

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості
ізоляції обмоток тягових електричних двигунів**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-23ск

Даніїл КУШНАРЕНКО

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

КУШНАРЕНКО Даніїл Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної
витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів; II. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток якоря; II. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції компенсаційних обмоток; III. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток додаткових полюсів; IV. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє загальний пробій ізоляції його обмоток.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Аналіз експлуатаційної надійності у форматі процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції	24.05.26
2	Дослідження процесу інтенсивності відмов	29.05.26
3	Статистичний аналіз процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції	07.06.26
4	Гістограми розподілу ймовірності процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Даніїл КУШНАРЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів»

44 с., 7 рис., 35 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення експлуатаційної надійності тягового рухомого складу шляхом комплексного дослідження механізмів деградації ізоляції обмоток тягових електричних двигунів (ТЕД) під дією синергетичних експлуатаційних факторів та розробки математичних моделей для прогнозування її залишкового ресурсу, а також визначення закономірностей та механізмів зниження пробійної витривалості ізоляційних конструкцій обмоток тягових електричних двигунів під впливом комплексних експлуатаційних чинників для обґрунтування методів прогнозування їхнього залишкового ресурсу та підвищення надійності рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Проаналізувати структуру та фізико-хімічні властивості сучасних ізоляційних матеріалів класів нагрівостійкості Н та С, що застосовуються в обмотках ТЕД.

Проаналізувати специфіку експлуатаційних режимів тягових електричних двигунів та класифікувати основні деструктивні чинники, що впливають на стан обмоткової ізоляції.

Класифікувати та кількісно оцінити вплив основних деструктивних факторів (електричних, теплових, механічних та навколишнього середовища) на кінетику старіння ізоляції.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідити фізико-хімічні та структурні зміни в діелектричних матеріалах, які відбуваються внаслідок теплового, електричного та механічного старіння.

Розробити математичну модель зниження електричної міцності (пробійної витривалості) обмоток ТЕД з урахуванням високочастотних перенапруг, зумовлених роботою напівпровідникових перетворювачів частоти.

Оцінити вплив сучасних систем частотного регулювання (зокрема, імпульсної напруги з високою крутизною фронту) на інтенсивність розвитку часткових розрядів в ізоляції.

Провести експериментальні дослідження та статистичний аналіз (із застосуванням розподілу Вейбулла) напруги пробою ізоляційних конструкцій після різних термінів еквівалентного теплового старіння.

Визначити взаємозв'язок між зміною діагностичних параметрів ізоляції (опору, тангенса кута діелектричних втрат, характеристик часткових розрядів) та реальним зниженням її пробійної міцності.

Обґрунтувати комплекс діагностичних параметрів та рекомендації щодо впровадження систем безперервного моніторингу стану ізоляції для запобігання раптовим аварійним відмовам ТЕД.

Розробити рекомендації щодо вдосконалення системи технічного обслуговування тягових двигунів на основі моніторингу поточного стану ізоляції обмоток.

ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН, ІЗОЛЯЦІЯ ОБМОТОК,
ПРОБІЙНА ВИТРИВАЛІСТЬ, ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ, ТЕПЛОВЕ
СТАРІННЯ, ЧАСТКОВІ РОЗРЯДИ, ДІЕЛЕКТРИЧНА ДЕГРАДАЦІЯ,
ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС, РОЗПОДІЛ ВЕЙБУЛЛА

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів	15
1.1. Аналіз експлуатаційної надійності у форматі процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів	15
1.2. Дослідження процесу інтенсивності відмов з причини зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів...	17
Розділ 2. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів	19
2.1. Статистичний аналіз процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів	19
2.2. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів.....	21
2.3. Гістограми розподілу ймовірності процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів...	28
Висновки	32
Список використаних джерел	34
Додаток А.....	38
Додаток Б	39
Додаток В.....	40
Додаток Г	41
Додаток Д.....	42
Додаток Е	43

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Роль тягового електроприводу та проблема його надійності

Сучасний залізничний транспорт, метрополітен та міський електричний транспорт перебувають у стані постійної модернізації, яка спрямована на збільшення швидкості руху, підвищення вантажопідйомності та оптимізацію споживання енергії.

Головною ланкою, що забезпечує перетворення електричної енергії в механічну роботу безпосередньо на рухомому складі, є тяговий електричний двигун.

Від надійності цього вузла прямо залежить безпека руху, чітке дотримання графіків перевезень та загальна економічна ефективність транспортних компаній.

Статистика залізничних депо та ремонтних заводів свідчить, що виходи з ладу тягових двигунів є однією з найпоширеніших причин відмов рухомого складу на лінії.

При цьому понад половину всіх важких пошкоджень тягових електричних машин пов'язані з руйнуванням та електричним пробоем ізоляції обмоток статора або якоря.

Електричний пробій не лише повністю виводить двигун з ладу, але й часто призводить до виникнення пожеж, значних руйнувань магнітопроводу та вимагає дорогого капітального ремонту із повною заміною обмоток.

Специфіка умов експлуатації тягових двигунів

Актуальність дослідження процесів зниження пробійної витривалості зумовлена екстремальними умовами, в яких працює ізоляція тягових машин порівняно із загальнопромисловими електродвигунами.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тяговий двигун функціонує в режимах частих пусків, динамічного гальмування та реверсування, що супроводжується різкими стрибками струму.

Крім того, геометрія та габарити тягового двигуна жорстко обмежені простором візка рухомого складу (підвагонним простором, колією тощо).

Це змушує конструкторів проектувати машини з максимальною питомою потужністю, що призводить до високих робочих температур та значної напруженості електричного поля в діелектрику.

Ізоляція змушена працювати на межі своїх фізичних можливостей.

Комплексний характер деградації ізоляції (TEAM-фактори)

Процес зниження пробійної витривалості ізоляції є багатфакторним і неперервним.

У міжнародній практиці сукупність цих чинників описують аббревіатурою TEAM, яка охоплює термічні, електричні, екологічні (навколишнє середовище) та механічні впливи:

- Термічний фактор. Постійні коливання температури викликають циклічні теплові розширення та стиснення мідних провідників та сталевого сердечника. Оскільки коефіцієнти теплового розширення міді, сталі та ізоляційних композитів суттєво відрізняються, всередині ізоляційного моноліту виникають значні механічні зсувні напруження. Це призводить до розшарування ізоляції, появи внутрішніх порожнин та мікротріщин. Крім того, тривалий вплив високих температур викликає термоокислювальну деструкцію полімерних сполучних речовин, через що вони втрачають еластичність і стають крихкими.

- Механічний фактор. На ізоляцію діють постійні вібрації, що передаються від колії через колеса та редуктор, а також потужні удари на стиках рейок та стрілочних переводах. Одночасно з цим у лобових частинах

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмоток виникають значні електродинамічні зусилля, які намагаються змістити провідники під час пускових струмів. Вібрація викликає взаємне тертя провідників та стирання корпусних ізоляційних гільз у пазах.

