	1,37
Автофургони	1,35	1,08	1,46
Залізничні	1,4	1,1	1,54
Літакові	1,46	1,13	1,65

Таблиця 6.2 - Поправочний коефіцієнт, що враховує вплив вологості

Вологість, %	Температура, °C	Коригувальний коефіцієнт, K_3
60...70	20 - 40	1,0
90...98	20 - 25	2,0
90...98	30 - 40	2,5

Таблиця 6.3 - Поправочний коефіцієнт K_4 у залежності від висоти.

Висота, км	Коригувальний коефіцієнт, K_4	Висота, км	Коригувальний коефіцієнт, K_4
0...1	1,00	8...10	1,25
1...2	1,05	10...15	1,30
2...3	1,10	15...20	1,35
3...5	1,14	20...25	1,38
5...6	1,16	25...30	1,40
6...8	1,20	30...40	1,45

Розрахунок надійності виробу доцільно проводити в наступному порядку.

1. Формулюється поняття відмови. Від поняття відмови виробу залежить вибір числа елементів, що повинні враховуватися при розрахунку надійності.
2. Складається логічна схема розрахунку надійності.
3. Вибирається метод розрахунку надійності.
4. Складається таблиця розрахунку інтенсивності відмов виробу. При наявності відомостей режимів роботи елементів визначаються коефіцієнти навантаження i , використовуючи таблиці поправочних коефіцієнтів a_i , розраховують інтенсивності відмов λ_i для всіх елементів з урахуванням умов експлуатації.

Інтенсивність відмов даного типу елементів у реальних умовах роботи обчислюється по формулі:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} * a(t^0 C, K_n) * K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * I_{ucn} ;$$

де λ_{0i} - інтенсивність відмов елемента, що працює в нормальних умовах при номінальному електричному навантаженні; інші множники – це поправочні коефіцієнти, що залежать від різних факторів.

I_{ucn} – коефіцієнт використання, що дорівнює відношенню часу роботи елемента до часу роботи системи.

4. Розраховуються кількісні характеристики надійності.

Приклад.

Блок живлення складається з елементів номенклатура і режими роботи яких наведені в таблиці 6.4. Потрібно визначити середній час наробки до першої відмови та ймовірність безвідмовної роботи протягом 240 г.

Для визначення інтенсивності відмов блоку живлення заповнимо таблицю.

Таблиця 6.4.

Найменування та тип елемента.	Позначення на схемі.	Кількість елементів N_i	Інтенсивність відмов при номінальному режимі $\lambda_{0i}, 10^{-6} 1/г$	Режими роботи		Поправочний коефіцієнт a_i	$\lambda_{0i} a_i, 10^{-6} 1/г$	$\sum_{i=1}^r \lambda_{0i} a_i, 10^{-6} 1/г$
				Коефіцієнт навантаження K_n	середнє $t_{ср}$			
Резистор МЛТ, 1Вт	$R_1 - R_5$	5	1	0,2	50	0,4	0,4	2
Резистор МЛТ, 0.5 Вт	$R_6 - R_9$	4	0,5	0,8	65	1,86	0,93	3,72
Резистор ПЕВ, 10 Вт.	$R_{10} - R_{14}$	5	3,2	0,2	80	0,14	0,45	2,25
Резистор СПО, 2 Вт	R_{15}	1	1,8	0,8	50	1,38	2,48	2,48
Конденсатор МБМ	$C_1 - C_7$	7	2	0,3	50	0,38	0,76	5,32
Діоди кремнієві	$D_1 - D_{11}$	11	2	0,5	50	1,05	2,1	23,1
Трансформатори силові	$Tr1 - Tr$	3	3	1	50	5,2	15,6	46,8
Дросель	$D1$	1	1	0,8	60	4,1	4,1	4,1

$\lambda_c = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_{0i} a_i = 89,77 * 10^{-6} 1/г$ - інтенсивність відмов системи; r - кількість типів елементів.

$$P_c(240) = \exp(-\lambda_c t) = \exp(-89,77 * 10^{-6} * 240) \approx 0,98; \quad I_{ср,с} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{89,77 * 10^{-6}} = 11200г$$

Завдання для самостійного виконання.

Потрібно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи трьох каналів СІФК трифазного напівкероного тиристорного випрямного моста при $t=8000г.$, а також середній час безвідмовної роботи. Побудувати графік функції $P(t)$. Канали СІФК ідентичні по схемному рішенню і по елементній базі. Принципова схема зображена на рис.6.1. Варто врахувати, що висота не більш 1км. Вологість 60%. Температура на-

вколишнього середовища 50гр.С. Умови експлуатації стаціонарні. Коефіцієнти навантаження прийняти по таблиці 6.5 відповідно до значень, що рекомендуються для різних типів елементів при тривалому режимі роботи. Вважається, що схема має основне з'єднання елементів, тобто відмова одного з них приводить до виходу з ладу всього каналу керування. Для знаходження інтенсивності відмов усієї схеми по інтенсивностям відмов окремих елементів необхідно заповнити таблицю, показану в прикладі. Досить розрахувати ймовірність безвідмовної роботи одного каналу СІФК. Оскільки канали керування однакові, то ймовірність безвідмовної роботи трьох каналів одночасно буде дорівнювати добутку ймовірностей безвідмовної роботи всіх схем окремо. Значення інтенсивностей відмов елементів при номінальному режимі роботи наведені в довідкових таблицях. Поправочні коефіцієнти $a(t^0C, K_n)$ визначаються з таблиць при $t = 50^0C$ та заданому коефіцієнті K_n для кожного типу елемента. Коефіцієнт використання $l_{ucn} = 1$ для всіх типів елементів. Користатися додатком №3. Інтенсивності відмов тунельного діода та світлового діода прийняти рівними інтенсивності відмов точкових діодів. По специфікації прикладеної до технічної документації комплектного ЕП серії ЕТЗ обрані найменування, тип та номінальні дані елементів одного каналу керування.

VD101,VD102,VD103,VD203-діоди кремнієві випрямні точкові Д223Б; VD104-тунельний діод АИ301А

VH1-світловий діод червоний 102Б; VD201-діод випрямний точковий КД 209А.

VT121,VT122,VT123-малопотужні височастотні транзистори КТ315Е; VT202-потужний низькочастотний транзистор КТ801Б;

R101 –МЛТ-0,25-2кОм; R102,R105-0,25-10кОм; R103-МЛТ-0,25-20кОм; R104-0,25-510Ом; RP106-СП2-111кОм;

R107-МЛТ-0,25-510Ом; R108-МЛТ-0,25-100Ом;R109-МЛТ-0,5-2кОм; R202-МЛТ-0,5-200Ом; R201-МЛТ-2-56Ом;

R204-МЛТ-2-100Ом;R3-МЛТ-0,5-100Ом.

3101-МБМ-160В-10мкф; C1-МБМ-160В-0,1мкф – конденсатори металопіперові.

3102,C103-КД-2а-н70-4700пф-конденсатори керамічні.

T201-МИТ-4В - трансформатор імпульсний.

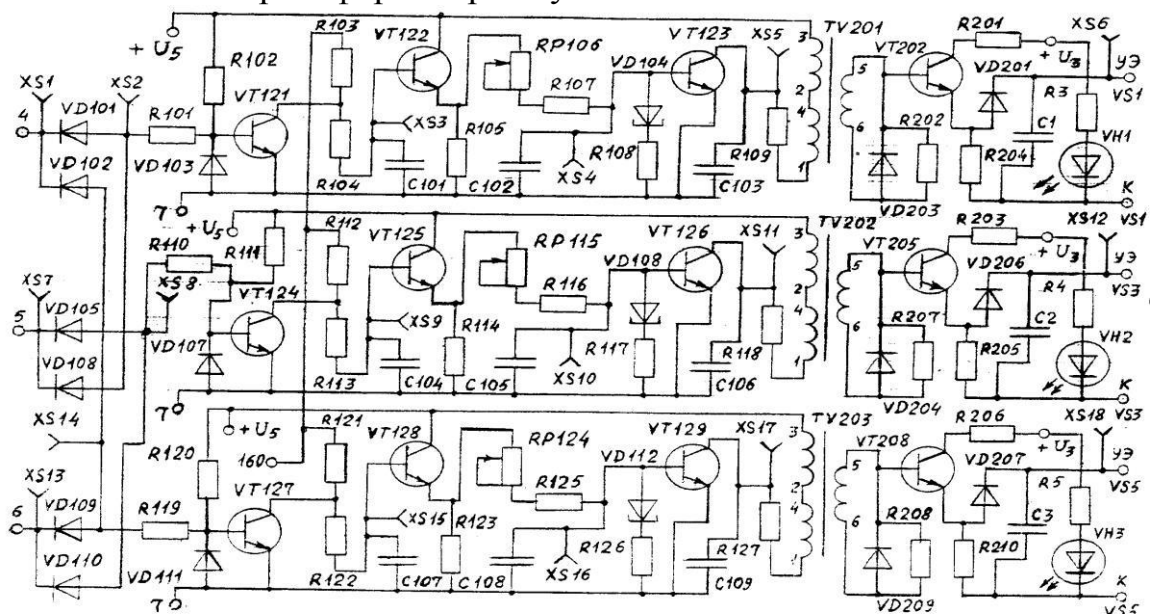


Рисунок 6.1

Таблица 6.5.

Элемент	Определяющий параметр		Расчетная формула	Рекомендуемые значения K_n в зависимости от режимов работы	
	Характеристика	Обозначение		кратковременный	длительный
Резисторы	Мощность рассеивания	P	$K_n = P_{\Phi}/P_{\text{доп}}$	0,6	0,4
Резисторы теплостойкие (типа МТЕ)	Мощность рассеивания	P	$K_n = P_{\Phi}/P_{\text{доп}}$	0,8	0,7
Полупроводниковые диоды	Средний выпрямленный ток	I	$K_n = I_{\Phi}/I_{\text{доп}}$	0,7	0,5
	Обратное напряжение	$U_{\text{об}}$	$K_n = U_{\text{об.}\Phi}/U_{\text{об.}\text{доп}}$	0,5	0,4
Транзисторы	Мощность рассеивания на переходах	P	$K_n = P_{\Phi}/P_{\text{доп}}$	0,5	0,3
Конденсаторы	Приложенное напряжение	U	$K_n = U_{\Phi}/U_{\text{доп}}$	0,5	0,3
Трансформаторы	Рабочая мощность первичной обмотки	S_1	$K_n = S_{1\Phi}/S_{1\text{доп}}$	0,6	0,5
Катушки индуктивности, дроссели	Плотность тока в обмотках	j	$K_n = j_{\Phi}/j_{\text{доп}}$	0,7	0,5
Коммутационные элементы (переключатели, разъемы и т. д.)	Ток через контакты	I_k	$K_n = I_{k\Phi}/I_{k\text{доп}}$	0,8	0,6
Реле, контакторы, магнитные пускатели	Ток через контакты	I	$K_n = I_{\text{раб}}/I_k$	0,8	0,6
Электрические машины (двигатели, генераторы)	Рабочая мощность	P_p	$K_n = P_{p\Phi}/P_{p\text{доп}}$	0,9	0,85
Вращающиеся трансформаторы	Напряжение возбуждения	U_v	$K_n = U_{v\Phi}/U_{v\text{доп}}$	0,9	0,7
Тахогенераторы	Напряжение возбуждения	U_v	$K_n = U_{v\Phi}/U_{v\text{доп}}$	0,9	0,8
Сельсены:	Ток возбуждения	I_v	$K_n = I_{v\Phi}/I_{v\text{доп}}$	0,9	0,8
в трансформаторном режиме	Рабочая мощность	P	$K_n = P_{\Phi}/P_{\text{доп}}$	0,9	0,8
в индуктивном режиме					

Лабораторна робота №7 "Розрахунок надійності всипної обмотки асинхронних двигунів".

