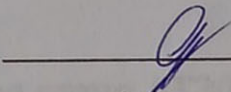


Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

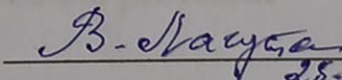
Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»

на тему: Уточнений розрахунок надійності тригера
за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»
зі спеціальності: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: студент групи АТ20120 (940А)

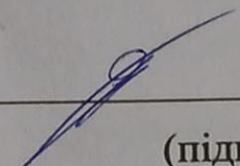
 / **Руслан ЯРУШИН** /
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ

 / **Василь ЛАГУТА** /
28.5.2023
(підпис керівника)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень
з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент


(підпис студента)

Дніпро – 2023 рік

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: Перший (бакалаврський)
Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті
Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____ бакалавра
(ступінь вищої освіти)

студенту Ярушин Руслан Сергійович
(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Уточнений розрахунок надійності тригера

Керівник роботи: Лагута Василь Васильович, к.т.н., доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "25 "жовтня 2022 р. № 1093-ст

2. Строк подання студентом роботи: 25.05.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Принципальна схема тригера зі специфікацією елементів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: провести аналіз надійності компонентів електронних систем; описати методи розрахунку схемотехнічних систем

4.2 Основна частина: Виконати уточнений розрахунок надійності тригера за обраним методом

5. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Аналітична частина	Лагута В.В., доцент		
Основна частина	Лагута В.В., доцент		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	28.02.2023	
2	1 Надійність компонентів електронних схем	28.02.2023	
3	2 Розрахунок надійності інженерних схемотехнічних систем 2.1 Методи розрахунку 2.2 Орієнтовний розрахунок надійності 2.3 Розрахунок надійності при підборі типів елементів 2.4 Остаточний розрахунок надійності. Приклади	28.03.2023	
4	3 Розрахунок надійності тригера	25.04.2023	
5	Висновки	23.05.2023	
6	Перелік посилань	23.05.2023	
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	25.05.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

Руслан ЯРУШИН

_____ (підпис)

_____ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

Василь ЛАГУТА

_____ (підпис)

_____ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра: 48 с., 3 рис., 10 табл., 22 джерел.

Завдання роботи – уточнений розрахунок надійності тригера.

Мета роботи – проведення аналізу надійності компонентів електронних систем та виконання уточненого розрахунку надійності тригера.

Методи дослідження – теорія надійності, математична статистика, математичний аналіз, аналіз і синтез систем.

В першому розділі роботи розглянуто питання надійності компонентів електронних схем.

В другому розділі роботи проаналізовано питання розрахунку показників надійності інженерних схемотехнічних систем в умовах експлуатації.

В третьому розділі виконано уточнений розрахунок показників надійності тригера.

Результати роботи можуть бути використані для обчислення показників надійності апаратури на завершальній стадії проектування з метою подальшого підвищення надійності електронної апаратури.

Матеріали роботи застосовуються у навчальному процесі університету при викладанні дисципліни «Надійність та діагностування».

Ключові слова: НАДІЙНІСТЬ, ВІДМОВА, ТРИГЕР, ОРІЄНТОВАНИЙ РОЗРАХУНОК, УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК, СХЕМОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	5
ВСТУП.....	7
1 НАДІЙНІСТЬ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ.....	8
1.1 Надійність та її компоненти.....	8
1.2 Відмови напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем.....	13
1.3 Надійність компонентів електронних схем.....	17
2 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ СХЕМОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	22
2.1 Методи розрахунку надійності.....	22
2.2 Орієнтовний розрахунок надійності.....	24
2.2.1 Розрахунок надійності за середньогруповими інтенсивностями відмов елементів.....	24
2.2.2 Розрахунок надійності з використанням досвіду експлуатації.....	25
2.3 Розрахунок надійності при доборі типів елементів.....	27
2.4 Остаточний розрахунок надійності. Приклади.....	28
3 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ТРИГЕРА.....	37
ВИСНОВКИ.....	45
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	46

ВСТУП

Актуальність роботи. Розвиток і удосконалення засобів автоматики, притаманних сучасному етапу науково-технічного прогресу, який здійснюється в напрямку автоматизації, збільшенні кількості завдань та операцій, які виконуються, і поліпшення якості їхнього вирішення. Швидкий розвиток науково-технічного прогресу викликав зміни, які полягають в тому, що сучасні технічні системи стали мати такі властивості як: адаптація, інваріантність, самонастроювання, які відсутні в складових компонентах систем. Значно підвищилася їхня ефективність, тобто зросли потенційні можливості виконання притаманних їм функцій. Паралельно з цим ускладнювалася структура систем, більшість яких мають у своєму складі десятки мільйонів комплектуючих елементів. Недостатній рівень експлуатаційної надійності елементів викликає значні проблеми в організації експлуатації та ремонту систем, зростають витрати часу на контроль працездатності і локалізацію відмов, що виникають.

Усунення цих проблем шляхом забезпечення необхідної надійності складних систем у процесі тривалої експлуатації - одна з найактуальніших проблем сучасної техніки, на розв'язання якої спрямовані зусилля вчених, конструкторів, інженерів.

Мета роботи – проведення аналізу надійності компонентів електронних систем та виконання уточненого розрахунку надійності тригера.

Методи дослідження – теорія надійності, математична статистика, математичний аналіз, аналіз і синтез систем.

Практична значимість роботи – результати роботи можуть бути використані для обчислення показників надійності апаратури на завершальній стадії проектування з метою подальшого підвищення надійності електронної апаратури.

1 НАДІЙНІСТЬ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

1.1 Надійність та її компоненти

Основні поняття терміну надійності в техніці найбільш повно викладено в роботах Беккера П., Єнсена Ф., Шаманова В.І., Журавльова В.М., Сапожнікова В.В., Букреєва І.М., Алексеєнко А.Г.

Надійність має свій держаний стандарт України ДСТУ 2860-94.

Згідно ДСТУ під надійністю розуміють властивість виробу (об'єкта) зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [1]. При дослідженні надійності часто ставиться завдання визначити причини, що приводять до формування тієї або іншої сторони надійності. Це приводить до розподілу надійності на:

- апаратну надійність, обумовлену станом апаратури, яка може при необхідності розділятися на більш дрібні різновиди надійності: на надійність конструктивно-схемну і виробничо-технологічну; програмну надійність, обумовлену станом програм; надійність об'єкта, обумовлену якістю обслуговування; надійність функціональну – надійність виконання окремих функцій, покладених на систему.

Під об'єктом в теорії надійності розуміють систему в цілому або окремий елемент цієї системи, будова якого розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця. Під системою розуміють сукупність елементів, що взаємодіють між собою в процесі виконання заданих функцій. Система призначена для самостійного виконання визначеного практичного завдання. По ступеню складності системи можна підрозділяти на прості та складні.

Відмінні риси складної системи наступні:

- велика кількість елементів;
- складний характер зв'язків між елементами;

- різноманітність функцій, які виконуються системами;
- наявність в системі елементів самоорганізації;
- функціонування при непостійних зовнішніх впливах, залежить від зворотних зв'язків, участю персоналу реагування у роботі системи.

Відповідно від факторів, розрізняють:

- системи структурно складні;
- системи функціонально складні.

Можна виділити чотири групи об'єктів, які відрізняються показниками та методами оцінки надійності, рис. 1.1 [2].