- Екологічний фактор (вплив середовища). Тягові двигуни охолоджуються атмосферним повітрям, яке засмоктується ззовні. Разом із ним всередину машини потрапляє волога, сніг, металічний пил від зносу гальмівних колодок та рейок, а також хімічно агресивні речовини (сіль, мастила). Проникаючи у мікротріщини, що утворилися через термічні та механічні напруження, волога та пил створюють провідні містки, суттєво знижуючи поверхневий та об'ємний опір ізоляції.

- Електричний фактор. Наявність високої напруженості поля призводить до поступової деструкції полімерів. Особливо гостро ця проблема постала з упровадженням сучасних асинхронних тягових приводів, що живляться від автономних інверторів напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Висока крутизна фронтів імпульсів напруги викликає нерівномірний розподіл потенціалу по витках обмотки та провокує виникнення інтенсивних часткових розрядів у мікропорожнинах ізоляції. Часткові розряди супроводжуються бомбардуванням діелектрика іонами, локальним перегрівом та утворенням озону, що прискорює хімічне руйнування матеріалу.

Наукова та практична необхідність дослідження

На сьогодні традиційні методи оцінки стану ізоляції, які базуються виключно на вимірюванні опору постійному струму, вже не забезпечують необхідної точності та не здатні виявити приховані процеси внутрішньої деградації на ранніх стадіях.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Потрібне глибоке вивчення фізики процесів старіння, що відбуваються всередині композиційних ізоляційних матеріалів (таких як слюдопласти, епоксидні та силіконові компаунди) під сумісною дією всіх експлуатаційних факторів.

Розуміння кінетики зниження пробійної витривалості дозволить створити більш точні математичні та логічні моделі зносу ізоляції, оптимізувати товщину та структуру ізоляційних шарів при проектуванні нових двигунів, а також розробити ефективні методики неруйнівного контролю для депо.

Це забезпечить перехід від застарілої системи ремонтів за регламентом (планово-попереджувальних) до прогресивного обслуговування за фактичним технічним станом, мінімізуючи ризики раптових відмов на лінії та оптимізуючи витрати на утримання рухомого складу.

Синергетика руйнування ізоляційних систем ТЕД

Ізоляція обмоток статора (або якоря) є найбільш критичним та вразливим елементом тягових електричних двигунів локомотивів.

На відміну від двигунів загальнопромислового призначення, ТЕД працюють у режимах постійних пускових перевантажень, циклічних коливань температури, інтенсивних вібрацій та ударів, а також піддаються впливу вологи, пилу та гальмівного шламу.

Сучасний перехід до частотно-регульованого асинхронного приводу на базі транзисторних (IGBT) інверторів загострив проблему надійності ізоляції.

Висока швидкість наростання імпульсів напруги (dv/dt), що сягає декількох **кВ/мкс**) викликає нерівномірний розподіл потенціалу по витках обмотки та провокує виникнення часткових розрядів (ЧР) у мікропорах ізоляції. Захисна система ТЕД піддається комплексній термо-електро-

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

механічній деградації (так званий TEAM-деструкції: Thermal, Electrical, Ambient, Mechanical), де кожен фактор посилює дію іншого, катастрофічно знижуючи пробійну витривалість діелектрика.

Математичний апарат кінетики електричного старіння

Зниження пробійної витривалості ізоляції під дією напруженості електричного поля описується емпіричним оберненим степеневим законом тривалої електричної міцності (модель Дакина).

Якщо врахувати синергетичний ефект теплового старіння (за законом Арреніуса), узагальнена модель залишкового ресурсу ізоляції за комбінованої дії напруженості поля та температури T набуває простого вигляду.

Зниження пробійної напруги U у часі t відображає падіння діелектричної проникності та зростання тангенса кута діелектричних втрат, що призводить до теплового або електричного пробою навіть за робочих значень напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз факторів експлуатаційного впливу на пробійну міцність ізоляції

Тип навантаження	Первинний механізм деструкції	Наслідки для ізоляційної конструкції
Теплове (Thermal)	Деструкція полімерних зв'язків компаундів, виділення летких фракцій, усадка.	Поява повітряних пор, мікротріщин, розшарування слюдяної стрічки та мідної жили.
Електричне (Electrical)	Дія часткових розрядів, локальний перегрів у порах, трекінгоутворення.	Ерозія діелектрика, хімічне руйнування озоном та окислами азоту, що виділяються при ЧР.
Механічне (Mechanical)	Згинальні зусилля від електродинамічних сил при пуску, вібрація від зубчастої передачі.	Втома матеріалу, стирання виткової ізоляції у пазовій частині, механічний зріз лобових частин.
Екологічне (Ambient)	Проникнення шахтної або атмосферної вологи, солей, вугільного та	Різке зниження поверхневого опору, утворення струмопровідних містків (мікропробої

	металевого пилу.	за контуром).
--	------------------	---------------

Практична цінність досліджень

Глибоке розуміння фізики процесів зниження пробійної витривалості дозволяє розробити ефективні методи неруйнівного контролю ТЕД під час експлуатації та поточних ремонтів.

Реєстрація спектра часткових розрядів та вимірювання динаміки дають можливість виявити дефекти на стадії їх зародження.

Це дозволяє залізничним депо та сервісним центрам перейти на предиктивне обслуговування, виключаючи важкі аварії (такі як міжвиткові замикання та пробої на корпус під час роботи на лінії), що суттєво зменшує капітальні витрати на заміну дороговартісних тягових машин.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Розділ 1. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

1.1. Аналіз експлуатаційної надійності у форматі процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

Для оцінки надійності пристрої користуються наступними кількісними характеристиками:

- ймовірність безвідмовний роботи $P(t)$;
- частота відмов (щільність ймовірності відмов) $a(t)$;
- інтенсивність (небезпека) відмов $\lambda(t)$.

Ці характеристики надійності є основними , оскільки , знаючи одну з них , можна визначити дві інші.

Розглядаючи надійність як ймовірність безвідмовний роботи вузлів тягового двигуна загалом у певних умовах експлуатації , для визначення ймовірності необхідно спочатку побудувати графіки щільності відмов (диференціальний закон розподілу).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Лім.	Лист	Листів
Розробив	Кушнарєнко						15	4
Перевірів	Сінчук І.О.							
Реценз.						КНУ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук І.О.							
Затвердив	Пересунько І.І.							

Цей графік будують шляхом статистичної обробки матеріалу з обліку відмов тягових двигунів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Дослідження процесу інтенсивності відмов з причини зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

Дослідну частоту відмов можна визначити за формулою:

$$a_i = \frac{\Delta n_i}{n_{\text{тд}} \cdot \Delta T_i} \quad (1)$$

де Δn_i - кількість відмов за інтервал пробігу.

$$\Delta T_i = T_i - T_{\{i-1\}}$$

$n_{\text{тд}}$ - Кількість тягових двигунів, що беруть участь в експерименті.

Ймовірність відмови вузла є інтегральний закон розподілу частоти відмов:

$$q(T) = \int_0^T a(T) dT \quad (2)$$

а надійність елемента , як протилежне подія , визначається виразом:

$$P(T) = I - \int_0^T a(t)dt \quad (3)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

2.1. Статистичний аналіз процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

Другий важливою характеристикою надійності є інтенсивність (небезпека) відмов $\lambda(T)$.