У переважній більшості випадків (85-95%) відмови АД відбуваються завдяки ушкодженню обмотки, 2-5% електродвигунів відмовляють через ушкодження підшипників. Відмови по характеру ушкодження обмоток розподіляються у такій послідовності:

межвиткові замикання . . . 93% пробій
 міжфазної ізоляції . . . 5% ушкодження та
 пробій пазової ізоляції . . . 2%

З наведених даних видно, що головним елементом конструкції асинхронного двигуна, що майже цілком визначає його надійність, є обмотка. При цьому надійність обмотки практично цілком залежить від відмов пов'язаних з пробоем міжвиткової ізоляції. Тому доцільно в першу чергу розглянути математичну модель надійності міжвиткової ізоляції для всього періоду експлуатації АД. Відмова обмотки визначається виникненням міжвиткового замикання, тому природно найбільш показовою характеристикою треба вважати величину пробивної напруги міжвиткової ізо-

ляції. Зміна інших характеристик міжвиткової ізоляції (опору ізоляції, механічних властивостей, тангенса кута втрат) у підсумку приводить до зменшення пробивної напруги і пробою ізоляції. Тому пробивну напругу міжвиткової ізоляції приймають за характеристику, що визначає надійність обмотки. Пробивна напруга всіх пар сусідніх провідників підлягає фіксованому розподілу ймовірностей. Кількісні характеристики закону розподілу пробивної напруги (математичне чекання і середньоквадратичне відхилення) залежать від часу експлуатації і пов'язані з явищем теплового старіння обмотки, що приводить до погіршення її якості. Відмова відбувається тоді, коли напруга, прикладена до сусідніх провідників, перевищує пробивну напругу міжвиткової ізоляції. Ймовірність того, що міжвиткова ізоляція не проб'ється, буде дорівнювати ймовірності того, що пробивна напруга міжвиткової ізоляції перевищує прикладену до неї напругу. Для успішної роботи виробу (обмотки) необхідна справність усіх її елементів (пара провідників). У цьому розумінні обмотка представляє систему з послідовним з'єднанням елементів.

Якщо позначити число ефективних провідників в обмотці асинхронного двигуна N , то число елементів моделі n можна визначити по формулі

$$n \approx 2,7 * N \quad \text{де } N = scz \quad (7.1)$$

s – число ефективних провідників у секції;

c – число сторін секцій у пазу (для одношарової обмотки $c = 1$, для двошарової $c = 2$);

z – число пазів.

Математична модель надійності міжвиткової ізоляції обмотки має наступний вигляд:

$$P = \frac{\ln(U \phi^k)}{0,98s - 1,6} * \sum_{l=1}^{s-1} \left[1 - \frac{\ln\left(\frac{U \phi^k}{s}\right)}{\ln(U \phi^k)} \right] * \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\frac{U \phi^k}{s}} \exp\left(-\frac{\left(\frac{U}{\sigma} - \frac{U}{\sigma}\right)^2}{2\sigma^2}\right) dU \right]^n \quad (7.2)$$

де $l = 1, 2, \dots, s - 1$

U_σ – пробивна напруга міжвиткової ізоляції; $U_\phi = \frac{3 * U_{\phi n}}{z}$ – напруга прикладена до

секції; $U_{\phi n}$ – фазна напруга обмотки; k – кратність комутаційних перенапруг; U_{cp} – середнє значення в законі розподілу пробивної напруги міжвиткової ізоляції; σ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини пробивної напруги від її середнього значення.

У завданні потрібно розрахувати надійність міжвиткової ізоляції асинхронних двигунів єдиної серії АТ2-12-2, АТ2-22-2, АТ2-32-2. при просоченні їх обмоток лаками марок КП-18, ПФЛ-8В, МЛ-92 у початковому стані та через 5, 10, 15 і 20 тис. г. експлуатації. У таблиці 7.1 наведені значення параметрів закону розподілу пробив-

ної напруги міжвиткової ізоляції у початковому стані і при експлуатації в процесі теплового старіння при робочій температурі 120°C . В таблиці 7.2 наведені розрахункові дані обмоток.

Таблиця 7.1.

Час старіння, г.	Просочувальний лак					
	КП-18		ПФЛ-8В		МЛ-92	
	$U_{cp}, \text{В}$	$\sigma, \text{В}$	$U_{cp}, \text{В}$	$\sigma, \text{В}$	$U_{cp}, \text{В}$	$\sigma, \text{В}$
Початковий стан	8440	1460	8040	1370	9380	1100
5000	8000	1360	7800	1170	6750	1520
10000	5800	1600	5800	1740	4100	1250
15000	3600	1190	2900	1060	1450	560
20000	1400	540	-	-	-	-

Для розрахунку надійності прийняти кратність комутаційних перенапруг $k = 5$.

Таблиця 7.2.

Тип електродвигуна	Кількість проводників у секції, s	Число пазів, z	Число сторін секцій у пазу.
АО2-12-2	78	24	1
АО2-22-2	55	24	1
АО2-32-2	44	24	1

Потрібно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи (надійність) міжвиткової ізоляції обмотки для одного типу двигунів, побудувати графіки $P(t)$ та зробити висновок про якість просочувальних лаків.

Лабораторна робота №8. "Розрахунок надійності резервованих систем".

Теоретичні відомості.

Наведемо розрахункові формули для різних видів резервування.

1. *Загальне резервування з постійно відкритим резервом з цілою кратністю.*

$$P_c(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]^{m+1} \quad (8.1)$$

де $p_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента протягом часу t ; n – число елементів основної чи будь-якої резервної системи; m – число резервних систем (кратність резервування).

При експоненціальному законі надійності, коли $p_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$,

$$P_c(t) = 1 - [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^{m+1} \quad (8.2)$$

$$T_c = \frac{1}{\sum_{i=0}^m \lambda_0 i + 1} = T_0 * \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} \quad (8.3)$$

де $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ - інтенсивність відмов нерезервованої системи та кожної з m резервних систем; T_0 - середній час безвідмовної роботи нерезервованої системи чи кожної з m резервних систем.

2. *Загальне резервування заміщенням з цілою кратністю.*

$$P_{m+1}(t) = P_m(t) + \int_0^t P(t-\tau) a_m(\tau) d\tau \quad (8.4)$$

де $P_{m+1}(t), P_m(t)$ - ймовірності безвідмовної роботи резервованої системи кратності $m+1$ та m відповідно; $P(t-\tau)$ - ймовірність безвідмовної роботи основної системи протягом часу $(t-\tau)$; $a_m(\tau)$ - частота відмов резервованої системи кратності m в момент часу τ . Рекурентна формула (8.4) дозволяє одержати розрахункові співвідношення для пристроїв будь-якої кратності резервування. Для одержання таких формул необхідно виконати інтегрування в правій частині, підставивши замість $P(t-\tau)$ і $a_m(\tau)$ їх значення відповідно до обраного закону розподілу.

При експоненціальному законі надійності та ненавантаженому резерві

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_0 t) * \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} \quad (8.5)$$

$$T_c = T_0 * (m+1) \quad (8.6)$$

де λ_0, T_0 - інтенсивність відмов і середній наробіток до першої відмови основного пристрою.

При експоненціальному законі і недовантаженому резерві

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_0 t) * \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} (1 - \exp(-\lambda_i t)) \right] \quad (8.7)$$

$$T_c = \frac{1}{\lambda_0} * \sum_{i=0}^m \frac{1}{1 + i * k} \quad (8.8)$$

де $a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_j}{\lambda_1} \right)$; $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$; λ_1 - інтенсивність відмов резервного пристрою до заміщення.

3. *Роздільне резервування з постійно увімкненим резервом з цілою кратністю.*

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left[1 - [1 - p_i(t)]^{m_i+1} \right] \quad (8.9)$$

де $p_i(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента; m_i - кратність резервування i -го елемента; n - кількість елементів основної системи.

При рівнонадійних елементах та однаковій кратності їхнього резервування

$$P_c(t) = \left[1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^{m+1} \right]^n \quad (8.10)$$

$$T_c = \int_0^\infty P_c(t) dt = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} * \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i(v_i+1) \dots (v_i+n-1)} ; \text{ де } v_i = \frac{i+1}{m+1} \quad (8.11)$$

4. Роздільне резервування заміщенням з цілою кратністю.

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \quad (8.12)$$

де $p_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи системи обумовлену відмовами елементів i -го типу, резервованих по способу заміщення. Обчислюється $p_i(t)$ по формулам загального резервування заміщенням (формули (8.4), (8.5), (8.6)).

5. Загальне резервування з дробовою кратністю та постійно увімкненим резервом.

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i p_0^{l-i}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j p_0^j(t) \quad (8.13)$$

$$T_c = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{l-h} \frac{1}{h+i} \quad (8.14)$$

де $p_0(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи основного чи будь-якого резервного елемента; l – загальне число основних і резервних систем; h – число систем, необхідних для нормальної роботи резервованої системи. У даному випадку кратність резервування $m = (l - h) / h$.

6. Ковзальне резервування:

При експоненціальному законі надійності

$$P_c(t) = \exp(-n\lambda t) \left[1 + n\lambda t + \frac{(n\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(n\lambda t)^{m_0}}{m_0!} \right] = \exp(-n\lambda t) \sum_{i=0}^{m_0} \frac{(n\lambda t)^i}{i!} \quad (8.15)$$

$$T_c = T(m_0 + 1) \quad (8.16)$$

λ – інтенсивність відмов елемента; n – число елементів основної системи; T_0 – середній час безвідмовної роботи нерезервованої системи; m_0 – кількість резервних елементів. У цьому випадку кратність резервування $m = m_0 / n$.