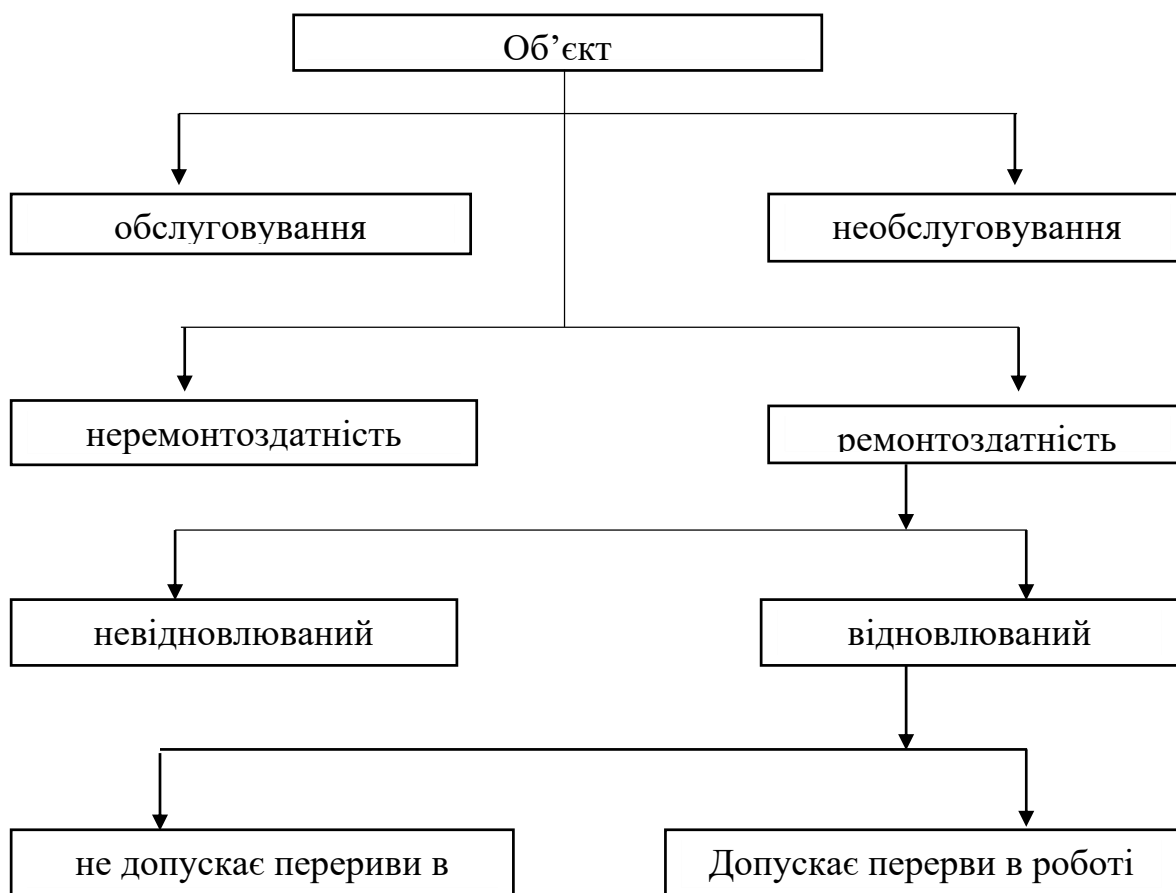


Рисунок 1.1 – Типи об'єктів

У непрацездатному стані хоча б один такий параметр не відповідає вимогам нормативно-технічної та конструкторської документації, рис. 1.2.

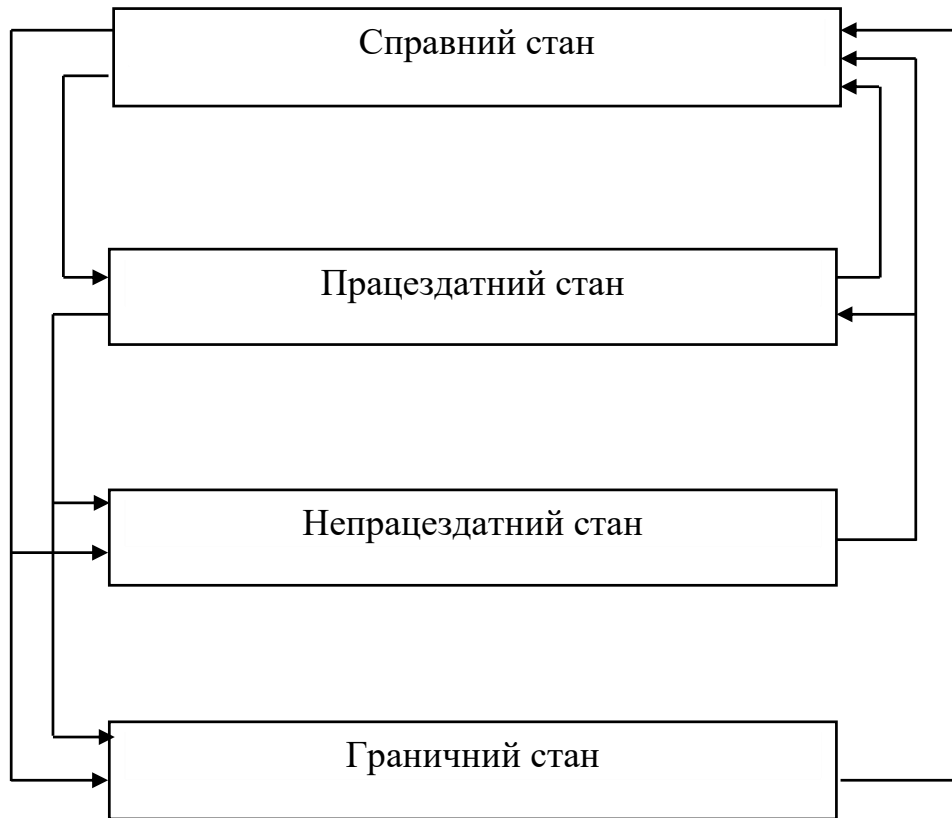


Рисунок 1.2 – Схема зв'язків між станами об'єкта

За характером виникнення відмови можна скласти класифікацію таким чином, табл. 1.1. Надійність закладається на стадії проектування шляхом вибору структури, елементів, режимів роботи, запровадженням надмірності, використанням діагностики, реалізується на стадії виготовлення шляхом дотримання технології виробництва, підтримується на стадії експлуатації шляхом правильного технічного обслуговування, забезпечення запчастинами, раціональною чисельністю обслуговуючого персоналу. Саме на стадії проектування конструктори повинні забезпечити у технічного об'єкта визначений запас надійності і закладають цей запас в конструкцію.

Таблиця 1.1 – Класифікація відмов

Ознаки відмови	Вид відмови	Характеристика відмови
Характер зміни параметра до моменту виникнення відмови	Раптова	Стрибкоподібна зміна значень одного або декількох параметрів ТС.
	Поступова	Поступова зміна одного або декількох параметрів за рахунок повільного, поступового погіршення якості ТС.
Зв'язок з відмовами інших елементів	Незалежна (первинна)	Відмова не обумовлена пошкодженнями або відхиленнями інших елементів.
	Залежна (вторинна)	Відмова обумовлена пошкодженнями або відмовами інших елементів (вузлів, пристроїв).
Можливість використання елемента після відмови	Повна	Повна втрата працездатності, що виключає використання ТС за призначенням.
	Часткова	Подальше використання системи можливе, але з меншою ефективністю
Характер прояви відмови	Збій	Відмова, що самоусувається, приводить до короточасного порушення працездатності.
	Переміжна	Багаторазовий виникаючий збій одного і того ж характеру (то виникає, то зникає), пов'язаний із зворотними випадковими змінами режимів роботи і параметрів пристрою.
	Стійка (остаточна)	Відмова, що усувається тільки в результаті проведення відновлюваних робіт, є наслідком незворотних процесів в деталях і матеріалах.
Причина виникнення відмови	Конструкційна	Виникає унаслідок порушення встановлених правил і норм конструювання.
	Виробнича	Виникає через порушення або недосконалості технологічного процесу виготовлення або ремонту ТС.
	Експлуатаційна	Виникає унаслідок порушення встановлених правил і умов експлуатації ТС.
Час виникнення відмови	Період прироблення	Обумовлена прихованими виробничими дефектами, не виявленими в процесі контролю.
	Період норм експлуатації	Обумовлена недосконалістю конструкції, прихованими виробничими дефектами і експлуатаційними навантаженнями.
	Період старіння	Обумовлена процесами старіння і зносу матеріалів і елементів ТС.
Можливості виявлення відмов	Очевидні (явні)	—
	Приховані (неявні)	—

Для вибору методів забезпечення надійності потрібні способи, що дозволяють розрахувати показники надійності з урахуванням структури виробу.

Одним з таких способів є λ - метод, який застосовується для невідновлюваних систем, який полягає в наступному: кожен елемент (мікросхема) характеризується інтенсивністю відмов, що позначається λ , яка визначається виробником елементів і наводиться в довідковій літературі. Інтенсивність відмов та ймовірність безвідмовної роботи, а також інші показники надійності є випадковими величинами, що характеризуються законом розподілу ймовірності. Вважають, що найпоширенішим є експоненційний закон розподілу, який дозволяє використовувати досить прості формули розрахунку.

Методи розрахунку надійності об'єкта залежать від виду відмови (раптові або поступові) і типу об'єкта (відновлюваний або невідновлюваний). Для деяких технічних об'єктів, які здійснюють відповідальні технологічні процеси, характерне виникнення аварійних або небезпечних ситуацій в результаті відмов. До таких об'єктів відносяться системи залізничної автоматики і телемеханіки, системи космічної і авіаційної техніки та інше.

Етап проектування має найбільше значення в забезпеченні надійності, оскільки саме в цей період закладається основа для якісного виготовлення апаратури і мінімізації впливу умов експлуатації на її функціональну надійність.

При проектуванні слід враховувати такі чинники як: інтенсивність відмов елементів; складність елементів; режим електричного навантаження; напруга живлення; температура середовища, механічні дії, зовнішні дії.