Статистична залежність небезпеки відмов $\lambda(T)$ від тривалості експлуатації будується за формулою:

$$\lambda = \frac{\Delta n_i}{[n_{\text{тд}} - n_i] \Delta T_i}$$

де n_i - Нагромаджене число відмов за пробіг $T_{\{i-1\}}$.

Для випадку , $\lambda = \text{const}$, Можливість безвідмовної роботи виражається залежністю:

$$P(T) = e^{\{\lambda T\}}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Кушнарченко				Розділ 2	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Сінчук І.О.						19	13
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук І.О.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЗЕЕМ-23ск		

Таким чином, встановивши співвідношення основних характеристик надійності, можна визначити за кривими розподілу щільності пошкодження за допомогою зазначених вище формул ймовірність ушкодження тягових двигунів та виявити найменш надійні вузли.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Дослідження процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

Безвідмовність тягового двигуна по ізоляції обмоток залежить від надійності якоря, додаткових та головних полюсів та компенсаційної обмотки.

Десятирічний досвід експлуатації тягових двигунів показав, що випадки пробою ізоляції головних полюсів одиничні, спостерігаються дуже рідко.

Відмови тягових двигунів електричною частини відбуваються через пробій ізоляції обмоток якоря, компенсаційної обмотки та додаткових полюсів.

Аналіз роботи 132 тягових двигунів дозволив побудувати гістограми небезпеки першого відмови якоря, компенсаційної обмотки та додаткових полюсів, наведені на рис. 1, 2 та 3.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