Наведені вище формули крім (8.4) можуть бути використані тільки в тих випадках, коли справедливе допущення про відсутність післядії відмов. Післядія відмов має місце практично завжди при постійному включенні резерву, а також у випадку резервування заміщенням при недовантаженому резерві.

Завдання.

1. Дано систему, схема розрахунку надійності якої зображена на рисунку 8.1. Необхідно знайти ймовірність безвідмовної роботи системи при відомих ймовірностях безвідмовної роботи її елементів (значення ймовірностей зображені на малюнку).

З малюнка видно, що система складається з двох (1 і 2) нерівнонадійних пристроїв.

Пристрій 1 складається з чотирьох вузлів:

а – дубльований вузол з постійно включеним загальним резервуванням.

б – дубльований вузол при загальному резервуванні заміщенням.

в – один нерезервований елемент

г – резервований вузол із кратністю $m = 1/2$

Пристрій 2 являє собою нерезервований пристрій, надійність якого відома.

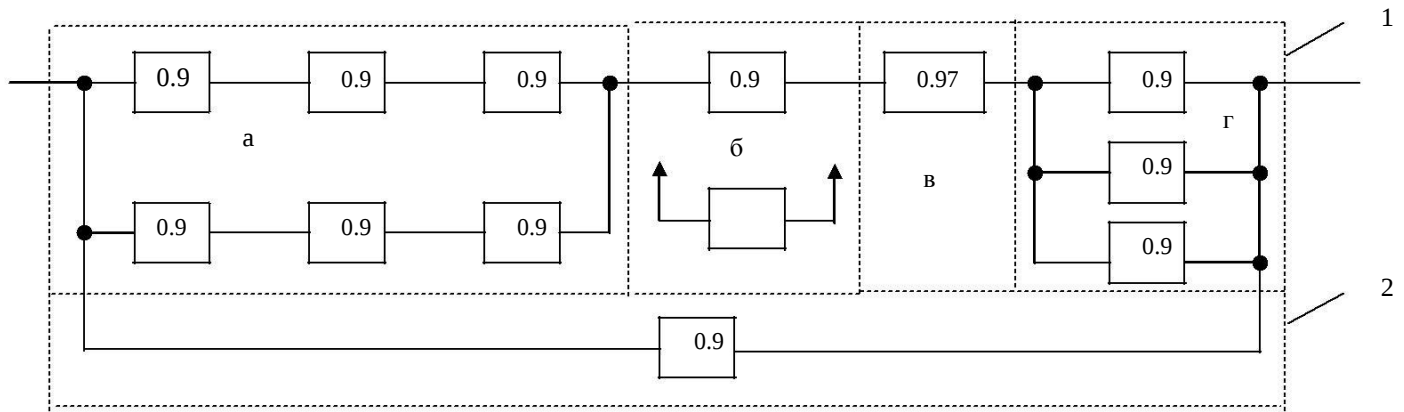


Рисунок 8.1

Ймовірність безвідмовної роботи пристрою 1 дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи усіх вузлів тобто

$$P_1 = P_a P_b P_v P_z$$

У вузлі *a* число елементів основного і резервного ланцюга $n = 3$, а кратність резервування $m = 1$. Тоді p_a обчислюється на підставі формули (8.1). У вузлі *б* кратність загального резервування заміщенням $m = 1$. Ймовірність p_b обчислюється по формулі (8.5). При цьому варто врахувати, що $\exp(-\lambda_0 t) = 0.9$, $\lambda_0 t \approx 0.1$. У вузлі *г* застосоване резервування з дробовою кратністю, коли загальне число основних та резервних систем $l = 3$, число систем, необхідних для нормальної роботи, $h = 2$. Ймовірність безвідмовної роботи вузла *г* розраховується по формулі (8.13). Ймовірність безвідмовної роботи всієї системи знаходиться по формулі ймовірності безвідмовної роботи паралельно з'єднаних пристроїв 1 і 2.

2. Система складається з 10 рівнонадійних елементів, середній наробіток до першої відмови $T_{c\epsilon}$ елемента дорівнює 1000 г. Передбачається, що справедлив експоненціальний закон надійності для елементів системи, основна та резервна системи рівнонадійні. Необхідно знайти середній наробіток до першої відмови T_c системи, а також частоту відмов $a_c(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$ у момент часу $t = 50г$. в наступних випадках :

- нерезервована система .
- дубльована система при загальному, постійно увімкненому резерві.
- дубльована система при включенні загального резерву по способу заміщення.

Середній час безвідмовної роботи нерезервованої системи знаходиться виходячи із середнього часу безвідмовної роботи одного елемента. Середній час безвідмовної роботи у випадках *б* і *в* знаходиться по формулам (8.3) і (8.6) при кратності резервування $m = 1$ і відомому часу безвідмовної роботи нерезервованої системи. Інтенсивність і частота відмов для нерезервованої системи і для будь-якого варіанта резервованої системи знаходяться по відомій ймовірності безвідмовної роботи системи. Для випадків *б* і *в* ймовірність безвідмовної роботи знаходиться по формулам

(8.2) і (8.5). Далі частота й інтенсивність відмов знаходяться по відомим формулам, що зв'язують ймовірність безвідмовної роботи, частоту й інтенсивність відмов.

3). Радіопередавач має інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0.4 \cdot 10^{-3} 1/\text{год}$. Його дублює такий же передавач, що знаходиться до відмови основного в режимі чекання (у недовантаженому резерві). У цьому режимі інтенсивність відмов передавача $\lambda_1 = 0.06 \cdot 10^{-3} 1/\text{год}$. Потрібно обчислити ймовірність безвідмовної роботи передавальної системи протягом $t = 100 \text{ год}$, а також середній наробіток до першої відмови й інтенсивність відмов.

У даному випадку маємо загальне резервування при недовантаженому резерві, кратність резервування дорівнює одиниці. Тому для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи і середнього наробітку до першої відмови варто скористатися формулами (8.7) і (8.8). Для розрахунку інтенсивності відмов скористатися співвідношенням

$$\lambda_c(t) = \frac{-dP_c(t)/dt}{P_c(t)} ;$$

4). Схема розрахунку надійності пристрою наведена на рис. 8.2. Передбачається, що

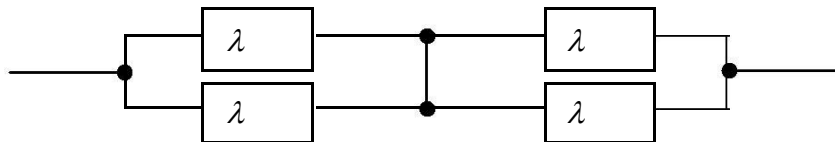


Рисунок 8.2.

післядія відмов відсутня і всі елементи розрахунку рівнонадійні. Інтенсивність відмов елемента $\lambda = 1.35 \cdot 10^{-3} 1/\text{год}$. Потрібно визначити наробіток до першої відмови резервованого пристрою.

У даному випадку має місце роздільне резервування рівнонадійних пристроїв з постійно увімкненим резервом. Для обчислення середнього наробітку до першої відмови необхідно скористатися формулою (8.11)

5). Система електропостачання складається з чотирьох генераторів, номінальна потужність кожного з яких $W = 18 \text{ кВт}$. Безаварійна робота ще можлива, якщо система електропостачання може забезпечити споживача потужністю 30 кВт . Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи електропостачання протягом часу $t = 600 \text{ год}$, якщо інтенсивність відмов кожного з генераторів $\lambda = 0.15 \cdot 10^{-3} 1/\text{год}$. Необхідно також знайти середній наробіток до першої відмови системи електропостачання.

6). На рис. 8.3 зображені дві схеми резервування діодів. Відомо, що інтенсивність відмов діодів $\lambda = 0.5 \cdot 10^{-6} 1/\text{год}$, ймовірність відмов типу “пробій” $\phi_3 = 0.85$, а час безупинної роботи схеми $t = 5000 \text{ год}$. Передбачається, що післядія відмов відсутня. Необхідно з'ясувати яка схема краще в розумінні її надійності. Для цього необ-



Рисунок - 8.3. Схеми резервування діодів:

А - послідовно-паралельне з'єднання; Б – паралельно-послідовне з'єднання.

хідно обчислити виграш надійності $G_q(t) = \frac{Q_a(t)}{Q_o(t)} = \frac{1 - P_a(t)}{1 - P_o(t)}$; де $P_a(t), P_o(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи діодних схем А і Б.

Знайдемо ймовірність безвідмовної роботи схем рис. 8.3. Можливі два види відмов: пробій та обрив. Сприятливі ситуації які не приводять до відмови схеми А виникають у наступних випадках :

А – усі діоди справні; ймовірність цієї гіпотези дорівнює $p^4(t)$.

Б - один будь-який діод відмовив (або обрив, або пробій), а інші справні; ймовірність гіпотези дорівнює $4q(t)p^3(t)$; При цьому яка саме відмова відбулася не уточнюється.

В – Один будь-який діод відмовив по обриву, а другий по замиканню, інші два діоди справні; ймовірність гіпотези буде $12\phi_o \phi_z q^2(t)p^2(t)$; Ймовірність пробою діода дорівнює добутку двох ймовірностей $q(t)\phi_z$ (появі одночасно двох подій): ймовірності того, що відмова виникне $q(t)$ та ймовірності того, що відмова буде типу пробою ϕ_z . Ймовірність обриву буде $q(t)\phi_o$; ϕ_o – ймовірність того, що відмова буде обривом. Кількість можливих варіантів події В дорівнює дванадцяти.

$$\phi_o = 1 - \phi_z$$

Г – Два діоди відмовили по обриву, а інші справні; ймовірність гіпотези $2\phi_o^2 q^2(t)p^2(t)$;

Д – Два діоди відмовили по пробою, а інші справні; ймовірність гіпотези $4\phi_z^2 q^2(t)p^2(t)$;

Е - Один діод справний, два відмовили по обриву, а один – по пробою; ймовірність гіпотези $4\phi_o^2 \phi_z q^3(t)p(t)$;

Ж – Один діод справний, два відмовили по пробою, а один відмовив по обриву; ймовірність гіпотези $8\phi_o \phi_z^2 q^3(t)p(t)$.