Поняття надійності є фундаментальним поняттям, яке охоплює всі етапи технічної експлуатації об'єкта. По-перше, надійність є складовою поняття ефективності. Ефективність – це властивість системи виконувати задані функції з необхідною якістю. На ефективність разом з надійністю впливають і інші характеристики, такі як точність, швидкодія та інше.

Дослідження причин відмов показали, що найбільш ненадійним елементом пристроїв є електронні компоненти. Одним з варіантів вирішення проблеми

підвищення надійності електронної системи виробів є організація комплексу додаткових випробувань електронних компонентів у споживача. Комплекс передбачає вхідний контроль, відбракувальні випробування, діагностичний неруйнівний контроль, вибірковий руйнівний контроль. В результаті вибраковуються найбільш ненадійні компоненти. Для підвищення надійності електронної системи в цілому в необхідних випадках застосовують багатократне резервування найбільш важливих складових частин, а також встановлюють щадний режим роботи електронних компонентів [3], [4].

Найважливішим аспектом новітньої мікроелектроніки є надійність мікросхем, оскільки нові перспективні технології неспроможні гарантувати створення високонадійних компонентів.

У мікроелектронній та мікропроцесорній апаратурі систем залізничної автоматики та телемеханіки (СЖАТ) важливий внесок у сумарну інтенсивність відмов вносять інтегральні мікросхеми.

1.2 Відмови напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем

Кількісні дані щодо інтенсивності відмов виробів електронної техніки визначають за результатами виробничих випробувань на заводах-виробниках, а також під час експлуатації цих виробів споживачами.

Випробування проводять за номінального електричного навантаження та температури навколишнього середовища $+25^{\circ}\text{C}$ (інтенсивність відмов - λ_0) або максимально допустимої за технічними умовами температури для конкретних типоміналів інтегральних мікросхем і типів напівпровідникових приладів (λ_n).

У табл. 1.2 наведено усереднені значення інтенсивностей відмов λ_0 за видами виробів.

Таблиця 1.2 – Значення інтенсивності відмов інтегральних мікросхем та напівпровідникових приладів у нормальному режимі

Елемент	Інтенсивність відмов, $\lambda_0 \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$		
	Мінімальне значення	Середнє значення	Максимальне значення
Однокристальні ЕОМ та мікропроцесори	—	—	1,0
Інтегральні системи: гібридні напівпровідникові	0,4 0,1	0,75 0,45	1,0 0,8
Транзистори кремнієві: Біполярні польові	— — 0,05	0,29 0,3 0,26	— — 0,7
Діоди та діодні зборки	—	0,07	—
Стабілітрони	—	0,45	—
Тиристори	0,1	0,19	0,58
Діоди випромінюючі	0,15	0,38	1,0
Оптопари	—	0,22	—
Мікросхеми оптоелектронні	—	—	—

Для розрахунку очікуваної інтенсивності відмов у конкретних умовах експлуатації використовують поправочні коефіцієнти, що підставляються у формулу:

$$\lambda_e = \lambda_0 \prod_l K_l \quad (1.1)$$

Для діодів та біполярних транзисторів ця формула має вигляд:

$$\lambda_e = \lambda_0 K_p K_\phi K_{\partial H} K_{S1} K_e, \quad (1.2)$$

де K_p — коефіцієнт режиму, що залежить від електричного навантаження (струму) та (або) температури навколишнього середовища;

K_ϕ — коефіцієнт, що враховує функціональне призначення приладу;

$K_{\partial n}$ — коефіцієнт, що залежить від величини максимально допустимого за ТУ навантаження за потужністю розсіювання (струму);

K_{S_1} — коефіцієнт, що залежить від величини відношення робочої напруги до максимально допустимого за ТУ;

K_e — коефіцієнт, що залежить від умов експлуатації.

Коефіцієнт K_e береться рівним одиниці для виробів, що розглядаються при використанні їх в стаціонарній апаратурі, що застосовується в лабораторних умовах, і рівним 2.5 для рухомої апаратури.

У переносній апаратурі цей коефіцієнт дорівнює 1.7 для інтегральних мікросхем та 1.5 для напівпровідникових приладів. Чисельні значення інших коефіцієнтів із формули (1.2) вибираються за таблицями з довідників.

Для польових транзисторів не враховуються коефіцієнти $K_{\partial n}$ і K_{S_1} , а тиристорів K_{ϕ} і K_{S_1} . Для стабілітронів та оптоелектронних напівпровідникових приладів враховуються тільки K_p і K_e .

Якщо інтегральні мікросхеми експлуатуються у полегшених режимах, або проводяться спеціальні заходи щодо забезпечення надійності апаратури для визначення експлуатаційної інтенсивності відмов λ_e , додатково використовується поправочний коефіцієнт, K_{nonp} вибирається з наступних діапазонів його значення:

0,2 - 0,4 — при експлуатації мікросхем у полегшених режимах;

0,4 - 0,7 — під час проведення комплексу додаткових заходів;

0,1 - 0,3 — при спільному використанні вказаних заходів.

При розрахунку сумарної інтенсивності відмов апаратури застосовують додатково два коефіцієнти: $K_{ам}$ - коефіцієнт, що враховує наявність амортизації апаратури і $K_{к.обсл.}$ - коефіцієнт якості обслуговування апаратури. Для апаратури СЖАТ береться $K_{ам} = 0,85$ та $K_{к.обсл.} = 0,5$.

У напівпровідникових приладів крім відмови типу «обрив», «коротке замикання», «пробою» можливі параметричні відмови, пов'язані з погіршенням їх параметрів (табл. 1.3).

Зовнішніми негативними впливами в мікросхемах та напівпровідникових приладах викликаються різні деградаційні процеси, які створюють передумови для відмов.

Таблиця 1.3 – Розподіл у відсотках за видами відмов напівпровідникових приладів

Група виробів	Обрив	Коротке замикання	Пробій	Параметричні
Діоди	15	15	5	65
Транзистори, транзисторні зборки	15	10	5	70
Тиристори	20	—	—	80
Оптоелектронні прибори	50	—	—	50

Термічні відмови виробів є наслідком електричних навантажень провідників, дії зовнішніх теплових полів та термічних пробіїв діелектриків та напівпровідників. Токові перевантаження контактів призводять до теплоперенесення з контактним зварюванням або їх розігрівом дуговим розрядом, виникнення струмових шумів, прискорення електролітичної ерозії.

Допустимі значення механічних впливів на інтегральні мікросхеми та напівпровідникові прилади в 1,5-2 рази більше, ніж для апаратури СЖАТ. Через обмеження за нижнім значенням робочої температури -450°C мікропроцесори та однокристальні ЕОМ можуть використовуватися тільки в апаратурі СЖАТ. Основними причинами відмов напівпровідникових приладів та інтегральних схем є: дефекти металізації – 26% та внутрішніх висновків – 23%; дефекти у складанні корпусу – 17% та зміна електричних характеристик – 12%; поверхневі порушення та несуміщення – по 7%; дефекти оксиду та

негерметичність – по 4%. Внутрішні міжелементні сполуки активних структур сучасних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем виконуються нанесенням з відповідним розведенням алюмінієвої плівки товщиною приблизно 1 мкм на поверхню кристала. У процесі експлуатації відбувається деградація плівки, що займає до 50% площі кристалічної поверхні. Проникнення вологи в корпус викликає корозію та окислення алюмінієвої металізації. Електродифузія, електрохімічна корозія та окислення алюмінію викликає збільшення опору струмоведучих доріжок. Цим порушується температурний режим роботи приладу, що призводить до локальних перегріву та зростання ймовірності обриву металізації [5], [6], [7].

1.3 Надійність компонентів електронних схем

У таблиці 1.4 наведено усереднені значення інтенсивностей відмов конденсаторів, резисторів, трансформаторів, комутаційних та настановних виробів, низькочастотних з'єднувачів, що використовуються в електронній та мікроелектронній апаратурі.

Для магнітокерованих контактів у табл. 1.5 інтенсивність відмов λ_o наведено у розрахунку одного спрацьовування.

Формули для розрахунку інтенсивності відмов у конкретних умовах експлуатації виробів, що розглядаються, розрізняються навіть для різних типів конденсаторів і резисторів, тому вони не наводяться. Для всіх типів даних виробів використовується коефіцієнт K_p , а коефіцієнт K_e застосовується для конденсаторів, резисторів, тумблерів та штепсельних з'єднувачів. Для компонентів електронних схем додатково використовуються такі коефіцієнти формули (1.1): K_t - коефіцієнт режиму для конденсаторів і запобіжників, що залежить від температури навколишнього середовища; K_c - коефіцієнт, що залежить від величини номінальної ємності конденсатора; K_{nc} - коефіцієнт, що визначається величиною послідовного активного опору в схемі між

конденсатором і джерелом живлення; K_R - коефіцієнт, що залежить від величини номінального опору резистора; K_M - коефіцієнт, що визначається величиною номінальної потужності резистора; K_{KC} - коефіцієнт, що визначається кількістю зчленувань - розчленувань з'єднувача; K_{KK} - коефіцієнт, що залежить від кількості контактів комутаційного виробу або з'єднувача.