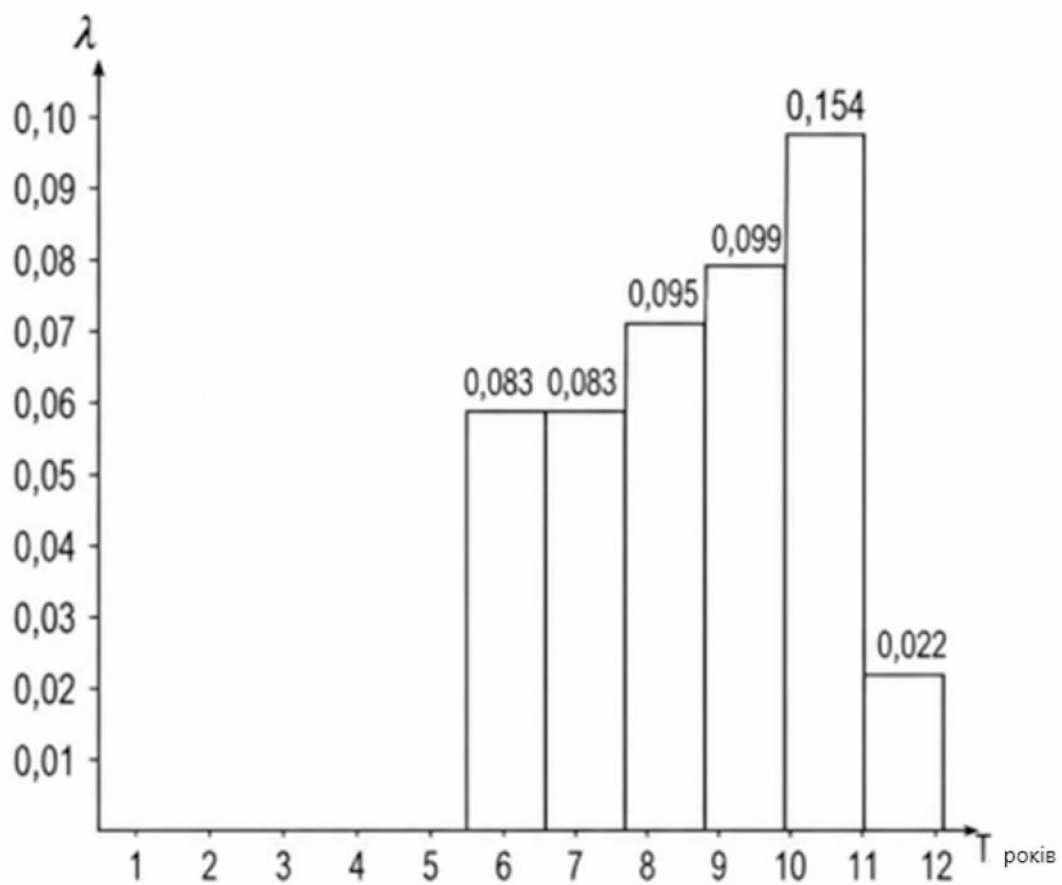


Рис. 1. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток якоря

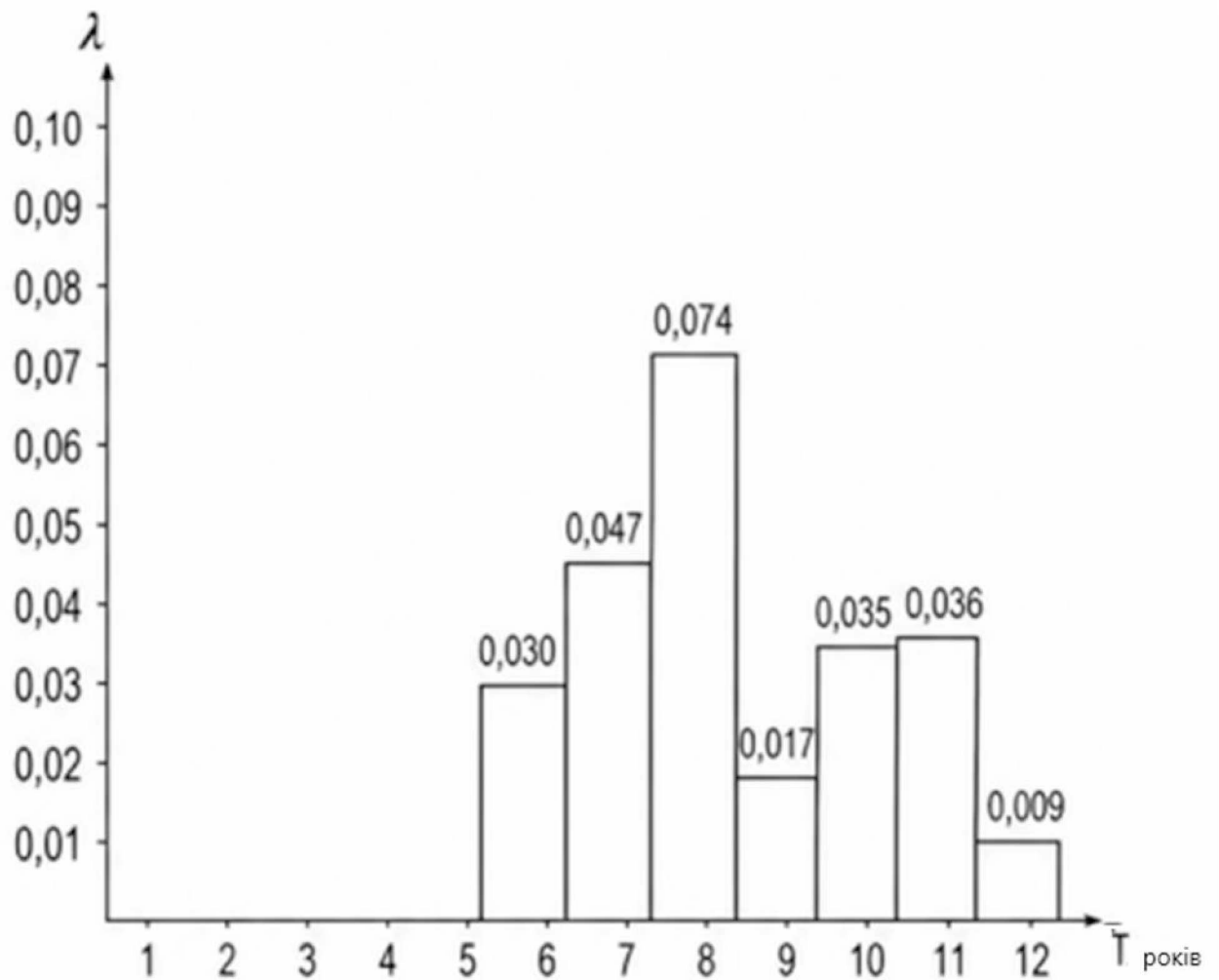


Рис. 2. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції компенсаційних обмоток

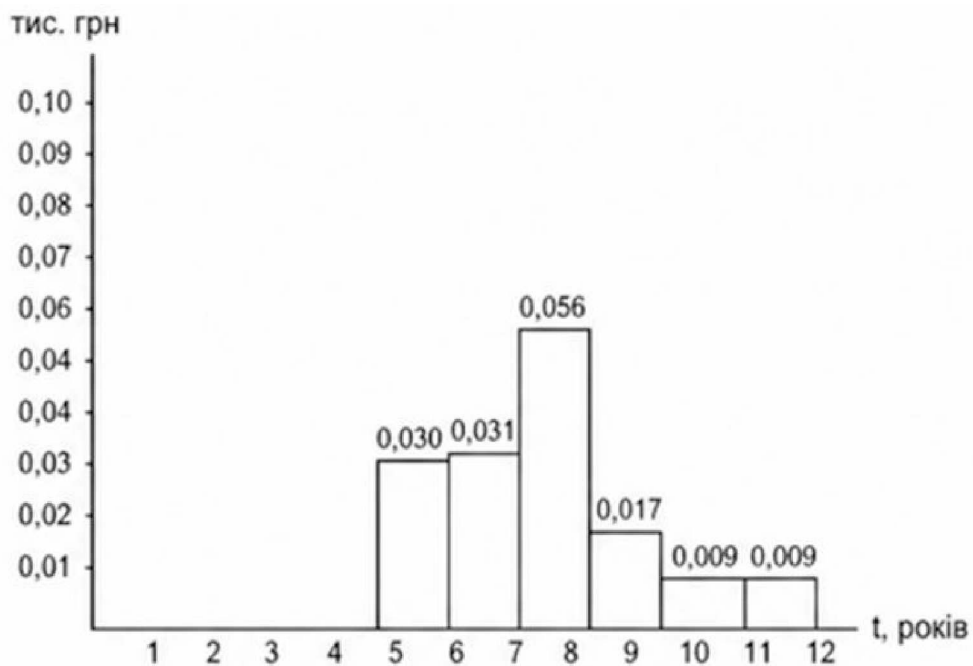


Рис. 3. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток додаткових полюсів

З розгляду гістограм (рис. 1, 2 та 3) видно, що найбільшу небезпека відмов тягових двигунів мають якорі та значно меншу — компенсаційні обмотки та додаткові полюси.

Найбільша небезпека відмов компенсаційної обмотки та додаткових полюсів спостерігається в період між 8-9 роками експлуатації .

У якоря ж небезпека ушкодження безперервно зростає та досягає найбільшою величини в період між 10-11 роками експлуатації .

Зі зменшенням терміну експлуатації тягових двигунів загальне кількість відмов через пробій ізоляції обмоток, тобто з урахуванням неодноразових ушкоджень ізоляції обмоток одного і того ж двигуна.

Гістограма небезпеки відмов тягових двигунів , викликаних пробоем ізоляції обмоток, включаючи багаторазові , наведена на рис. 4.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