Підсумовуючи ймовірності гіпотез, одержимо ймовірність безвідмовної роботи діодної схеми рис. 8.3,А:

$$P_a(t) = P_A + P_B + P_V + P_\Gamma + P_D + P_E + P_\text{Ж}$$

Схема рис.8.3,Б не відмовить у тих же ситуаціях, що і схема рис.8.3,А, тільки число гіпотез Г, Д, Е, Ж буде інше. Гіпотези А, Б, В та їх число не зміняться. Записати ймовірності гіпотез Г, Д, Е, Ж для схеми рис.8.3,Б самостійно. Ймовірність безвідмовної роботи схеми рис.8.3,Б дорівнює сумі ймовірностей усіх станів схеми, при яких вона залишається працездатною.

Ймовірність безвідмовної роботи одного діода дорівнює $p(t) = \exp(-\lambda t)$. Знайшовши ймовірність безвідмовної роботи одного діода к моменту часу $t = 5000\text{г.}$, а та-кож ймовірність відмови $q(t)$ для цього моменту часу можна обчислити $P_a(t)$ й $P_o(t)$

і далі знайти виграш надійності по ймовірності відмов. Знайти виграш надійності як функцію часу і побудувати її графік. Звичайно через α позначають частину відмов заданого типу елементів обумовлену обривами. Тоді $\beta = 1 - \alpha$ визначає частину відмов елементів при коротких замиканнях.

Завдання

Частота відмов генераторів постійного струму, що входять у систему електропостачання пасажирських вагонів має наступну аналітичну залежність

$$a(l) = 0.002607 * \exp(-0.011 * l) + 0.00334 * \exp\left(\frac{-(l - 312.9)^2}{2 * 101.16}\right)$$

гу пасажирських вагонів у тис. км.

Потрібно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи основної (нерезервованої) системи, яка складається з двох логічно послідовно з'єднаних генераторів, а також розрахувати:

- Ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи у випадку загального резервування заміщенням із кратністю $m=1$ (дублювання).
- Ймовірність безвідмовної роботи системи з роздільним резервуванням заміщенням і кратністю $m=1$
- Ймовірність безвідмовної роботи системи у випадку ковзального резервування з кількістю резервних елементів рівних двом.

Потрібно порівняти якість резервування в трьох варіантах і визначити який вид резервування при однаковій складності резервованих систем (що спостерігається в нашому випадку) забезпечує найбільший рівень надійності.

Ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи у випадку загального резервування заміщенням при довільному законі розподілу ймовірності появи відмов окремих пристроїв визначається по формулі:

$$P_1(l) = P_0(l) + \int_0^l a_0(l - \tau) P_0(\tau) d\tau \text{ де } P_0(l), a_0(l) - \text{ймовірність безвідмовної роботи та частота відмов основної системи, яка складається з двох логічно послідовно з'єднаних генераторів. Оскільки у вираз для частоти відмов одного генератора входить нормальна складова обчислити ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи } P_1(l) \text{ аналітично неможливо. Тому інтеграли потрібно замінити наближеними сумами. Порядок розв'язування задачі за умовою пункту а) наступний:}$$

1. Знаходимо ймовірність безвідмовної роботи одного генератора по формулі $P(l) = 1 - \int_0^l a(\tau) d\tau$; Перемножуємо дані ймовірності й одержуємо ймовірність безвідмовної роботи основної системи, яка складається з двох послідовно з'єднаних пристроїв. Щоб одержати частоту відмов основної системи потрібно продиференціювати з зворотним знаком ймовірність її безвідмовної роботи. Тоді:

$$P(l) = P(l)_2 \quad ; \quad a(l) = -\frac{d}{dl} (P(l))$$

Значення $a_0(l)$ можливо знайти, замінивши похідну найпростішою різницевою формулою $a_0(i\Delta l) = -\frac{(P_0((i+1)\Delta l) - P_0(i\Delta l))}{\Delta l}$;

$$P(l) = P(l)_2 \quad ; \quad a(l) = -\frac{d}{dl} (P(l))$$

Значення $a_0(l)$ можливо знайти, замінивши похідну найпростішою різницевою формулою $a_0(i\Delta l) = -\frac{(P_0((i+1)\Delta l) - P_0(i\Delta l))}{\Delta l}$;

Ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи необхідно обчислити по наближеній формулі:

$$P_1(n \Delta l) = P_0(n \Delta l) + \sum_{i=0}^n a_0 [(n-i)\Delta l] * P_0(i\Delta l) * \Delta l$$

де n – номер елементарного інтервалу, на якому на даному кроці знаходиться ймовірність безвідмовної роботи. $l = 0 - 440 \text{ тыс. км.}$ – діапазон зміни величини пробігу. $\Delta l = \frac{440}{N}$ – довжина елементарного інтервалу. N – загальна кількість інтервалів

на які розбивається увесь діапазон зміни l . Для забезпечення малого часу розрахунків потрібно прийняти в межах $N = 200$. Далі на кожному кроці $n = 0 \dots N$ обчислюють наближене значення інтеграла у вигляді записаної суми. У підсумку одержують N значень ймовірності безвідмовної роботи резервованої системи. По знайденому масиву значень будують графік.

2. У варіанті б) застосовується та ж розрахункова формула і наближена сума, що й у випадку а). Однак потрібно врахувати, що при резервуванні заміщенням резервується по методу заміщення кожен окремий елемент системи тобто $P_0(l) = P(l)$,

$a_0(l) = a(l)$. Оскільки всі елементи рівнонадійні, як основні так і резервні, то досить знайти ймовірність безвідмовної роботи одного елемента основної системи за резервованого по способу заміщення, а далі підвести отриману ймовірність безвідмовної роботи до квадрату. Тобто ймовірність безвідмовної роботи системи з розділним резервуванням заміщенням визначиться по формулі:

$$P_1(n \Delta l) = \left(P(n \Delta l) + \sum_{i=0}^n a[(n-i)\Delta l] * P(i\Delta l) * \Delta l \right)^k$$

| k – кількість елементів основної системи.

Обчислюючи значення ймовірності безвідмовної роботи в тих же вузлах, що й у випадку а) (це значить при однакових N і Δl) знаходимо масив значень $P_1(n\Delta l)$, по якому будується графік. $n = 0 \dots N$

При ковзальному резервуванні, коли в резерві знаходиться один елемент, ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи знаходиться по формулі

$$P_1(l) = P_k(l) + k * P_{k-1}(l) * \int_0^l a(\tau) * P(l - \tau) d\tau$$

Коли в ковзному резерві знаходяться два елементи, ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи визначається по формулі:

$$P_2(l) = P_1(l) + k_2 * P_{k-1}(l) * \int_0^l a(\tau) * \left| \int_{l-\tau}^l a(\varepsilon - \tau) * P(l - \varepsilon) d\varepsilon \right| d\tau$$

де $a(l), P(l)$ – частота та ймовірність безвідмовної роботи окремих елементів основної системи.

$P_1(l)$ – ймовірність безвідмовної роботи системи у якій в ковзному резерві знаходиться один елемент. $k = 2$ – число елементів основної системи.

Кількість елементарних інтервалів і довжина кожного інтервалу залишаються тими, що й у випадках а) і б). Ймовірність $P_2(l)$ можливо знайти, тільки знаючи ймовірність $P_1(l)$. Інтеграли замінюються наближеними сумами.

$$P_1(n\Delta l) = P_k(n\Delta l) + k * P_{k-1}(n\Delta l) * \sum_{i=0}^n a(i\Delta l) * P((n-i)\Delta l) * \Delta l$$

$$P_2(n\Delta l) = P_1(n\Delta l) + k^2 * P^{k-1} \sum_{i=0}^n \left[\sum_{j=i}^n (n\Delta l) * \sum a(i\Delta l) * \sum a((j-i)\Delta l) * P((n-j)\Delta l) * \Delta l \right] * \Delta l$$

Обчисливши масиви значень $P_1(n\Delta l)$ і $P_2(n\Delta l)$, потрібно побудувати графіки ймовірностей безвідмовної роботи для випадку одного і двох елементів, що знаходяться в ковзному резерві. По графіках, отриманим у всіх трьох пунктах задачі необхідно зробити висновок який з способів резервування найбільш ефективний, тобто забезпечує найбільшу надійність системи при однакових резервних ресурсах.

Задача.

Мається нерезервована система, що складається з п'яти блоків. Ймовірності відмови блоків наступні: $q_1 = 0,2; q_2 = 0,3; q_3 = 0,4; q_4 = 0,5; q_5 = 0,56$. Вага кожного блоку дорівнює: $c_1 = 5\text{кг}; c_2 = 3\text{кг}; c_3 = 2\text{кг}; c_4 = 4\text{кг}; c_5 = 1\text{кг}$. Потрібно резервувати систему так, щоб вага її не перевищувала 60кг , а ймовірність безвідмовної роботи була максимальною. Вирішити задачу (знайти вектор складу системи) методом множників Лагранжа.

Лабораторна робота №9. "Розрахунок надійності відновлюваних виробів. (Метод простору станів)".

Приклад1.

Система складається з двох блоків з інтенсивністю відмов $\lambda = 0.011/\text{год.}$ кожний. Інтенсивність відновлення $\mu = 1/\text{год.}$ Систему обслуговує одна ремонтна бригада. При непрацездатності якого-небудь із двох блоків система непрацездатна. При цьому система не відключається, і в справному блоці можуть відбуватися відмови. Визначити значення коефіцієнтів готовності та простою.

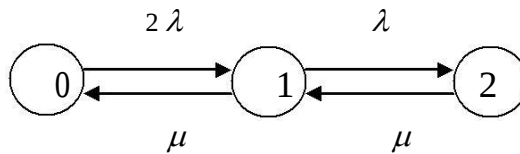


Рисунок 9.1

Розв'язання

Система може знаходитися в таких станах:

0 – обидва блоки працездатні.

1-один блок відмовив (система непрацездатна)

2- два блоки відмовили (система непрацездатна)

Граф станів показаний на рис. 9.1.

Цьому графу відповідає наступна система рівнянь Колмогорова:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_2(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t)$$

Оскільки необхідно визначити K_{Γ} і K_{Π} , то система рівнянь перепишеться при $t \rightarrow \infty$

$$0 = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

$$0 = 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_2(t)$$

$$0 = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t)$$

З урахуванням нормувальної умови $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ одержимо такі рішення системи рівнянь:

$$K_{\Gamma} = P_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2}; \quad P_1 = \frac{2\mu\lambda}{\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2}; \quad P_2 = \frac{2\lambda^2}{\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2}$$

Коефіцієнт простою дорівнює:

$$K_{\Pi} = P_1 + P_2 = \frac{2\mu\lambda + 2\lambda^2}{\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2}$$

Підставляючи числові значення одержимо $K_{\Gamma} = 0.99$, $K_{\Pi} = 0.01$

Приклад 2.