Таблиця 1.4 – Значення інтенсивності відмов компонентів електронних схем

Елемент	Інтенсивність відмов, $\lambda_0 \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$		
	мінімальне значення	середнє значення	максимальне значення
Конденсатори:			
керамічні	0,001	0,01	0,02
паперові	0,007	0,02	0,05
слюдяні	—	0,01	—
оксидно-електролітичні	0,05	0,07	0,13
підлаштувальні	0,01	0,015	0,02
Резистори:			
постійні недротяні	—	0,01	—
постійні дротяні	—	0,02	—
металофольгові	—	0,02	—
змінні недротяні	—	0,01	—
змінні дротяні	—	0,03	—
Терморезистори	—	0,003	—
Трансформатори:			
силові(живлення)	—	1,7	—
міжкаскадні	—	0,11	—
Запобіжники плавкі	—	0,16	—
Перемикачі, тумблери	0,06	0,17/КГ	1,0
Контакти магнітокеровані	0,0002*	0,005*	0,03*
З'єднувачі: штепсельні			
циліндричні	0,0013	0,0032/Ш	0,0067
прямокутні	0,0009	0,008/Ш	0,022
З'єднання пайкою	—	0,001	—
Провід сполучний	0,0008	0,015	0,012
Кабелі	0,0002	0,0475	0,22
Примітка: Ш - на штирок; КГ – на контактну групу.			

Таблиця 1.5 – Значення коефіцієнта K_e за групами апаратури

Тип виробів	Стаціонарна у лабораторних умовах	Переносна	Рухома
Конденсатори, резистори, запобіжники, перемикачі, тумблери	1	2	2,5
З'єднувачі низькочастотні	1	1,5	2,5
Трансформатори	1	1,5	2
Контакти магнітокеровані	0,4	0,8	1

Значення коефіцієнта K_e для аналізованих компонентів наведено у табл. 1.5.

В апаратурі мікроелектронних систем автоблокування на відмови резисторів припадає до 8%, на відмови конденсаторів - до 4% і відмови трансформаторів за їх наявності - до 2% від загальної інтенсивності відмов блоку чи модуля. На ці елементи разом із мікросхемами та напівпровідниковими приладами припадає до 95 - 99,9% від загальної інтенсивності відмов [8], [9].

Деградаційні процеси в конденсаторах викликають появу як раптових, і поступових (параметричних) відмов табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Розподіл у відсотках за видами відмов низьковольтних конденсаторів

Група виробів	Коротке замикання	Обрив	Параметричні
Конденсатори постійної ємності:			
керамічні	60	5	35
оксидно-електролітичні	36	36	28
оксидно-напівпровідникові	26	5	69
з органічним синтетичним діелектриком	55	5	40
паперові	45	45	10
Конденсатори підлаштувальні з твердим діелектриком	82	6	12

Конденсатори керамічні монолітні відносяться до групи найбільш масових низьковольтних конденсаторів (K10-17, K10-28, K10-50 та ін.). Основними причинами їх відмов є: пробої внаслідок мікротріщин та розшарування пакета, підвищена пористість кераміки, забруднення на поверхні та сторонні включення у кераміці, міграції срібла в кераміку, неякісне глазурування тощо - 27%; зниження опору ізоляції через дефекти кераміки та покриттів, а також поверхневих забруднень - 45%; неякісне паяння контактного вузла та порушення режимів спалювання срібла, що призводять до втрати ємності – 4%.

З електролітичних наймасовішими є конденсатори алюмінієві оксидно-електролітичні. В основному ці конденсатори полярні, але є і неполярні, що представляють дві секції, що зустрічно включені. Основний вид відмови таких конденсаторів (до 30%) - зниження ємності та зростання $\text{tg } \delta$ внаслідок втрати електроліту, обумовленої підвищеним газовиділенням через зростання струму витоку та розвитку корозійних процесів на анодних пластинах, а також неякісне виконання вузлів, ущільнення, недопросочення секцій електролітом. Другою за значимістю причиною відмов (26%) є корозія анодного виведення та анодної фольги.

У процесі експлуатації електролітичних конденсаторів частою причиною відмов є короткочасна подача напруги зворотної полярності або значні перевищення змінної напруги (у процесі налаштування, під час перевірки тестером, перехідних режимах та ін.). Такі порушення режимів роботи, як правило, не відразу позначаються на електричних характеристиках конденсаторів, проте перегрів, що викликаються ними, і часткове розчинення оксидного шару проявляються при подальшій експлуатації конденсаторів [10], [11], [12].

У резисторів від 10 до 25% відмов посідають обриви, інше - параметричні відмови.

У трансформаторах і дроселях відмови відбуваються через пробої ізоляції на корпус або між обмотками, обрив провідників в обмотці, замикання між

витками обмотки, порушення контактів і з'єднань, неприпустиме зниження опору ізоляції внаслідок її старіння або надмірного зволоження, порушення міжлистової ізоляції.

Виткове коротке замикання обмотки призводить до надмірного нагрівання трансформатора або дроселя. Порушення міжлистової ізоляції сердечників магнітопроводу призводить до неприпустимого підвищення температури окремих частин магнітопроводу і всього магнітопроводу в цілому, підвищеного нагріву обмоток, вигорання частини магнітопроводу [13], [14].

Можна зробити висновок, що до основних факторів, які впливають на надійність схем та об'єктів, відносяться: суб'єктивні, які залежать від діяльності людини, та об'єктивні, які включають внутрішні (за рахунок зносу або старіння) і зовнішні.

Таким чином, підвищення надійності електронних компонентів (ЕК) є комплексною проблемою, яка включає вирішення питань, які пов'язані з обґрунтованим вибором конструкційних та технологічних матеріалів, а також розробкою найбільш раціональних схемотехнічних рішень.

Найбільш ненадійним елементом пристроїв є електронні компоненти та розрахунок надійності, які залежать від виду відмови і типу об'єкта. У мікроелектронній та мікропроцесорній апаратурі систем залізничної автоматики та телемеханіки вагомий внесок у сумарну інтенсивність відмов вносять інтегральні мікросхеми.

Тому при виборі показників надійності слід мати на увазі, що ці показники повинні достатньо повно описувати надійні властивості системи, бути зручними для аналітичного розрахунку та експериментальної перевірки за наслідками випробувань.

2 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ СХЕМОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Методи розрахунку надійності

На різних стадіях проектування є необхідність приблизно оцінити, а головне, порівняти надійність варіантів системи.

У ході проектування постійно збільшується обсяг інформації про створювану систему, а відтак виникають і нові завдання. Тому розрахунки надійності на різних стадіях проектування проводяться з різними цілями. Можна виділити такі етапи розрахунку надійності системи: орієнтовний та остаточний [15].

Усі етапи розрахунку надійності проектування системи у принципі однакові. Вони відрізняються тим, що в міру створення системи враховується дедалі більше факторів, що впливають на надійність.

Якщо відмова системи настає при відмові одного з її елементів, то кажуть, що така система має основне поєднання елементів. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи системи за умови, що відмови елементів є незалежними, дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи її елементів, тобто [16], [17].

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (2.1)$$

де n - число елементів системи;

$P_i(t)$ – можливість безвідмовної роботи i -го елемента.

Імовірність безвідмовної роботи елемента за будь-якого закону зміни інтенсивності відмов визначається виразом

$$P_i(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_i(t) dt \right] \quad (2.2)$$

Імовірність безвідмовної роботи системи у такому разі визначається виразом

$$P_c(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^1 \lambda_i(t) dt \right] \quad (2.3)$$

Насправді, зазвичай, розрахунки надійності систем виробляються для періоду нормальної експлуатації, коли інтенсивності відмов елементів постійні у часі, тобто, $\lambda_i(t) = \text{const}$. При цьому час виникнення відмов зазвичай підпорядкований експоненційному закону розподілу.

Вирази для розрахунку кількісних характеристик у цьому випадку набувають вигляду:

$$P_c(t) = e^{-\Lambda_c t}; \quad \Lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad (2.4)$$

$$f_c(t) = \Lambda_c e^{-\Lambda_c t}; \quad T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\Lambda_c}$$

де Λ_c – інтенсивність відмови системи.

У разі, якщо система містить k груп елементів, а елементи у групах рівнонадійні, інтенсивність відмов системи буде

$$\Lambda_c = \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i \quad (2.5)$$

де k - число груп елементів;

N_i – кількість елементів i – го типу.