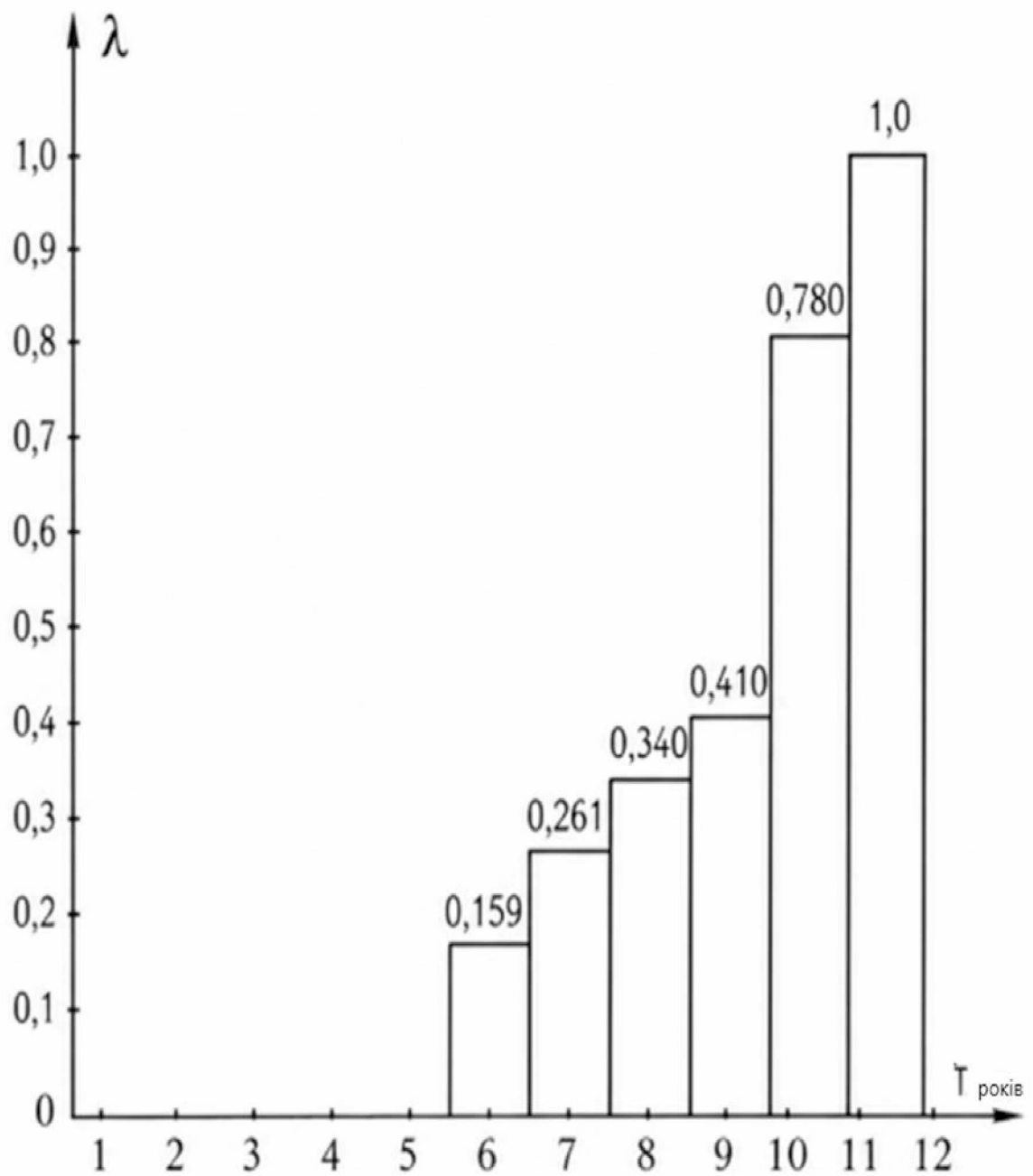


Рис. 4. Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє загальний пробій ізоляції його обмоток

З цієї гістограми видно, що за існуючого порядку ремонту, утримання та експлуатації тягових двигунів небезпека їх відмови від року в рік зростає і вже на одинадцятому році експлуатації виявляється, що на кожен двигун доводиться один пробій ізоляції обмотки або кожен двигун побував у ремонті через пробій ізоляції.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3. Гістограми розподілу ймовірності процесу інтенсивності зниження пробійної витривалості ізоляції обмоток тягових електричних двигунів

На підставі даних про небезпеку ушкодження ізоляції обмоток тягових двигунів побудовані гістограми розподілу ймовірності відмов $q(T)$.

Такі гістограми для обмотки якоря, додаткових полюсів та компенсаційної обмотки наведено на рис. 5, 6 та 7, що дозволяють кількісно оцінювати ризик пошкодження ізоляції тягових двигунів зі збільшенням їх пробігу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

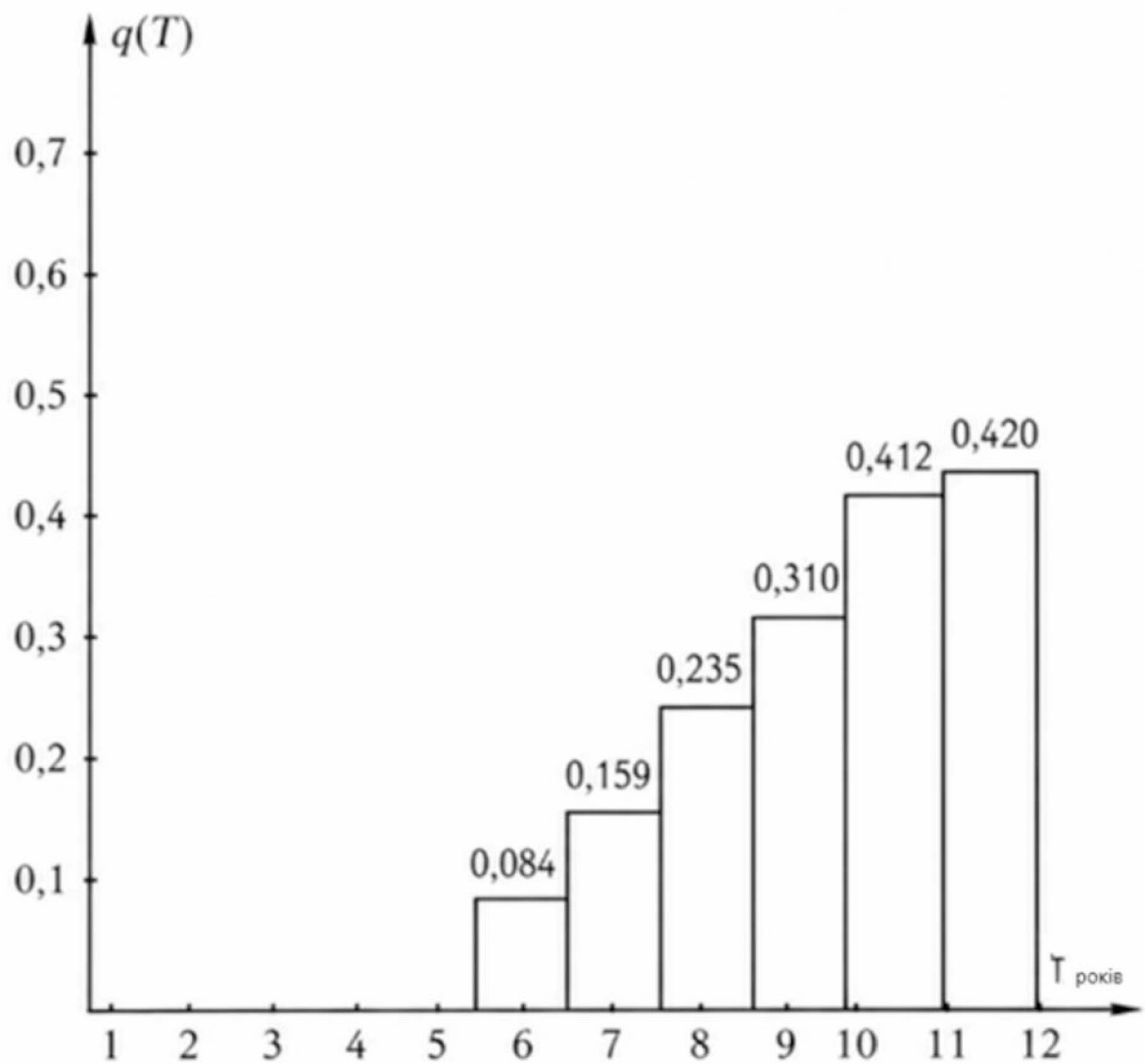


Рис. 5. Ймовірнісний розподіл можливості відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток якоря