Система складається з основного блоку та блоку в навантаженому резерві. Інтенсивність відмов основного і резервного блоків $\lambda = 0.008$ 1/год., а інтенсивність відновлення $\mu = 0.1$ 1/год. Є дві чергові ремонтні бригади. Визначити ймовірність перебування системи в стані відмови через три години після початку експлуатації.

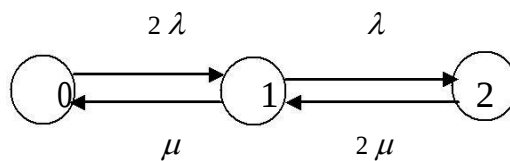


Рисунок 9.2

Розв'язання.

Система може знаходитися в таких станах:

0 – обидва блоки справні.

1 – один блок відмовив

2 – обидва блоки відмовили

Граф станів системи зображений на рис.9.2.

Рівняння динаміки ймовірносного процесу (рівняння Колмогорова) запишуться по виду графа станів у наступному вигляді:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t)$$

Початкові умови: $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0, P_2(0) = 0$. Перейдемо до зображень Лапласа:

$$(s + 2\lambda)P_0(s) - \mu P_1(s) = 1$$

$$-2\lambda P_0(s) + (s + \lambda + \mu)P_1(s) - 2\mu P_2(s) = 0$$

$$-\lambda P_1(s) + (s + 2\mu)P_2(s) = 0$$

Для визначення $P_i(s)$ скористаємося методом Крамера рішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь: $P_i(s) = \frac{\Delta_i}{\Delta}$

$$\Delta = \begin{vmatrix} s + 2\lambda & -\mu & 0 \\ -2\lambda & s + \lambda + \mu & -2\mu \\ 0 & -\lambda & s + 2\mu \end{vmatrix} \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} s + 2\lambda & -\mu & 1 \\ -2\lambda & s + \lambda + \mu & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 \end{vmatrix}$$

Функція простою дорівнює ймовірності $P_2(t)$ оскільки існує тільки один стан відмови – другий стан.

$$P_2(s) = \frac{2\lambda^2}{s(s^2 + 3(\lambda + \mu)s + 2\lambda^2 + 4\lambda\mu + 2\mu^2)}$$

Перейдемо від зображення до оригіналу функції й одержимо

$$P_2(t) = \Pi(t) = \frac{\lambda_2}{(\lambda + \mu)^2} \{1 - 2 \exp[-(\lambda + \mu)t] + \exp[-2(\lambda + \mu)t]\}$$

При $t = 3$ одержимо $P_2(3) = \Pi(3) = 0.0002$

При $t \rightarrow \infty$

$$K_{\Pi} = 0.0015$$

Задачі.

1. Генератор пилоподібної напруги складається з основного блока, одного резервного блока в навантаженому резерві й одного блока в ненавантаженому резерві. При відмові основного блока чи блока в навантаженому резерві блок з ненавантаженого резерву переводиться в навантажений. Відомо, що кожен блок має $\lambda = 0.001$ 1/год., $\mu = 0.11$ /год. Є одна ремонтна бригада. Визначити ймовірності перебування системи в кожному з можливих станів, ймовірність знайти систему в справному стані в будь-який момент часу (функція готовності), ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнти готовності і простою.
2. Система складається з двох однакових основних блоків і одного блока в навантаженому ковзному резерві. Для кожного блоку $\lambda = 0.01$ 1/год., $\mu = 0.1$ 1/год. і є дві ремонтні бригади. Визначити функції готовності і простою, коефіцієнти готовності і простою, ймовірність безвідмовної роботи відновлюваної системи.

3. Розрахувати надійність (функцію готовності) комірки резервування тиристорів, за умови, що вони піддані двом видам відмов: коротким замиканням та обривам. Інтенсивність відновлення тиристора не залежить від причини його відмови. Схема з'єднання тиристорів показана на рис. 9.3. Інтенсивність відмов тиристорів складається з двох компонентів $\lambda = \lambda_o + \lambda_s$. $\lambda_o = 0.05$, $\lambda_s = 0.03$, де λ_o, λ_s – інтенсивності відмов завдяки обривам і коротким замиканням відповідно, $\mu = 0.1$.

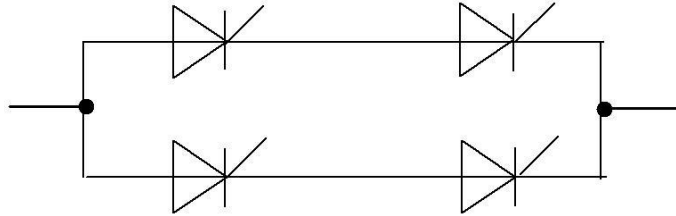


Рисунок 9.3

Дана схема справна, якщо працездатний хоча б один тиристор і при цьому відсутні два коротких замикання в одній гілці чи два обриви в сусідніх гілках. Тоді можливі наступні стани:

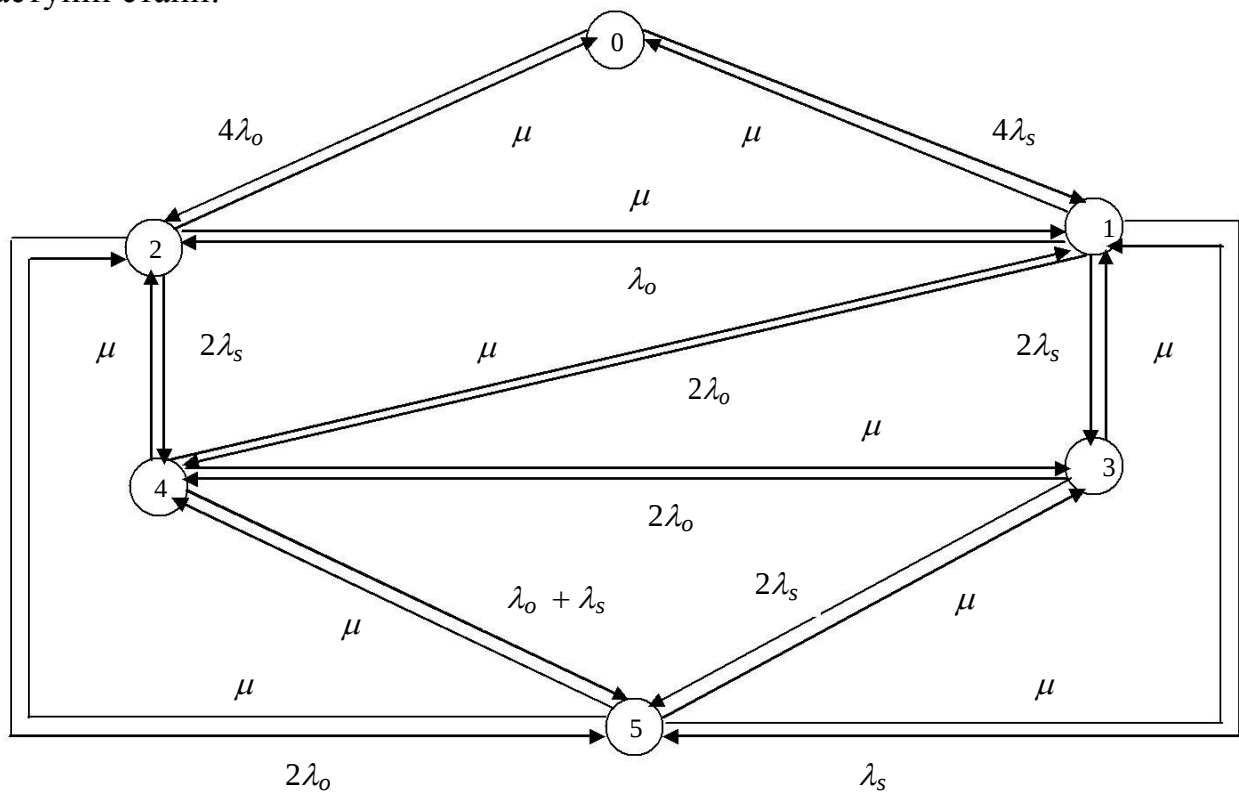


Рисунок 9.4 Граф станів елементарної комірки резервування тиристора.

0 – усі тиристори справні.

1 – в одному з тиристорів коротке замикання; 2 – в одному з тиристорів обрив

3 – у двох тиристорах короткі замикання, причому тиристори знаходяться в різних гілках; 4 – в одному тиристорі обрив й в одному коротке замикання; 5 – усі можливі непрацездатні стани схеми.

Граф станів при обмеженому відновленні показаний на рис. 9.4.

Перелік посилань.

1. Дружинін Г. В. Надійність автоматизованих систем. – М.: Енергія, 1977.-536с.
2. Гмурман В. Е. Теорія ймовірностей і математична статистика. – М.: Вища школа, 1977.-479с.
3. Гнеденко Б. В., Беляєв Ю.К., Соловьев О. О. Математичні методи в теорії надійності. – М.: Наука, 1965.- 367с.
4. Єрмолин Н. П., Жеріхін І. П. Надійність електричних машин. – Л.: Енергія, 1976.-249с.
5. Половко О. М. Основи теорії надійності. – М.: Наука, 1964. – 487с.
6. Половко О. М., Малікова І. М. Збірник задач по теорії надійності.- М.: Радянське радіо, 1972.- 408с.
7. Ріпс Я. А., Савельєв Б. О. Аналіз і розрахунок надійності систем керування електроприводами. – М.: Енергія, 1974.-248с.
8. Сотсков Б.С. Основи теорії і розрахунку надійності елементів і пристроїв автоматики й обчислювальної техніки. – М.: Вища школа, 1970.-272с.
9. Голінкевич Т. О. Прикладна теорія надійності. – М.: Вища школа, 1985.-168с.
10. Бусленко Н. П., Шрейдер Ю.О. Метод статистичних випробувань. – М.: Фізматгіз, 1961.-228с.
11. Горський Л.К. Статистичні алгоритми дослідження надійності.–М.: Наука, 1970.- 400с.
12. Козлов Б. О., Ушаков І. О. Довідник з розрахунку надійності апаратури радіоелектроніки й автоматики. – М.: Радянське радіо, 1975.-472с.
13. Гук Ю. Б., Лосєв Є. О., М'ясників О.В. Оцінка надійності електроустановок. – М.: Енергія, 1974.- 201с.
14. Гольдберг О.Д. Якість і надійність асинхронних двигунів. – М.: Енергія, 1968.- 176с.
15. Гольдберг О. Д. Випробування електричних машин. – М.: Вища школа, 1990. – 256с.
16. Лозинский О. Ю., Марущак Я. Ю. Розрахунок надійності електроприводів. Львів: Львівська політехніка, 1996. – 236с.
17. Луцький В.О. Розрахунок надійності й ефективності радіоелектронної апаратури.-Київ.: Наукова Думка, 1966. – 208с.
18. Широков О. М. Надійність радіоелектронних пристроїв. - М.: Вища школа, 1972.– 272с.
19. Горелова Г. В. Метод оптимуму номіналу і його застосування. – М.: Енергія, 1970.-200с.
20. Ушаков І.О. Методи рішення найпростіших задач оптимального резервування. - М.: Радянське радіо, 1969.-176с.
21. Кузьмін Ф. І. Задачі і методи оптимізації показників надійності. – М.: Радянське радіо, 1972.-224с.
22. Козлов Б.О. Резервування з відновленням. - М.: Радянське радіо, 1969. – 152с.