У разі, якщо $\Lambda_c \ll 1$, а $P_c(t) > 0,9$, основні характеристики надійності можна з достатньою для практики точністю обчислити за такими наближеними формулами:

$$P_c(t) \approx 1 - t \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i = 1 - \Lambda_c t \quad (2.6)$$

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda_c}; f(t) \approx \Lambda_c(1 - \Lambda_c t)$$

При значеннях $P_c(t)$, близьких до одиниці, з достатньою для практики точністю можна використовувати такі наближені формули:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^N q_i(t); \quad (2.7)$$

$$P_i^N(t) \approx 1 - Nq_i(t); \sqrt[n]{P_i(t)} \approx 1 - \frac{q_i(t)}{N}$$

2.2 Орієнтовний розрахунок надійності

Орієнтовний розрахунок надійності ґрунтується на таких припущеннях: усі однотипні елементи пристрою рівнонадійні; інтенсивності відмов елементів не залежать від часу, тобто, $\lambda_i(t) = \text{const}$; пристрій має основне з'єднання елементів.

Такого типу розрахунок проводиться на етапах предескізного та ескізного проектування за блок-схемою пристрою. Завдання розрахунку: визначення мінімального допустимого рівня надійності елементів проектованої системи, порівняльна оцінка різних варіантів пристрою; перевірка вимог щодо надійності, висунутих замовником у технічному завданні, тощо.

Орієнтовний розрахунок надійності може бути зроблений двома методами:

- за середньогруповими інтенсивностями відмов елементів;
- з використанням даних із досвіду експлуатації [18].

2.2.1 Розрахунок надійності за середньогруповими інтенсивностями відмов елементів

Для розрахунку повинні бути відомі: кількість елементів різних типів N_i та інтенсивності відмов елементів різних типів λ_i . Значення λ_i для періоду нормальної експлуатації наводяться у довідниках та підручниках за надійністю.

Число елементів приблизно може бути визначено вже на стадії ескізного проекту.

Послідовність розрахунку:

1. Усі елементи розбивають на k груп із приблизно однаковими інтенсивностями відмов.
2. За довідниками знаходять середні значення інтенсивностей відмов кожної групи λ_i або знаходять максимальне та мінімальне значення, тобто, $\lambda_{i, \max}$ та $\lambda_{i, \min}$.
3. Для кожної групи обчислюють $N_i \lambda_i$
4. Визначають загальну інтенсивність відмов системи

$$\Lambda_c = \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i.$$

5. Розраховують середній час роботи до першої відмови

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda_c}$$

6. Визначають можливість безвідмовної роботи системи за заданий час

$$P_c(t) = e^{-\Lambda_c t} = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}.$$

2.2.2 Розрахунок надійності з використанням даних із досвіду експлуатації

Використання даних з досвіду експлуатації дозволяє отримати точніші результати розрахунків. Існують два методи розрахунку.

1. Розрахунок надійності за середнім рівнем надійності однотипної апаратури. Метод заснований на припущенні про те, що середня інтенсивність відмов $\lambda_{\text{сер}}$ елементів проектованої системи та системи-аналогу за однакових умов експлуатації дорівнює між собою. Це припустимо, якщо: а) застосовуються елементи одного типу з рівними середньогруповими інтенсивностями відмов; б) співвідношення N_i / N та режими роботи елементів приблизно однакові; в) схемні рішення приблизно однакові; г) однакові умови експлуатації.

Як вихідні дані необхідно знати: напрацювання на відмову T_{0a} системи-аналогу; загальну кількість елементів у системі-аналозі N_a ; загальну кількість елементів у проектованій системі N_{Π} .

Тоді, відповідно до припущення, що середні значення інтенсивностей відмов у системі-аналозі та проектованій системі рівні,

$$\lambda_{cp} = \frac{1}{N_a T_{0a}} = \frac{1}{N_{\Pi} T_{0\Pi}}, \quad (2.8)$$

де T_{0a} - напрацювання на відмову проектованої системи.

Зі співвідношення (2.8) випливає, що

$$T_{0\Pi} = \frac{N_a}{N_{\Pi}} T_{0a}. \quad (2.9)$$

2. Розрахунок надійності з використанням коефіцієнта перерахунку, одержаного з досвіду експлуатації.

Проектована система та система-аналог можуть відрізнятися схемою, призначенням, але елементи повинні працювати в однакових умовах.

При розрахунку повинні бути відомі інтенсивність відмов елементів λ_i , кількість елементів кожного типу в проектованій системі N_{ni} та системі-аналозі N_{ai} , напрацювання на відмову системи-аналогу T_{0a} .

Послідовність розрахунку:

1. Визначається розрахунковий доробок на відмову системи-аналогу

$$T_{opa} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k N_{ai} \lambda_i}$$

2. Визначається коефіцієнт перерахунку

$$\eta = \frac{T_{oa}}{T_{opa}}. \quad (2.10)$$

3. Проводиться розрахунок напрацювання на відмову проектованої системи

$$T_{o\Pi} = \eta T_{opa} \quad (2.11)$$

Перевага розглянутого орієнтовного розрахунку в тому, що він, не вимагаючи громіздких розрахунків, дозволяє врахувати два дуже важливі фактори: умови експлуатації та вплив обслуговування [19], [20].

2.3 Розрахунок надійності при доборі типів елементів

Цей розрахунок проводиться за принциповими схемами системи, коли вже відомі необхідні параметри елементів для вибору типів. Необхідність цього розрахунку викликана тим, що у проектувальника виникає завдання вибору типу елемента залежно від вартості, надійності, дефіцитності тощо, так, наприклад, високонадійні елементи є й дорожчими. Завдання цього розрахунку – отримання необхідної надійності системи за мінімальної вартості.

Розрахунок проводиться за тими ж формулами, що й розрахунок за середньогруповими інтенсивностями відмов елементів, але збільшується кількість груп елементів, а отже, збільшується й обсяг розрахунку [21].

2.4 Остаточний розрахунок надійності. Приклади

Остаточний, або уточнений, розрахунок надійності проводиться на завершальній стадії проектування, коли визначено типи, номінали та режими роботи всіх елементів.

Відомо, що інтенсивність відмов елементів залежить від режимів їх роботи, температури навколишнього середовища, вібрації та інших факторів, що дестабілізують, збільшують інтенсивність відмов. Залежність інтенсивності відмов елементів від величини електричного навантаження може бути врахована за допомогою коефіцієнта навантаження. Для резисторів під цим розуміється ставлення

$$K_H^R = \frac{P_\Phi}{P_H}, \quad (2.12)$$

де P_Φ і P_H - фактична і номінальна потужності, що розсіюються на резисторі.

Для конденсаторів:

$$K_H^C = \frac{U_\Phi}{U_H}, \quad (2.13)$$

де U_Φ і U_H - фактична та номінальна напруга на конденсаторі.

Для транзисторів:

$$K_H^{VT} = \frac{P_{кФ}}{P_{кП}}, \quad (2.14)$$

де $P_{кФ}$ і $P_{кП}$ - фактична та номінальна потужності, що розсіюються на колекторі транзистора.

Для напівпровідникових діодів:

$$K_H^{VD} = \frac{I_\Phi U_{обр.Ф}}{I_\Pi U_{обр.П}}, \quad (2.15)$$

де I_{Φ} та I_{Π} – фактичний та номінальний струми;
 $U_{обр.\Phi}$ і $U_{обр.\Pi}$ – зворотні напруги на р-п переході.

Для електровакуумних ламп

$$K_{\Pi} = \frac{P_{a.\Phi} + P_{c.\Phi} + P_{n.\Phi}}{P_{a.n} + P_{c.n} + P_{n.n}}, \quad (2.16)$$

де $P_{a.\Phi}, P_{c.\Phi}, P_{n.\Phi}, P_{a.n}, P_{c.n}, P_{n.n}$ – фактичні та номінальні значення потужностей, що розсіюються на аноді, сітці та розжаренні лампи.

Інтенсивність відмов елементів 1-го типу з урахуванням впливу навантаження та умов експлуатації

$$\lambda_i(v) = \lambda_{0i} \cdot a_1 \cdot a_2 \dots, \quad (2.17)$$

де a_1 – коефіцієнт, що враховує електричне навантаження та температуру елемента;

a_2 – коефіцієнт, що враховує вплив механічних навантажень (удари, вібрація).

Значення коефіцієнтів a_1 та a_2 можуть бути знайдені з таблиць або графіків, які наводяться у довідниках з надійності [21], [22] або основних документів (РД) з надійності.

Досвід експлуатації апаратури показує, що при досить високій частоті включення, інтенсивність відмов збільшується. Інтенсивність відмов такого пристрою можна визначити з виразу

$$\lambda = \lambda_p(v) + \lambda_{ц}n, \quad (2.18)$$

де $\lambda_p(v)$ – інтенсивність відмов при безперервній роботі апаратури, що визначається за формулою (2.17);

$\lambda_{ц}$ – інтенсивність відмов одного циклу включення;

n – середня частота включень за 1 годину.