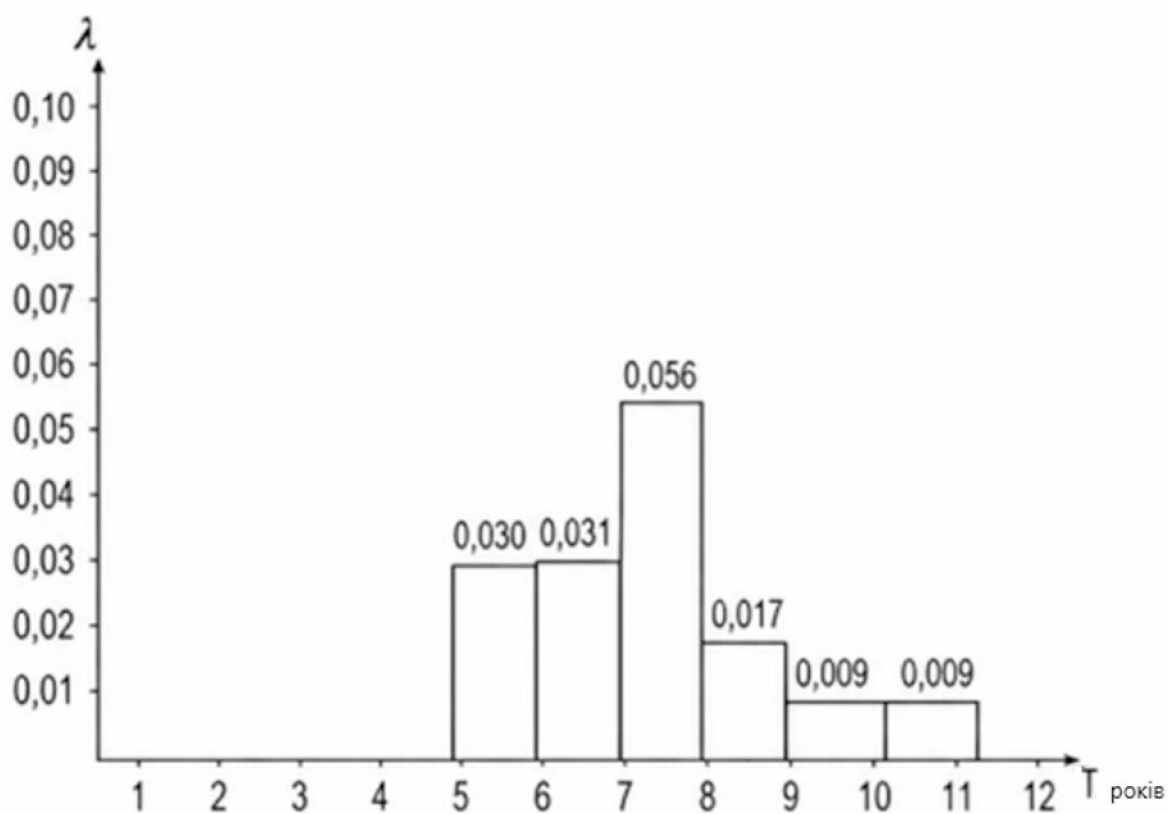


Рис. 6. Ймовірнісний розподіл можливості відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток додаткових полюсів

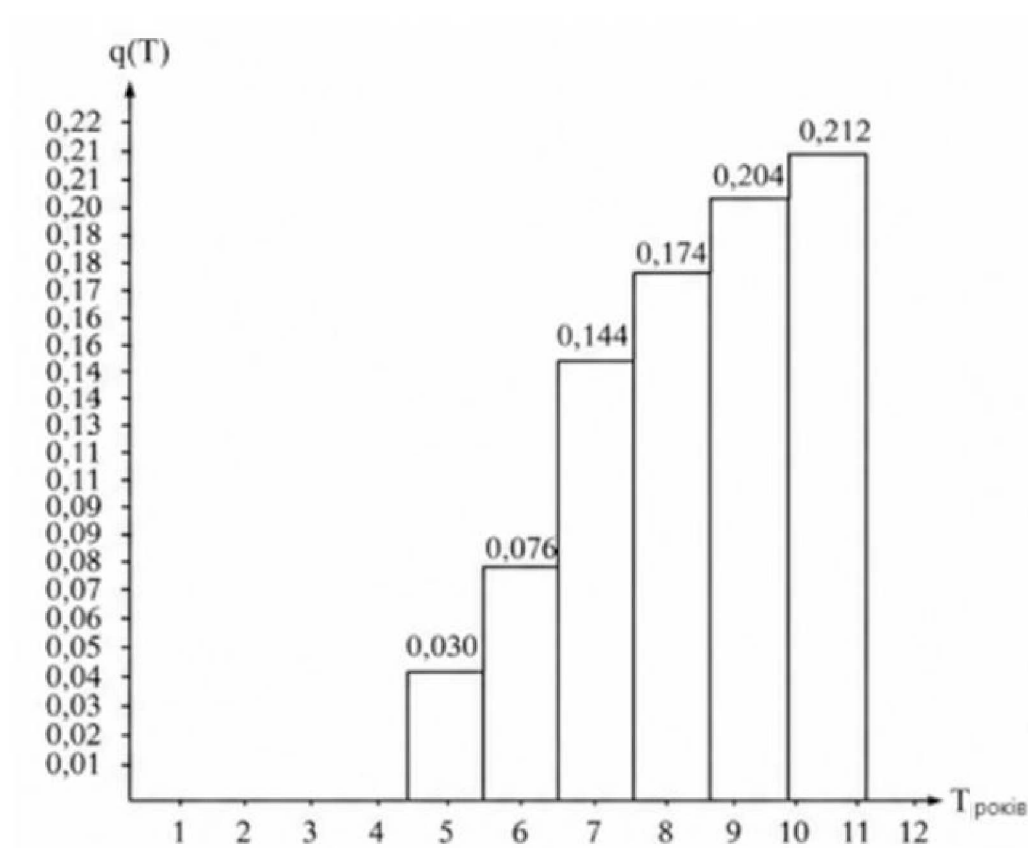


Рис. 7. Ймовірнісний розподіл можливості відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції компенсаційних обмоток

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Проаналізувати структуру та фізико-хімічні властивості сучасних ізоляційних матеріалів класів нагрівостійкості Н та С, що застосовуються в обмотках ТЕД.

Проаналізувати специфіку експлуатаційних режимів тягових електричних двигунів та класифікувати основні деструктивні чинники, що впливають на стан обмоткової ізоляції.

Класифікувати та кількісно оцінити вплив основних деструктивних факторів (електричних, теплових, механічних та навколишнього середовища) на кінетику старіння ізоляції.

Дослідити фізико-хімічні та структурні зміни в діелектричних матеріалах, які відбуваються внаслідок теплового, електричного та механічного старіння.

Розробити математичну модель зниження електричної міцності (пробійної витривалості) обмоток ТЕД з урахуванням височастотних перенапруг, зумовлених роботою напівпровідникових перетворювачів частоти.

Оцінити вплив сучасних систем частотного регулювання (зокрема, імпульсної напруги з високою крутизною фронту) на інтенсивність розвитку часткових розрядів в ізоляції.

Провести експериментальні дослідження та статистичний аналіз (із застосуванням розподілу Вейбулла) напруги пробою ізоляційних конструкцій після різних термінів еквівалентного теплового старіння.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначити взаємозв'язок між зміною діагностичних параметрів ізоляції (опору, тангенса кута діелектричних втрат, характеристик часткових розрядів) та реальним зниженням її пробійної міцності.

Обґрунтувати комплекс діагностичних параметрів та рекомендації щодо впровадження систем безперервного моніторингу стану ізоляції для запобігання раптовим аварійним відмовам ТЕД.