[illegible]

ДОДАТОК 2

Значение интеграла вероятности вида:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	0,95	0,8209	1,90	0,9928
0,05	0,0564	1,00	0,8427	1,95	0,9942
0,10	0,1125	1,05	0,8624	2,00	0,9953
0,15	0,1680	1,10	0,8802	2,05	0,9963
0,20	0,2227	1,15	0,8961	2,10	0,9970
0,25	0,2763	1,20	0,9103	2,15	0,9976
0,30	0,3286	1,25	0,9229	2,20	0,9981
0,35	0,3794	1,30	0,9340	2,25	0,9985
0,40	0,4284	1,35	0,9438	2,30	0,9988
0,45	0,4755	1,40	0,9523	2,35	0,9991
0,50	0,5205	1,45	0,9597	2,40	0,9993
0,55	0,5633	1,50	0,9661	2,45	0,9995
0,60	0,6039	1,55	0,9716	2,50	0,9996
0,65	0,6420	1,60	0,9736	2,55	0,9997
0,70	0,6778	1,65	0,9804	2,60	0,9998
0,75	0,7112	1,70	0,9838	2,65	0,9998
0,80	0,7421	1,75	0,9867	2,70	0,9999
0,85	0,7707	1,80	0,9891	2,75	0,9999
0,90	0,7969	1,85	0,9911	2,80	0,9999
0,95	0,8209	1,90	0,9928	3,00	1,0000

ДОДАТОК 3

ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ И ПОПРАВочНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ [11]

ТАБЛИЦА П.3.1

Номинальная интенсивность отказов резисторов
при $T^\circ = +20^\circ\text{C}$ и $K_H=1$

Тип резисторов		Номинальная мощность рассеяния $P_{\text{ном}}$, <i>вт</i>													
		0,25	0,5	1	2	5	10	15	20	25	30	50	60	75	100
		Интенсивность отказов λ_0 , 10^6 1/час													
Непроволочные	МЛТ	0,4	0,5	1,0	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ТВО	0,4	0,45	0,8	1,4	2,2	3,0	—	4,0	—	—	—	6,0	—	—
	МОУ	0,5	0,55	1,1	1,5	2,3	3,1	—	—	4,2	—	5,5	—	—	10
	МУН	0,6	0,6	1,2	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	УНУ	0,6	0,7	1,2	1,7	2,3	3,0	—	—	4,8	—	8,0	—	—	12
	КЭВ	0,6	0,75	1,3	1,75	2,4	3,1	—	—	5,0	—	—	—	—	—
	ВС	0,7	0,8	1,35	1,8	2,5	3,3	—	—	—	—	—	—	—	—
	УЛИ	0,6	0,65	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	БЛП	0,7	0,75	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	СПО	0,6	0,7	1,15	1,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Проволочные	СП	0,7	0,8	1,3	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ПТН	—	1,1	1,4	1,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ПКВ	—	1,2	1,5	2,0	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ПЭВ	—	1,6	2,0	2,6	2,9	3,2	3,5	—	4,5	5,0	5,6	—	8,0	12
	ПТП	—	—	2,2	2,6	3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	РП	—	—	—	3,0	—	—	—	—	4,7	—	—	—	8,5	—

Обозначения резисторов:

МЛТ — металлопленочные, лакированные, теплостойкие
 ТВО — теплостойкие, влагостойкие, объемные
 МОУ — металлоокисные, ультравысокочастотные
 МУН — металлопленочные, ультравысокочастотные, незащищенные
 УНУ — углеродистые, незащищенные, ультравысокочастотные
 КЭВ — композиционные, эмалированные, влагостойкие
 ВС — углеродистые
 УЛИ — углеродистые, лакированные, измерительные
 БЛП — бороуглеродистые, лакированные, прецизионные
 СПО — переменные, объемные
 СП — переменные, композиционные
 ПТН — проволочные, точные, нихромовые
 ПКВ — проволочные, на керамическом основании, влагостойкие
 ПЭВ — проволочные, эмалированные, влагостойкие
 ПТП — потенциометры теплостойкие, прецизионные
 РП — потенциометры регулируемые

ТАБЛИЦА П.3.2

Поправочные коэффициенты $\alpha_1 = f(K_H, T^\circ)$
для определения λ , резисторов

Тип резисторов	T°, C	K_H									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
Непроволочные	20	0,15	0,20	0,26	0,35	0,42	0,50	0,60	0,72	0,84	1,00
	25	0,18	0,23	0,30	0,39	0,46	0,56	0,67	0,79	0,94	1,10
	30	0,21	0,27	0,34	0,43	0,51	0,62	0,75	0,88	1,07	1,26
	35	0,23	0,30	0,38	0,47	0,56	0,69	0,84	0,99	1,22	1,47
	40	0,27	0,33	0,42	0,51	0,60	0,76	0,94	1,11	1,38	1,71
	45	0,30	0,36	0,46	0,55	0,66	0,84	1,05	1,24	1,57	1,95
	50	0,34	0,40	0,50	0,59	0,71	0,92	1,17	1,38	1,76	2,22
	55	0,37	0,44	0,54	0,63	0,76	1,00	1,30	1,54	1,96	2,51
	60	0,40	0,47	0,57	0,67	0,82	1,08	1,43	1,70	2,17	2,81
	65	0,43	0,50	0,60	0,71	0,88	1,17	1,57	1,86	2,41	3,14
	70	0,46	0,54	0,64	0,75	0,94	1,26	1,72	2,04	2,69	3,52
	75	0,50	0,58	0,68	0,79	1,00	1,35	1,88	2,25	2,99	3,94
	80	0,54	0,61	0,71	0,84	1,07	1,46	2,05	2,48	3,31	4,40
	85	0,57	0,66	0,75	0,88	1,14	1,55	2,20	2,73	3,65	4,86
	90	0,60	0,70	0,79	0,92	1,20	1,66	2,40	2,99	4,04	5,40
	95	0,64	0,74	0,82	0,96	1,26	1,76	2,58	3,27	4,46	6,05
	100	0,69	0,78	0,87	1,00	1,32	1,88	2,77	3,60	4,90	6,70
Проволочные	20	0,01	0,02	0,02	0,05	0,10	0,20	0,34	0,51	0,73	1,00
	25	0,02	0,03	0,03	0,07	0,12	0,22	0,39	0,55	0,77	1,05
	30	0,02	0,04	0,04	0,08	0,14	0,26	0,43	0,60	0,81	1,10
	35	0,03	0,05	0,05	0,09	0,16	0,29	0,48	0,64	0,86	1,19
	40	0,04	0,06	0,06	0,11	0,19	0,32	0,53	0,69	0,92	1,29
	45	0,05	0,07	0,07	0,12	0,22	0,36	0,57	0,75	0,99	1,41
	50	0,06	0,08	0,08	0,14	0,25	0,39	0,63	0,81	1,06	1,55
	55	0,07	0,09	0,09	0,15	0,27	0,43	0,68	0,88	1,16	1,71
	60	0,08	0,10	0,10	0,17	0,30	0,47	0,73	0,95	1,27	1,91
	65	0,09	0,11	0,11	0,18	0,32	0,51	0,79	1,04	1,43	2,18
	70	0,10	0,12	0,12	0,20	0,35	0,56	0,85	1,14	1,60	2,51
	75	0,11	0,13	0,14	0,21	0,37	0,61	0,91	1,24	1,80	2,89
	80	0,12	0,14	0,15	0,22	0,40	0,67	0,98	1,36	2,01	3,25
	85	0,13	0,16	0,17	0,24	0,43	0,73	1,07	1,50	2,26	3,65
	90	0,14	0,17	0,18	0,26	0,46	0,80	1,15	1,65	2,51	4,05
	95	0,15	0,18	0,19	0,28	0,49	0,88	1,24	1,82	2,80	4,49
	100	0,16	0,18	0,20	0,30	0,52	0,96	1,33	2,00	3,15	5,00

ТАБЛИЦА П.3.3

Номинальные интенсивности отказов конденсаторов
при $T^\circ = +20^\circ\text{C}$ и $K_H = 1$

Тип конденсатора	Интенсивность отказов λ_0 , 10^{-6} 1/час
Бумажные	1,8
Металлобумажные	2,0
Слюдяные	1,2
Стеклянные	1,6
Керамические	1,4
Пленочные	2,0
Электролитические алюминиевые	2,4
Электролитические танталовые	2,2

ТАБЛИЦА П.3.4

Поправочные коэффициенты $\alpha_2 = f(K_H, T^\circ)$
для определения λ_2 конденсаторов

Конденсаторы	$T, ^\circ\text{C}$	K_H				
		0,1÷0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Бумажные Керамические Слюдяные негерметичные	20	0,06	0,08	0,10	0,18	0,23
	25	0,07	0,08	0,10	0,21	0,25
	30	0,07	0,08	0,11	0,22	0,27
	35	0,07	0,09	0,12	0,24	0,31
	40	0,07	0,09	0,13	0,28	0,35
	45	0,08	0,09	0,14	0,33	0,40
	50	0,08	0,10	0,15	0,36	0,46
	60	0,10	0,12	0,20	0,45	0,62
	65	0,11	0,13	0,23	0,55	0,66
	70	0,13	0,15	0,26	0,60	0,83
	75	0,15	0,17	0,33	0,73	1,13
	80	0,17	0,22	0,43	0,92	1,46
	85	0,25	0,30	0,65	1,14	1,88
	90	0,33	0,38	0,82	1,70	2,40
	95	0,43	0,47	1,08	2,40	2,90
	100	0,55	0,57	1,36	3,00	3,40
Слюдяные герметичные	20	0,28	0,36	0,49	0,18	0,23
	25	0,29	0,37	0,49	0,21	0,25
	30	0,30	0,38	0,50	0,22	0,27
	35	0,32	0,39	0,51	0,24	0,31
	40	0,34	0,42	0,54	0,28	0,35
	45	0,36	0,45	0,59	0,33	0,40
	50	0,38	0,49	0,63	0,36	0,46
	55	0,42	0,54	0,67	0,40	0,53