Якщо при визначенні характеристик надійності апаратури на інтервалі часу t виявиться, що частина цього часу, елемент або система, перебували у вимкненому стані $t_{xp} = t - t_p$, то необхідно враховувати, що при вимкненому стані інтенсивність відмов апаратури λ_{xp} , як правило, менше інтенсивності відмов $\lambda(v)$ при роботі апаратури.

Враховуючи роботу, зберігання та включення апаратури, ймовірність безвідмовної роботи елемента або системи можна визначити з наступного виразу

$$P(t) = \exp \left[-\lambda_p(v) t_p \left(1 + \alpha z + \frac{J N^*}{t_p} \right) \right], \quad (2.19)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{\lambda_{xp}}{\lambda(v)}; \quad z = \frac{t_{xp}}{t_p}; \quad J = \frac{\lambda_{ц}}{\lambda_p(v)};$$

λ_{xp} – інтенсивність відмов апаратури у вимкненому стані, наприклад, для напівпровідникових приладів $\lambda_{xp} = (0,1 - 0,01) \lambda_p$;

N^* – загальна кількість включень за час t .

Уточнений розрахунок надійності проводиться аналогічно розрахунку середньогрупових інтенсивностей відмов елементів, але при визначенні інтенсивності відмов елементів використовують формулу (2.17) .

Перед початком розрахунку необхідно за принциповою схемою пристрою провести тепловий розрахунок і визначити очікувану максимальну температуру всередині блоку, коефіцієнти навантаження всіх елементів, а за графіками та таблицями – коефіцієнти a_1 , a_2 і т. д. Потім за формулою (2.17) визначаються очікувані інтенсивності відмов елементів та інтенсивність відмов системи у включеному стані $\lambda_p(v)$, $\lambda_c(v)$.

Якщо в результаті розрахунку виявиться, що інтенсивність відмов системи більше заданого рівня, то доцільно або вибрати більш надійні елементи, або полегшити режими роботи.

Типові приклади та їх вирішення

Приклад 1. Система включає три блоки. Інтенсивність відмов електронного блоку дорівнює $\lambda_1 = 1,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ч}}$. Інтенсивність відмов двох інших блоків, які являють собою електромеханічні пристрої, лінійно залежить від часу і визначається наступними виразами $\lambda_2 = 2,0 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}$ та $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-6} t^{1,5} \frac{1}{\text{ч}}$. Потрібно визначити можливість безвідмовної роботи системи протягом 100 годин.

Розв'язання

1. На підставі виразу (2.3) маємо

$$P_c(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt \right] == \exp \left\{ - \left[\int_0^t \lambda_1(t) dt + \int_0^t \lambda_2(t) dt + \int_0^t \lambda_2(t) dt \right] \right\} \\ == \exp \left[- \left(1,5 \cdot 10^{-4} t + 2 \cdot 10^{-5} \frac{t^2}{2} + 2 \cdot 10^{-6} \frac{t^{2,5}}{2,5} \right) \right].$$

Для $t = 100$ год.

$$P_c(t) = \exp[-(0,015 + 0,1 + 0,2)] = e^{-0,315} = 0,73.$$

Приклад 2. Система складається з трьох блоків, середнє напрацювання до першої відмови яких відповідно дорівнює $T_1 = 1000$ год., $T_1 = 3200$ год. і $T_1 = 1800$ год. Система має основне з'єднання. Для блоків справедливий експоненціальний закон надійності. Визначити ймовірність безвідмовної роботи протягом 50 і 100 годин та середнє напрацювання до першої відмови.

Розв'язання

1. Скористаємося виразом (2.5) для середнього напрацювання до першої відмови.

$$\begin{aligned}\Lambda_{cp} &= \sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{3200} + \frac{1}{1800} = \\ &= 18,69 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ч}}.\end{aligned}$$

Оскільки система має основне з'єднання, ймовірність безвідмовної роботи визначається за виразом (2.5)

$$P_c(50) = e^{-18,69 \cdot 10^{-4} \cdot 50} = 0,91; P_c(100) = e^{-18,69 \cdot 10^{-4} \cdot 100} = 0,83.$$

Визначимо середнє напрацювання до першої відмови, скориставшись формулою (2.5)

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda_c} = \frac{1}{18,69} \cdot 10^{-4} = 535,05 \text{ ч.}$$

Приклад 3. Пристрій складається з 12 низькочастотних малопотужних транзисторів, 4 кремнієвих діодів, 148 керамічних конденсаторів, 3 електролітичних танталових конденсаторів, 140 резисторів типу МЛТ потужністю 0,5 Вт, 1 силового трансформатора, 6 дроселів, 3 котушок індуктивності.

Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи протягом $t = 100, 200, 300$ годин і середнє напрацювання до першої відмови T_{cp} .

Розв'язання

Для виконання орієнтовного розрахунку надійності складається таблиця, табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення для розрахунку надійності

Найменування та тип елемента	Кількість елементів N_i	Інтенсивність відмов $\lambda_i \cdot \frac{10^{-5} 1}{\text{ч}}$	$N_i \lambda_i \cdot 10 - \frac{10^{-5} 1}{\text{ч}}$
Транзистор низькочастотний, малопотужний	12	0,3	3,6
Кремнієвий діод	4	0,5	2,0
Конденсатор керамічний	148	0,14	2,72
Конденсатор електролітичний	3	0,24	0,72
Резистор МЛТ-0,5	140	0,06	7,0
Трансформатор силовий	1	0,3	0,3
Дросель	6	0,1	0,6
Котушка індуктивності	3	0,05	0,15

Значення інтенсивності відмов елементів знаходимо за таблицею номінальних значень інтенсивностей відмов елементів, які визначаються у довідниках та задачниках з теорії надійності, та заносимо у відповідний стовпець табл. 2.1.

Обчислюємо $N_i \lambda_i$ та заносимо їх у табл. 2.1, а потім за виразом (2.5) визначаємо інтенсивність відмов системи

$$\Lambda_c = \sum_{i=1}^b N_i \lambda_i = 35,09 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи системи та $T_{\text{ср}}$, використовуючи вирази (2.4)

$$P(100) = e^{-35,09 \cdot 10^{-5} \cdot 100} \approx 0,97; P(200) = e^{-35,09 \cdot 10^{-5} \cdot 200} \approx 0,93;$$

$$P(300) = e^{-35,09 \cdot 10^{-5} \cdot 300} \approx 0,90;$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\Lambda_c} = \frac{1}{-35,09} \cdot 10^{-5} = 2849,8 \text{ ч.}$$

Приклад 4. Виконати орієнтовний розрахунок надійності проекрованої системи, якщо відомо, що вона складається з $N_{\Pi} = 6500$ елементів та знайдено систему-аналог, умови роботи яких та співвідношення N_i/N елементів у системах приблизно однакові. Система-аналог складається з $N_a = 8200$ елементів. З досвіду експлуатації системи-аналогу встановлено, що напрацювання на відмову $T_{0a} = 1500$ год.

Розв'язання

Так як надійність елементів, на яких зібрана проектована система та система-аналог, та умови експлуатації приблизно однакові, то на підставі цього припускаємо, що середня інтенсивність відмов елементів, яка визначається виразом (2.8), для цих систем однакова

$$\lambda_{cp} = \frac{1}{N_a T_{0a}} = \frac{1}{N_{\Pi} T_{0\Pi}}.$$

Підставляючи дані з умови завдання, отримуємо

$$T_0 = \frac{N_a}{N_{\Pi}} T_{0a} = \frac{8200}{6500} \cdot 1500 = 1892,3 \text{ ч.}$$

Приклад 5. Проектується нова система замість існуючої. У ній основні логічні вузли буде виконано на інтегральних схемах. Проектована система використовуватиметься в тих же умовах, що й існуюча, напрацювання на відмову якої, отримане в результаті експлуатації, становить $T_{0a} = 340$ год.

Потрібно зробити орієнтовний розрахунок надійності.

Дані про тип та кількість елементів у проектованій системі та існуючій системі наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Тип та кількість елементів у проектуваній системі та існуючій системі

Тип елемента	$\lambda_i \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$	Система-аналог		Проектована система	
		N_{ai}	$N_{ai} 10^{-6} \text{ 1/ч}$	N_{pi}	$N_{pi} \lambda_i 10^{-6} \text{ 1/ч}$
Транзистори	3,0	800	2400	80	240
Інтегральні схеми	0,1	50	500	250	25
Резистори	0,3	1200	600	900	450
Конденсатори	1,6	400	640	600	960
Трансформатори	3,0	10	30	9	27
Електродвигуни	8,0	12	96	12	96
Реле	15,0	50	750	60	900
Індикаційні лампи	8,2	15	123	20	164

Розв'язання

Визначаємо номінальні значення інтенсивності відмов, для чого заносимо в табл. 2.2. Обчислюємо $N_{pi} \lambda_i$ та $N_{ai} \lambda_i$ та заносимо до табл. 2.2.