Розробити рекомендації щодо вдосконалення системи технічного обслуговування тягових двигунів на основі моніторингу поточного стану ізоляції обмоток.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Stone, G. C., Culbert, I., Edward, E. A., & Boulter, B. A. (2014). Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.
2. Dissado, L. A., & Fothergill, J. C. (1992). Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. IET.
3. Brancato, E. L. (1978). Insulation aging: A historical and critical review. IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-13(4), 308-317.
4. Simoni, L. (1983). Voltage Endurance of Electrical Insulation. Bologna: CLUEB.
5. Crine, J. P. (2005). A model for the electrical aging and breakdown of polymeric insulation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(4), 791-800.
6. IEC 60034-18-41:2014. Rotating electrical machines - Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters - Qualification and quality control tests. IEC.
7. IEEE Std 117-2015. IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery. IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society.
8. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press. (Контекст вплива перетворювачів на ізоляцію).
9. Ramu, T. S. (1985). Degradation of electrical insulation under thermal and electrical stress. IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-20(1), 72-78.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Cavallini, A., Montanari, G. C., & Contin, A. (2002). Identification of partial discharge defects in electrical insulation systems fed by power electronics. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 9(4), 514-523.
11. Fabiani, D., Montanari, G. C., & Contin, A. (2007). Aging of large rotating machines insulation under combination of electrical, thermal and mechanical stresses. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 14(6), 1550-1557.
12. Kao, K. C. (2004). Dielectric Phenomena in Solids. Academic Press.
13. Zolotarev, V. M., & Kuchynskyi, K. A. (2016). Assessment of the residual life of traction motor insulation by non-destructive testing methods. Electrical Engineering & Electromechanics, (3), 12-17.
14. Chorny, O., & Zachepa, N. (2018). Modeling of thermal and electromagnetic processes in induction motor insulation system under non-sinusoidal supply. Energy Efficiency, 11(4), 985-996.
15. Nelms, D., & David, E. (2019). Voltage endurance coefficients of modern resin-rich and vacuum-pressure impregnated insulation systems. IEEE Electrical Insulation Magazine, 35(2), 24-31.
16. ASTM D2275-14. Standard Test Method for Voltage Endurance of Solid Electrical Insulating Materials Subjected to Partial Discharges (Corona) on the Surface. ASTM International.
17. Yin, W. (1997). Dielectric properties of winding insulation for traction motors under high dv/dt pulse voltage stress. Proceedings of the International Conference on Solid Dielectrics, 441-444.
18. Synchuk, O. M., & Parakhonnyi, V. V. (2015). Diagnostic parameters of the state of the insulation of traction electrical equipment of electric locomotives. Metallurgical and Mining Industry, 7(6), 341-346.

19. Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics, 18, 293-297. (Методологія аналізу часу до пробою).

20. Shchutsky, V. I., & Babokin, G. I. (2011). Reliability and Diagnostics of Electrical Equipment in Mining Systems. Moscow: Nedra.

21. Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Wiley-IEEE Press.

22. Gao, W., Gu, Y., & Jiang, L. (2018). Insulation aging mechanisms and life prediction of traction motors under inverter playback voltages. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25(6), 2110-2118.

23. Kaufhold, M., Boransi, G., & Speck, J. (2000). Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47(2), 396-402.

24. Fabiani, D., Montanari, G. C., & Cavallini, A. (2007). Analysis of partial discharge phenomena in traction motor insulation fed by nonsinusoidal voltage waveforms. IEEE Transactions on Industry Applications, 43(5), 1195-1202.

25. IEEE Std 43-2013 (R2018). IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. IEEE.

26. Younsi, K., Neti, P., & Shah, M. (2010). Multi-factor aging of electrical insulation in large rotating machines. Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 145-152.

27. Vandermaar, A. J., Wang, M., & Rux, L. M. (2005). Diagnosis of insulation degradation in traction motor stator windings. IEEE Electrical Insulation Magazine, 21(4), 18-26.

28. David, E., Lamarre, L., & Dickinson, D. (2002). Dielectric spectroscopy assessment of rotating machine insulation aging. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 9(3), 420-427.

29. Zou, G., & Huang, X. (2015). Combined thermal and mechanical aging characteristics of mica-epoxy insulation for railway traction motors. Polymer Degradation and Stability, 112, 45-53.

30. Han, P., & Cho, Y. (2012). Analysis of environmental effects on insulation breakdown voltage of traction motor windings. Journal of Electrical Engineering and Technology, 7(3), 367-374.

31. Kikuchi, S., & Shiga, T. (2009). Evaluation of partial discharge resistance of slot insulation materials for inverter-fed traction motors. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 4(2), 201-207.

32. Montanari, G. C. (2016). Bringing diagnostic of electrical insulation systems to the next step: Challenges and opportunities. IEEE Electrical Insulation Magazine, 32(4), 45-52.

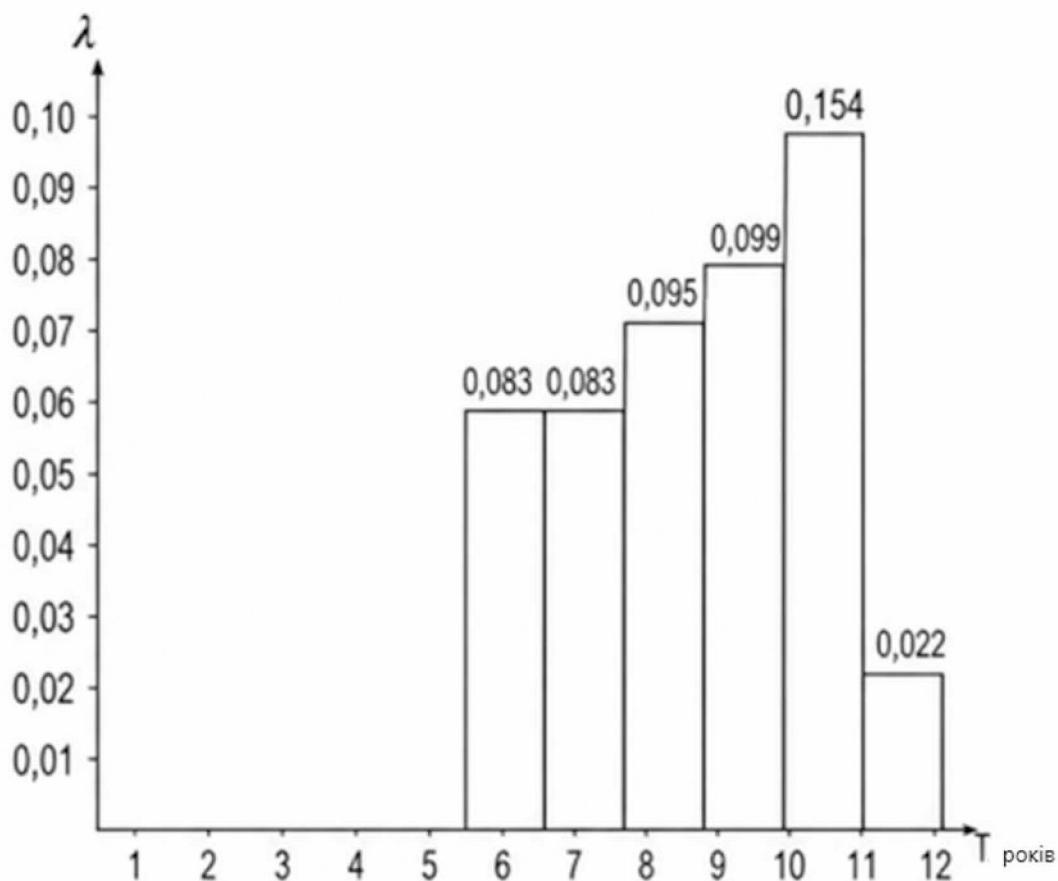
33. Rumi, A., Cavallini, A., & Lazzaroni, M. (2019). Insulation degradation of traction motors under repetitive impulsive voltages: A reliability perspective. Microelectronics Reliability, 100, 1134-1142.