Продолжение табл. П. 3.4

Конденсаторы	T, °C	K _н				
		0,1÷0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Слюдяные герметичные	60	0,46	0,61	0,75	0,45	0,62
	65	0,51	0,68	0,85	0,55	0,66
	70	0,58	0,76	0,96	0,60	0,83
	75	0,66	0,86	1,14	0,73	1,13
	80	0,75	0,97	1,40	0,92	1,46
	85	0,85	1,13	1,95	1,14	1,88
	90	0,98	1,30	2,80	1,70	2,40
	95	1,12	1,50	3,50	2,40	2,90
	100	1,30	1,70	4,50	3,00	3,40
Металлобумажные, стек- ляные, пленочные	20	0,28	0,36	0,49	0,64	0,80
	25	0,29	0,37	0,49	0,66	0,88
	30	0,30	0,38	0,50	0,70	0,94
	35	0,32	0,39	0,51	0,75	1,00
	40	0,34	0,42	0,54	0,80	1,10
	45	0,36	0,45	0,59	0,86	1,25
	50	0,38	0,49	0,63	0,95	1,43
	55	0,42	0,54	0,67	1,06	1,70
	60	0,46	0,61	0,75	1,19	2,00
	65	0,51	0,68	0,85	1,37	2,10
	70	0,58	0,76	0,96	1,58	2,30
	75	0,66	0,86	1,14	1,87	2,50
	80	0,75	0,97	1,40	2,10	2,80
	85	0,85	1,13	1,95	2,30	3,40
	90	0,98	1,30	2,80	2,70	3,80
	95	1,12	1,50	3,50	3,00	4,40
	100	1,30	1,70	4,50	3,50	5,00
Электролитические с алю- миниевым анодом	20	0,65	0,48	0,40	0,48	0,65
	25	0,72	0,54	0,44	0,54	0,72
	30	0,82	0,60	0,48	0,60	0,82
	35	1,00	1,73	0,56	0,73	1,00
	40	1,24	0,90	0,64	0,90	1,24
	45	1,48	1,12	0,80	1,12	1,48
	50	1,73	1,40	1,17	1,40	1,73
	55	1,95	1,70	1,38	1,70	1,95
	60	2,30	2,10	1,80	2,10	2,30
	65	3,50	2,80	2,26	2,80	3,50
	70	4,30	3,60	2,90	3,60	4,30
	75	5,50	4,60	4,00	4,60	5,50
	80	7,00	5,60	4,40	5,60	7,00
	85	8,80	6,80	5,50	6,80	8,80
	90	11,0	8,00	6,50	8,00	11,0
	95	14,0	9,50	7,70	9,50	14,0
	100	18,0	11,4	9,00	11,4	18,0

Продолжение табл. П.3.4

Конденсаторы	T, °C	K _н				
		0,1+0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Электролитические с танталовым анодом	20	0,39	0,20	0,20	0,20	0,39
	25	0,40	0,21	0,21	0,21	0,40
	30	0,41	0,22	0,22	0,22	0,41
	35	0,43	0,26	0,26	0,26	0,43
	40	0,47	0,30	0,30	0,30	0,47
	45	0,53	0,35	0,35	0,35	0,53
	50	0,57	0,40	0,40	0,40	0,57
	55	0,64	0,45	0,45	0,45	0,64
	60	0,70	0,50	0,50	0,50	0,70
	65	0,78	0,57	0,57	0,57	0,78
	70	0,86	0,65	0,65	0,65	0,86
	75	0,94	0,72	0,72	0,72	0,94
	80	1,05	0,80	0,80	0,80	1,05
	85	1,17	0,90	0,90	0,90	1,17
	90	1,30	1,00	1,00	1,00	1,30
	95	1,45	1,12	1,12	1,12	1,45
	100	1,65	1,25	1,25	1,25	1,65

ТАБЛИЦА П.3.5

Номинальные интенсивности отказов полупроводниковых приборов при $T^\circ = +20^\circ\text{C}$ и $K_n = 1$

Полупроводниковые приборы		Интенсивность отказов λ_0 , 10^{-6} 1/час приборов	
		германиевых	кремниевых
Диоды	Выпрямительные точечные	0,7	2
	Выпрямительные микроплоскостные	—	0,7
	Выпрямительные плоскостные	—	5
	Выпрямительные плоскостные повышенной надежности	—	2,5
	Выпрямительные повышенной мощности	—	5
	Импульсные точечные	3	—
	Импульсные плоскостные мезадиоды	2	2,5
	Импульсные сплавные	—	0,6
	Управляемые	—	5
	Стабилитроны	—	5
	Варикапы	—	5
	Выпрямительные столбы	—	5
	Микромодульные	4,2	4,5
Транзисторы	Маломощные низкочастотные	3	4
	Мощные низкочастотные	4,6	—
	Маломощные высокочастотные	2,6	—
	Мощные высокочастотные	5	1,7
	Микромодульные	1	—

**Поправочные коэффициенты $\alpha_3 = f(K_H, T^\circ)$
для определения λ_3 полупроводниковых приборов**

Полупроводниковые приборы		T, °C	K _н							
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Диоды	германиевые	20	0,09	0,15	0,22	0,30	0,39	0,50	0,62	0,74
		25	0,10	0,16	0,24	0,32	0,42	0,52	0,64	0,76
		30	0,12	0,19	0,26	0,35	0,45	0,55	0,66	0,79
		35	0,13	0,20	0,29	0,38	0,47	0,58	0,70	0,85
		40	0,15	0,23	0,32	0,41	0,51	0,63	0,76	0,91
		45	0,17	0,26	0,37	0,49	0,62	0,77	0,94	1,15
		50	0,20	0,32	0,45	0,60	0,76	0,95	1,15	1,41
		55	0,31	0,42	0,54	0,70	0,89	1,13	1,40	1,73
		60	0,42	0,53	0,66	0,86	1,13	1,40	1,75	2,13
	кремниевые	20	0,77	0,77	0,78	0,79	0,81	0,83	0,85	0,88
		25	0,80	0,80	0,81	0,83	0,84	0,87	0,89	0,92
		30	0,85	0,85	0,85	0,86	0,88	0,90	0,92	0,97
		35	0,88	0,88	0,88	0,90	0,92	0,95	0,97	1,03
		40	0,92	0,92	0,92	0,94	0,97	1,00	1,04	1,08
		45	0,94	0,95	0,96	0,98	1,00	1,04	1,08	1,13
		50	0,96	0,98	1,00	1,02	1,05	1,09	1,13	1,19
		55	0,98	1,01	1,04	1,07	1,11	1,16	1,22	1,29
		60	1,00	1,04	1,08	1,11	1,16	1,22	1,30	1,39
Транзисторы	германиевые	20	0,20	0,23	0,26	0,35	0,42	0,50	0,70	0,74
		25	0,20	0,24	0,29	0,40	0,47	0,57	0,75	0,83
		30	0,21	0,27	0,32	0,45	0,52	0,65	0,83	0,95
		35	0,23	0,29	0,36	0,50	0,58	0,73	0,93	1,07
		40	0,25	0,32	0,40	0,55	0,66	0,81	1,04	1,22
		45	0,27	0,36	0,45	0,61	0,74	0,94	1,17	1,36
		50	0,30	0,42	0,50	0,68	0,84	1,08	1,31	1,50
		55	0,34	0,46	0,56	0,76	0,96	1,23	1,47	1,68
		60	0,39	0,52	0,63	0,86	1,10	1,38	1,65	1,90
		65	0,44	0,57	0,71	0,98	1,25	1,55	1,84	2,13
		70	0,49	0,63	0,80	1,11	1,40	1,73	2,05	2,35
		75	0,54	0,69	0,91	1,25	1,57	1,92	2,24	2,59
	кремниевые	20	0,06	0,16	0,18	0,20	0,35	0,43	0,52	0,63
		25	0,06	0,16	0,18	0,21	0,36	0,44	0,53	0,65
		30	0,06	0,16	0,19	0,22	0,37	0,46	0,55	0,67
		35	0,07	0,16	0,19	0,22	0,39	0,49	0,57	0,70
		40	0,07	0,17	0,20	0,23	0,40	0,51	0,59	0,72
		45	0,07	0,17	0,20	0,23	0,42	0,53	0,62	0,75
		50	0,08	0,18	0,21	0,24	0,45	0,55	0,65	0,78
		55	0,08	0,18	0,21	0,25	0,47	0,58	0,68	0,81
		60	0,08	0,19	0,22	0,26	0,50	0,61	0,71	0,85
		65	0,09	0,19	0,22	0,26	0,53	0,65	0,76	0,90
		70	0,09	0,20	0,23	0,27	0,56	0,70	0,81	0,97
		75	0,09	0,20	0,23	0,28	0,60	0,74	0,87	1,04

ТАБЛИЦА П.3.7

**Номинальная интенсивность отказов трансформаторов
и моточных изделий (дрессели, катушки
индуктивности и др.) при $T^\circ = +20^\circ\text{C}$ и $K_H = 1$**

Трансформаторы и моточные изделия	Интенсивность отказов λ_0 , 10^{-6} 1/час
Автотрансформаторы	5,0
Силовые	3,0
Высоковольтные	4,0
Накальные анодные	2,0
Импульсные	0,5
Дрессели	1,0
Катушки индуктивности	0,5

ТАБЛИЦА П.3.8

**Номинальные интенсивности отказов электрических машин
и машинных электроэлементов при $T^\circ = +20^\circ\text{C}$ и $K_H = 1$**

Электрические машины и их элементы		Интенсивность отказов λ_0 , 10^{-6} 1/час
Двигатели постоянного тока	Коллекторные	8
	Стабилизированной скорости	10
Машины пере- менного тока	Асинхронные короткозамкнутые	5
	Синхронные	7
	Асинхронные с полым ротором	6
Сельсины	Бесконтактные	5
	Контактные	6
	Дифференциальные	5
Вращающие трансформа- торы	Линейные, синусно-косинусные (ВТ, ЛВТ, СКВТ)	6
	Масштабные (МТ, МВТ)	5
Машинные электро- элементы	Электромагнитные муфты	4
	Регуляторы напряжения	8
	Фазорегуляторы	8
	Тахогенераторы	8
	Двигатели генераторы	10
	Электромеханические усилители	12

ТАБЛИЦА П.3.9

Поправочные коэффициенты $\alpha_4 = f(K_n, T^\circ)$ для определения λ_2 моточных изделий, трансформаторов и обмоток электрических машин