Визначаємо розрахункове значення напрацювання на відмову від існуючої системи

$$T_{opa} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k N_{ai} \lambda_i} = \frac{1}{4644 \cdot 10^{-6}} = 215,33 \text{ ч.}$$

Обчислюємо відповідно до виразу (2.10) коефіцієнт перерахунку

$$\eta = \frac{T_{0a}}{T_{opa}} = \frac{340}{215,33} = 1,58.$$

Обчислюємо T_{opp} розрахункове значення напрацювання на відмову системи, що проектується

$$T_{0p\Pi} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k N_{\Pi i} \lambda_i} = \frac{1}{2862 \cdot 10^{-6}} = 349,11 \text{ ч.}$$

Визначаємо значення напрацювання на відмову проектованої системи, використовуючи вираз (2.11)

$$T_{0\Pi} = \eta T_{0p\Pi} = 1,58 \cdot 349,11 = 551,59 \text{ ч.}$$

Можна зробити висновок, що орієнтовні методи розрахунку надійності дозволяють на ранніх стадіях проектування наближено оцінити очікуваний рівень надійності і зробити висновок про можливість виробу з точки зору надійності. Уточнений або повний розрахунок надійності проводиться на більш пізніх стадіях конструкторського проектування, коли відома повна схема виробу, його конструкція та умови експлуатації. Для визначення надійності та функційної безпечності використовують розрахункові, розрахунково-експериментальні чи експериментальні методи. Методику та необхідність визначення показників надійності та функційної безпечності регламентовано національними і галузевими нормативними документами.

3 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ТРИГЕРА

Поставленою задачею в даній роботі було виконати уточнений розрахунок надійності тригера, принципова схема якого наведена на рис. 3.1, та визначити основні показники надійності об'єкта.

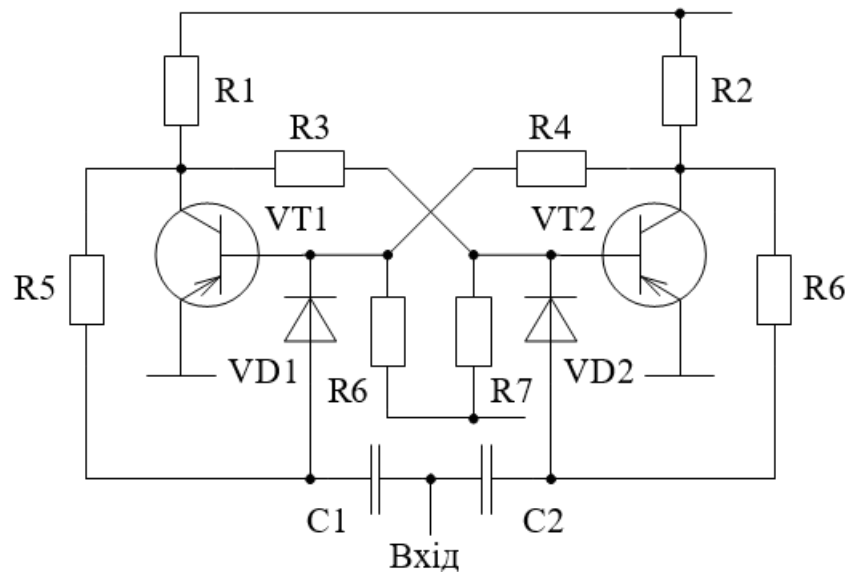


Рисунок 3.1 – Схема тригера

Специфікація елементів тригера:

резистор - R1, R2 - ВЗР – 820 Ом;

---«>»--- R3, R4 - ВЗР – 10 кОм;

---«>»--- R5, R8 - ВЗР – 3 кОм;

---«>»--- R6, R7 – ВЗР – 3,9 кОм;

Діоди - VD1, VD2 – Д9;

Конденсатор - C1, C2 – К73-16-0,1 - 150 В;

Транзистор - VT1, VT2 – КТ315Г.

$I_x = 30$ мА.

Апаратура буде використовуватись у приміщенні за відсутності механічних навантажень. Температура усередині блоку, де встановлений тригер, 40 °С.

Для визначення надійності обчислимо інтенсивність відмов елементів відповідно до виразу $\lambda_i(v) = \lambda_{0i} \cdot a_1 \cdot a_2 \dots$, який враховує вплив умов експлуатації, режимів роботи тощо.

Електричні режими роботи елементів можуть бути визначені експериментально або отримані в результаті розрахунку.

Розрахунок може бути виконаний тільки для одного стану тригера, оскільки він симетричний і при зміні стану елементи навантаження змінюються місцями. Розрахунок зроблений для такого стану тригера, при якому транзистор VT1 відкрито, а VT2 - закрито. Струми та напруги на елементах діодно-ємнісних ключів визначені для випадку надходження на вхід прямокутних імпульсів з амплітудою, що дорівнює 10 В.

Схема Т-тригера, в якому застосований діодно-ємнісний ланцюг запуску, показана на рис. 3.1. Даний тригер має два входи та два виходи. Нехай вихідний стан транзистор Т1 відкритий, а транзистор Т2 - закритий. Напруга на діоді VD1 близько до нуля, а діод VD2 зміщений у зворотному напрямку напругою, близькою до напруги джерела живлення, тобто закритий. Негативний імпульс, що запускає, пройде тільки через діод VD1 на базу відкритого транзистора Т1 і закриє його, що викличе перемикання тригера. При цьому вже діод VD1 буде закритий великою напругою, а на діоді VD2 замикаюча напруга буде відсутня.

Наступний імпульс, що запускає, пройде через діод VD2, закриє транзистор Т2 і схема повернеться у вихідний стан, а на виході тригера буде сформований прямокутний імпульс.

Т-тригер можна використовувати, наприклад, як дільник частоти проходження імпульсів, оскільки імпульс на виході Q формується після приходу на вході двох імпульсів. При визначенні показників надійності даного тригера використовується послідовна система надійності. Результати розрахунку зведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку показників надійності

Позначення	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	VT1	VD2	VT2	VD1
$I, 10^{-3}, \text{A}$	10	1,06	0,17	1,06	3,3	1,66	1,3	0,3	3,0	0,01	10	0,01

1. Визначаємо за формулою коефіцієнти навантаження резисторів.

$$K_{\text{H}}^{R1} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 820}{0,5} = 0,16;$$

$$K_{\text{H}}^{R2} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(1,06 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 820}{0,5} = 0,18;$$

$$K_{\text{H}}^{R3} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(0,17 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10000}{0,5} = 0,57$$

$$K_{\text{H}}^{R4} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(1,06 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10000}{0,5} = 0,022$$

$$K_{\text{H}}^{R5} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(3,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3000}{0,5} = 0,065$$

$$K_{\text{H}}^{R6} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(1,66 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3900}{0,5} = 0,021$$

$$K_{\text{H}}^{R7} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(1,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3900}{0,5} = 0,013$$

$$K_{\text{H}}^{R8} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{(0,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3000}{0,5} = 0,0054$$

Інтенсивність відмов резисторів

$$\lambda^{R1}(v) = \lambda_0^{R1} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16 = 0,08 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

$$\lambda^{R2}(v) = \lambda_0^{R2} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,18 = 0,09 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

$$\lambda^{R3}(v) = \lambda_0^{R3} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16 = 0,08 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

$$\lambda^{R4}(v) = \lambda_0^{R4} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16 = 0,08 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

$$\lambda^{R5}(v) = \lambda_0^{R5} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,17 = 0,08 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

$$\lambda^{R6}(v) = \lambda_0^{R6} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16 = 0,08 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

$$\lambda^{R7}(v) = \lambda_0^{R7} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16 = 0,08 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

$$\lambda^{R8}(v) = \lambda_0^{R8} a_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16 = 0,08 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

Значення λ_{oi} та a_1 знаходимо, використовуючи значення, які приводяться у довідниках та підручниках про надійність [21] [22]. Результати розрахунку та табличні дані заносимо в табл. 3.2.