T, °C	K_n							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0
25	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	1,3
30	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	1,0	1,4	1,6
35	0,1	0,1	0,2	0,4	0,9	1,3	1,9	2,5
40	0,1	0,2	0,2	0,5	1,2	1,8	2,4	3,0
45	0,2	0,2	0,3	0,6	1,4	2,3	3,2	4,2
50	0,2	0,2	0,3	0,8	1,8	2,8	4,0	5,2
55	0,2	0,2	0,3	1,0	2,2	3,5	5,2	6,9
60	0,2	0,3	0,4	1,2	2,5	4,1	6,4	8,6
65	0,2	0,3	0,5	1,6	3,4	5,7	8,5	11,5
70	0,3	0,4	0,6	2,0	4,2	7,2	10,7	14,0

ТАБЛИЦА П.3.10

Поправочные коэффициенты (дополнительная интенсивность отказов) $\Delta\lambda$ электрических машин в зависимости от скорости вращения

n, об/мин	Дополнительная интенсивность отказов $\Delta\lambda$, 10^{-6} 1/час		n, об/мин	Дополнительная интенсивность отказов $\Delta\lambda$, 10^{-6} 1/час	
	без щеток	со щетками		без щеток	со щетками
До 1 000	0,04	0,5	6 000	1,4	2,9
2 000	0,15	0,7	7 000	1,8	4,3
3 000	0,35	1,0	8 000	2,3	5,7
4 000	0,6	1,5	9 000	2,8	7,0
5 000	0,9	2,2	10 000	3,5	8,5

ДОДАТОК 4

ДАННЫЕ О НАРАБОТКАХ И ОТКАЗАХ ДВИГАТЕЛЕЙ-ВЕНТИЛЯТОРОВ

№ по пор.	Номер под- станции	Номер агрегата	Наработ- ка, ч	№ по пор.	Номер под- станции	Номер агрегата	Наработ- ка, ч
Подстанции г. Москвы				31		1	20 01 ?
1	68	1	19 742	32	69	2	22 834
2		2	17 818	33		3	23 706
3		3	15 041	34		4	24 429
4	58	1	8 759	35	12	1	15 007
5		2	8 772	36		2	17 964
6		3*	90	37		3	20 136
7		3*	454	38	77	1	7 306
8		3*	370	39		2	6 357
9		3*	358	40		3	5 904
10		3	6 820	41	2	1	15 943
11		4	8 743	42		2	23 663
12	57	2	14 113	43		3	19 089
13		3	7 285	44		4	16 044
14		4	15 091	45	35	1	18 838
15		5	11 771	46		2	18 607
16		6	10 853	47		3	17 654
17	22	1	21 075	48	6	1*	1 000
18		2*	15 945	49		1*	8 499
19		2*	1 443	50		1	8 906
20		2	4 027	51		2	18 946
21		3	21 499	52		3*	15 720
22	25	1	26 186	53		3	3 265
23		2	25 487	54		4*	80
24		3	25 493	55		4*	10 190
25	51	1	26 533	56		4	8 046
26		2*	19 016	57	31	1	24 361
27		2	8 007				
28		3*	3 839				
29		3	22 393				
30		4	27 500				

№ по пор.	Номер под-станции	Номер агрегата	Наработ-ка, ч	№ по пор.	Номер под-станции	Номер агрегата	Наработ-ка, ч
58	4	1	18 677	89		2	12 911
59		2	11 687	90		3	18 382
60		3	18 535	91		1*	21 412
61		4	19 900	92		2*	8 206
62	5	1	19 189	93	41	2	13 832
63		2	19 910	94		1*	9 252
64		3	19 317	95		1*	7 751
65		4	16 875	96		1*	1 228
66	11	1	14 481	97		1*	5 482
67		2	14 985	98	62	2	26 251
68		3	13 301	99		3*	12 367
69		4	11 298	100		3	13 857
70		5	12 370	101		4	26 224
71	27	1	20 526	102		1	19 780
72		2	21 793	103	64	2	19 903
73		3*	3 104	104		3	16 460
74		3*	2 733	105		4	17 365
75		3*	350	106		1	19 560
76	56	3	13 881	107	50	2	16 721
77		1	24 735	108		3	6 711
78		2	25 236	109		1	20 285
79		3	25 353	110	33	2	20 415
80		4	24 527	111		3	20 284
81	17	1	23 280	112		4	4 935
82		2	23 280	113		1	8 325
83		3	23 280	114	36	2	13 338
84	67	1*	15 410	115		3	12 506
85		1	4 611	116		1	21 912
86		2*	4 615	117	23	2	21 891
87		2*	530				
88		2*	1 150				

№ по пор.	Номер под- станции	Номер агрегата	Наработ- ка, ч	№ по пор.	Номер под- станции	Номер агрегата	Наработ- ка, ч
Подстанции г. Клева				145		1	5 873
118		1	11 652	146	24	2	6 018
119	26	2*	11 191	147		3*	100
120		1	8 075	148		3	5 526
121	16	2	8 018	149		1	6 116
122		1	7 589	150	29	2	6 405
123	14	2	7 460	151		3	11 457
124		1*	2 634	152		1	3 402
125	10	2	4 944	153	18	2*	300
126		3	4 872	154		2	6 183
127		1	11 366	155	7	1	21 564
128	23	2	15 045	156	8	1	22 572
129		3	14 839	157	21	1	21 336
130		1*	7 510	158		2*	20 245
131	4	2	8 424	159		2*	70
132		3	7 814	160		3	20 555
133		4	5 763	161	11	1	22 968
134		1	7 319	162	17	1	22 608
135	2	2	7 182	163		1*	6 534
136		1*	120	164		1*	468
137		1*	2 350	165	15	1	4 967
138	25	1	5 100	166		2*	500
139		2*	2 693	167		2*	1 614
140		2	4 949	168		2	9 958
141	12	1	19 836	169		1	9 951
142		1	10 805	170	22	2	10 959
143	28	2	9 435	171		1	5 567
144	31	1	14 775	172		2	5 268

№ по пор.	Номер подстанции	Номер агрегата	Наработка, ч	№ по пор.	Номер подстанции	Номер агрегата	Наработка, ч
173	3	1*	4 444	191	Б	1	5 390
174		1	8 745	192		2	5 500
175		2	13 335	193		3	5 600
176		3*	1 711				
177	19	1	12 384	194	В	1	3 770
178		2	12 136	195		2	3 650
179	27	1*	1 657	196		3	3 520
180		2*	400		Г	1	3 415
181		2	4 721	197		2	3 730
182		3*	2 836	198		3	3 180
183		3*	1 994	199			
184	9	1*	1 981	200	Д	1	14 043
185		1	4 013	201		2	14 080
186		2*	5 223	202		3	14 090
187		3	5 791	203		4	3 469
Подстанции г. Харькова				204	Е	1	6 906
188	А	1	9 290	205		2	6 967
189		2	9 763	206		3	5 485
190		3	9 608				

ДОДАТОК 5

Квантили распределения χ^2

Число степеней свободы ν	Квантили распределения при доверительной вероятности α , равной															
	0,001	0,005	0,010	0,025	0,05	0,100	0,200	0,300	0,700	0,800	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995	0,999
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,016	0,064	0,148	1,07	1,64	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88	10,8
2	0,00	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,446	0,713	2,41	3,22	4,61	5,99	7,38	9,21	10,6	13,8
3	0,024	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,00	1,42	3,67	4,64	6,25	7,81	9,35	11,3	12,8	16,3
4	0,091	0,207	0,297	0,484	0,711	1,06	1,65	2,19	4,88	5,99	7,78	9,49	11,1	13,3	14,9	18,5
5	0,210	0,412	0,554	0,831	1,15	1,61	2,34	3,00	6,06	7,29	9,24	11,1	12,8	15,1	16,7	20,5
6	0,381	0,676	0,872	1,24	1,64	2,20	3,07	3,83	7,23	8,56	10,6	12,6	14,4	16,8	18,5	22,5
7	0,598	0,989	1,24	1,69	2,17	2,83	3,82	4,67	8,38	9,80	12,0	14,1	16,0	18,5	20,3	24,3
8	0,857	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	4,59	5,53	9,52	11,0	13,4	15,5	17,5	20,1	22,0	26,1
9	1,15	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	5,38	6,39	10,7	12,2	14,7	16,9	19,0	21,7	23,6	27,9
10	1,48	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	6,18	7,27	11,8	13,4	16,0	18,3	20,5	23,2	25,2	29,6
11	1,83	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	6,99	8,15	12,9	14,6	17,3	19,7	21,9	24,7	26,8	31,6
12	2,21	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	7,81	9,03	14,0	15,8	18,5	21,0	23,3	26,2	28,3	32,9
13	2,62	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	8,63	9,93	15,1	17,0	19,8	22,4	24,7	27,7	29,8	34,5
14	3,05	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	9,47	10,8	16,2	18,2	21,1	23,4	26,1	29,1	31,3	36,1
15	3,48	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	10,3	11,7	17,3	19,3	22,3	25,0	27,5	30,6	32,8	37,7
16	3,94	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	11,2	12,6	18,4	20,5	23,5	26,3	28,8	32,0	34,3	39,3
18	4,90	6,26	7,01	8,23	9,39	10,9	12,0	14,4	20,6	22,8	26,0	28,9	31,5	34,8	37,2	42,3
20	5,92	7,43	8,26	9,59	10,9	12,4	14,6	16,3	22,8	25,0	28,4	31,4	34,2	37,6	40,0	45,3
22	6,98	8,64	9,54	11,0	12,3	14,0	16,3	18,1	24,9	27,3	30,8	33,9	36,8	40,3	42,8	48,3
24	8,08	9,89	10,9	12,4	13,8	15,7	18,1	19,9	27,1	29,6	33,2	36,4	39,4	43,0	45,6	51,2
26	9,22	11,2	12,2	13,8	15,4	17,3	19,8	21,8	29,2	31,8	35,6	38,9	41,9	45,6	48,3	54,1
28	10,4	12,5	13,6	15,3	16,9	18,9	21,6	23,6	31,4	34,0	37,9	41,3	44,5	48,3	51,0	56,9
30	11,6	13,8	15,0	16,8	18,5	20,6	23,4	25,5	33,5	36,3	40,3	43,8	47,0	50,9	53,7	59,7
35	14,7	17,2	18,5	20,6	22,5	24,8	27,8	30,2	38,9	41,8	46,1	49,9	53,2	57,3	60,3	66,6
40	17,9	20,7	22,2	24,4	26,5	29,1	32,3	34,9	44,2	47,3	51,8	55,8	59,3	63,7	66,8	73,4