За виразом визначаємо коефіцієнти навантаження та інтенсивність відмов діодів

$$K_{\text{н}}^{VD} = \frac{I_{\Phi}}{I_{\text{н}}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-3}} = 0,33;$$

$$\lambda^{VD}(v) = \lambda_0^{VD} a_1 = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,32 = 0,45 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}$$

Значення λ_{oi} та a_1 знаходимо, використовуючи довідники [22]. Результати розрахунку та табличні дані заносимо в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку та табличні дані

Найменування та тип елементів	Позначення на схемі	N_i	Інтенсивність відмов у номінальному режимі $\lambda_i \cdot 10^{-6}, \frac{1}{\text{ч}}$	Режим роботи	
				K_H	°C
Резистор ВЗР	R1	1	0,5	0,16	40
— —	R2	1	0,5	0,18	40
— —	R3	1	0,5	0,57	40
— —	R4	1	0,5	0,022	40
— —	R5	1	0,5	0,065	40
— —	R6	1	0,5	0,021	40
— —	R7	1	0,5	0,013	40
— —	R8	1	0,5	0,0054	40
Діод Д9	VD1, VD2	2	3	0,33	40
Конденсатор К73-16-0,1-150	C1, C2	2	1,4	0,0575	40
Транзистор КТ315Г	VT1	2	1,7	$3 \cdot 10^{-4}$	40
— —	VT2	2	1,7	$1,0 \cdot 10^{-3}$	40

Закінчення таблиці 3.2

Найменування та тип елементів	Поправочний коефіцієнт a_1	$\lambda_i(v) = \lambda_{0i} a_1, 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$	$N_i \lambda_i(v), 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$
Резистор ВЗР	0,27	0,13	0,13
— —	0,33	0,16	0,16
— —	0,76	0,38	0,38
— —	0,27	0,13	0,13
— —	0,27	0,13	0,13
— —	0,27	0,13	0,13
— —	0,27	0,13	0,13
— —	0,27	0,13	0,13
Діод Д9	0,32	0,96	1,92
Конденсатор К73-16-0,1-150	0,07	0,098	0,196
Транзистор КТ315Г	0,07	0,12	0,12
— —	0,07	0,12	0,12
N_i – Кількість елементів K_H – Коефіцієнт навантаження $^\circ\text{C}$ – Температура середовища,			

За формулою визначаємо коефіцієнти навантаження та інтенсивність відмов конденсаторів

$$K_H^C = \frac{U_\Phi}{U_H} = \frac{11,5}{200} = 0,0575;$$

$$\lambda^C(v) = \lambda_0^C a_1 = 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,07 = 0,098 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

За виразом визначаємо коефіцієнти навантаження та інтенсивність відмов транзисторів

$$K_{\text{H}}^{VT1} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{IU_{\text{КЭ}}}{P_{\text{H}}} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 40}{400} = 1,0 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda^{VT1}(v) = \lambda_0^c a_1 = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,07 = 0,12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}.$$

$$K_{\text{H}}^{VT2} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{H}}} = \frac{IU_{\text{КЭ}}}{P_{\text{H}}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 40}{400} = 1,0 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda^{VT2}(v) = \lambda_0^c a_1 = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,07 = 0,12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}.$$

2. Визначаємо інтенсивність відмов тригера

$$\Lambda_c = \sum_{i=1}^{14} N_i \lambda_i(v) = 0,36 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Основна частка інтенсивності відмов припадає на діоди та транзистори і тому в разі потреби для підвищення надійності германієві транзистори та діоди можуть бути замінені на кремнієві, які мають менші інтенсивності відмов.

3. Визначаємо можливість безвідмовної роботи тригера за 1000 год.

$$P(1000) = e^{-\Lambda_c t} = e^{-0,0036} = 0,996.$$

Висновок. Запроваджені кроки дають можливість застосувати методи прогнозування показників надійності тригера. Виконано уточнений розрахунок показників тригера:

- інтенсивність відмов тригера $0,36 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}$
- вірогідність безвідмовної роботи тригера за 1000 год 0,996

Спроектований пристрій відповідає необхідній надійності.

ВИСНОВКИ

Розрахунок надійності полягає у визначенні показників надійності виробу що проектується за відомими характеристиками надійності складових елементів конструкції і компонентів системи з урахуванням умов експлуатації. Надійність є однією з властивостей, які визначають якість електронної апаратури. Виділяють два етапи оцінки надійності: орієнтовний розрахунок показників безвідмовності (виконують на ранній стадії проектування); уточнений розрахунок показників надійності (виконують на завершальних стадіях проектування).

Уточнений або повний розрахунок надійності проводиться на більш пізніх стадіях конструкторського проектування, коли відома повна схема виробу, його конструкція та умови експлуатації. За результатами розрахунку робиться висновок: відповідає спроектований пристрій необхідній надійності чи ні.

З проведеного у роботі уточненого розрахунку тригера випливає, що використання полегшених режимів роботи елементів та щадних умов експлуатації дозволяє значно підвищити надійність спроектованої апаратури. За результатами розрахунку, отримані дані порівнювалися із заданими значеннями в ТУ, можна зробити висновок, що спроектований пристрій відповідає необхідній надійності.

Результати роботи можуть бути використані для обчислення показників надійності апаратури на завершальній стадії проектування з метою подальшого підвищення надійності електронної апаратури.

Метод дослідження, що запропонований в роботі, може бути використано як приклад при викладанні дисципліни «Надійність та діагностування».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. – К.: Держстандарт України, 1994. – 117 с.
2. Конспект лекцій розроблений у відповідності з навчальним планом за спеціальністю 123 „Комп’ютерна інженерія ” Укладачі: к.т.н. Тиш Є.В., д.т.н. Литвиненко Я.В. Відповідальний за випуск: зав. каф. КС Осухівська Г.М.).Режим доступу: <https://elartu.tntu.edu.ua/>
3. Васишин В. І. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем : нач. Посіб. / В. І. Васишин, С. В. Женжера, О. В. Чечуй, А. П. Глушко. – Х.: ХНУПС, 2018. – 268 с.
4. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів за напрямом 6.050702 “ Електромеханіка”/ Укл.: к.т.н., доцент Ключев О. В. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013, 143 стор.
5. Василевська О. М. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник / О. М. Василевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.
6. Василевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів: навч. посіб. / О. М. Василевський, Ю. В. Гриценко. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с.
7. Цифрова схемотехніка. Підручник для студентів технічних вузів і коледжів / Укл.: Л. Л. Верьовкін, М. В. Світанько, Є. М. Кісельов, С. Л. Хрипко. Запоріжжя: Видавництво ЗДІА. 2016. – 214 с.
8. Казак В. М. Надійність та діагностика електрообладнання: навч. посіб. / В. М. Казак, Б. І. Доценко, В. П. Кузьмін та ін. ; ред. В. М. Казак . – К. : НАУ, 2013 – 280 с.
9. Казанський С. В. Надійність електроенергетичних систем: навч.посіб. / С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, Б. М. Сердюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 216 с. – Бібліогр.: с.214-216.

10. Яковина В. С. Основи теорії надійності програмних систем: навч. посіб. / В. С. Яковина, М. М. Сенів; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2020. – 248 с.

11. Pham H. System software reliability // Springer-Verlag London Limited, 2006. – 440 p.

12. Tariq Hussain Sheakh. A Study of Analytically Improving the Reliability of Software / Tariq Hussain Sheakh, S.M.K. Quadri, and VijayPal Singh // International Journal of Research and Reviews in Computer Science. – 2012. – Vol. 3, No 1. – P. 1404–1406.

13. Кустов В. Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: Навчальний посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – 218 с.

14. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни “Основи проектування електронних систем” для студентів напряму 6.050802 " Електронні системи" Частина 2 / укл. Багрій В. В., Кам'янське; ДДТУ, 2015 – 40 с.

15. Основні теорії надійності систем управління і автоматики [Текст]: навч.посіб. для студ. Спец. «Системи управління і автоматики» / С.Б. Дубіненко, С.Д. Штовба: Вінницький держ.технічний ун-т. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 64 с.: рис.-Бібліогр.: с.64

16. Основи теорії надійності технічних систем [Текст]: навч. посіб. / О. М. Павлюк [та ін.]; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2021. – 206 с. : рис. – Бібліогр.: с. 182 – 184.

17. Тарасенко В. П., Маламан А. Ю., Черніченко Ю. П., Корнійчук В. І. Надійність комп'ютерних систем. – К.: «Корнійчук», 2007. – 256 с.

18. Фізичні основи теорії надійності [Текст]: підручник/ [М.К. Жердєв та ін.; за ред. М.К. Жердєва]; Київ.нац ун-т ім. Т. Шевченка. – К.: Київський університет. 2008. – 215 с.: рис., табл. – Бібліогр.: с.204-205. – 200 прим.

19. Вишнівський В. В. Основи надійності та діагностики телекомунікаційних і радіотехнічних систем. Конспект лекцій підготовлено для самостійної роботи студентів вищих навчальних закладів. Київ: ННІТІ ДУТ, 2015. – 142 с.

20. Вишнівський В. В., Василенко В. В., Гніденко М. П., Звенігородський О. С., Зінченко О. В., Іщеряков С. М. Основи надійності та діагностики інформаційних систем. Навчальний посібник підготовлено для самостійної роботи студентів та аспірантів вищих навчальних закладів. Київ: ННІТ ДУТ, 2020. – 184 с.

21. Боровников С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод.пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян; под ред. С. М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.: ил.

22. Дружинин Г. В. Надежность систем автоматики. – М.: Энергия, 1967. – 526 с.