34. Wang, X., & Zhang_Y. (2014). Research on the degradation of mica/epoxy insulation under mechanical vibration and thermal cycling. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 21(2), 789-796.

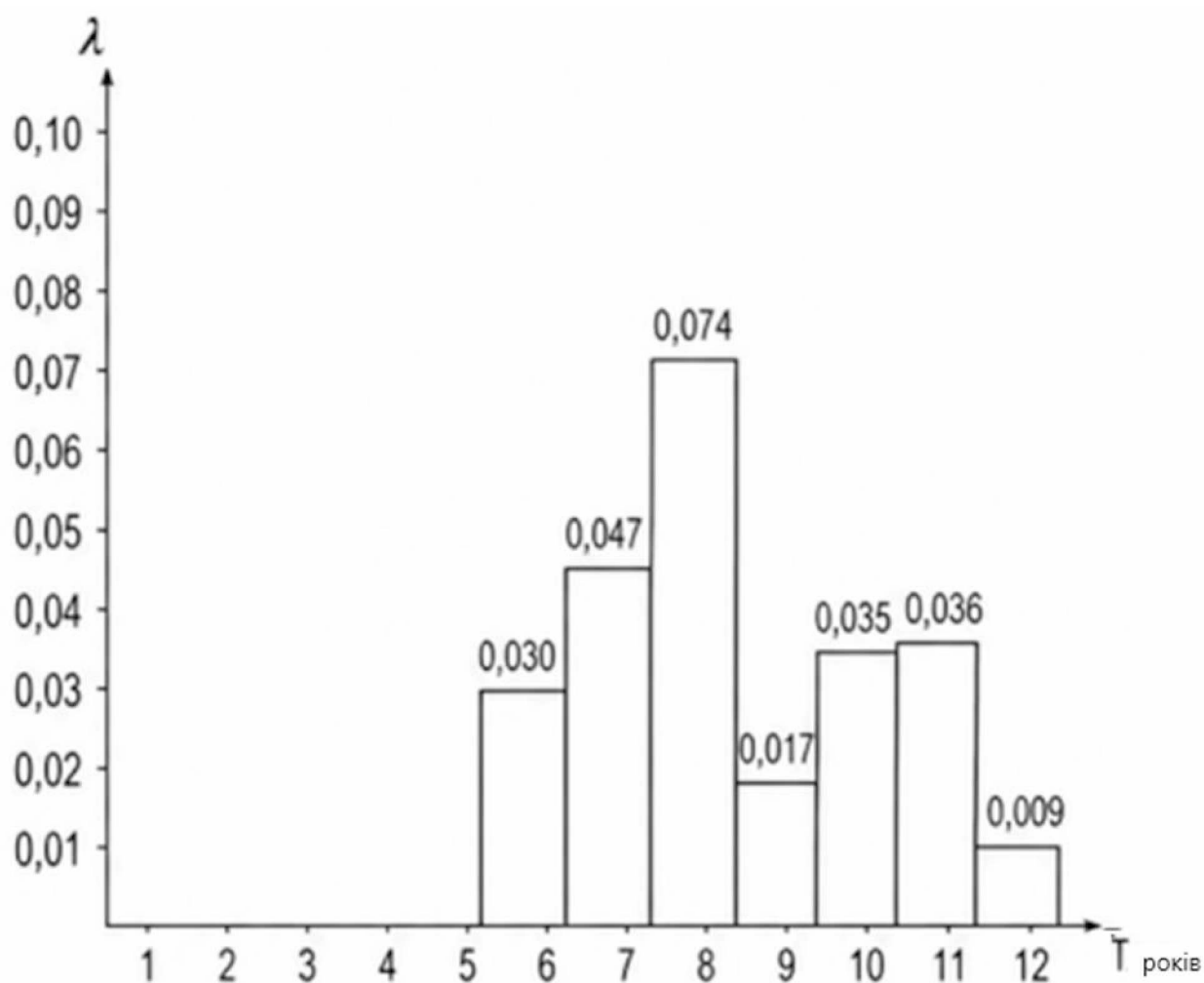
35. Sekii, Y. (2003). Mechanisms of electrical treeing and breakdown in composite polymer insulation systems. Radiation Physics and Chemistry, 67(3), 329-335.

Додаток А

Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток якоря

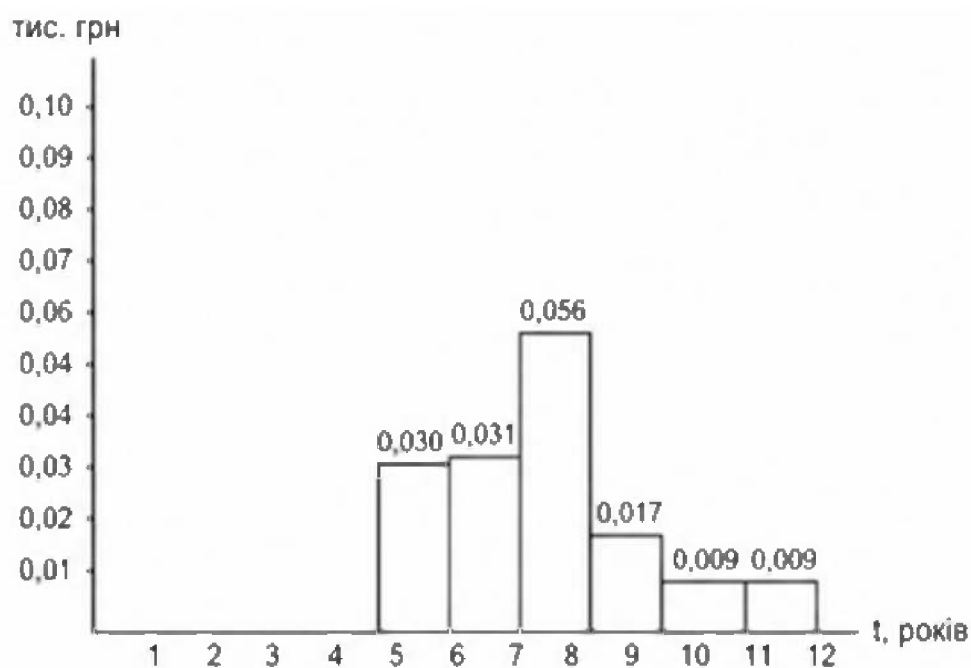


Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції компенсаційних обмоток



Додаток В

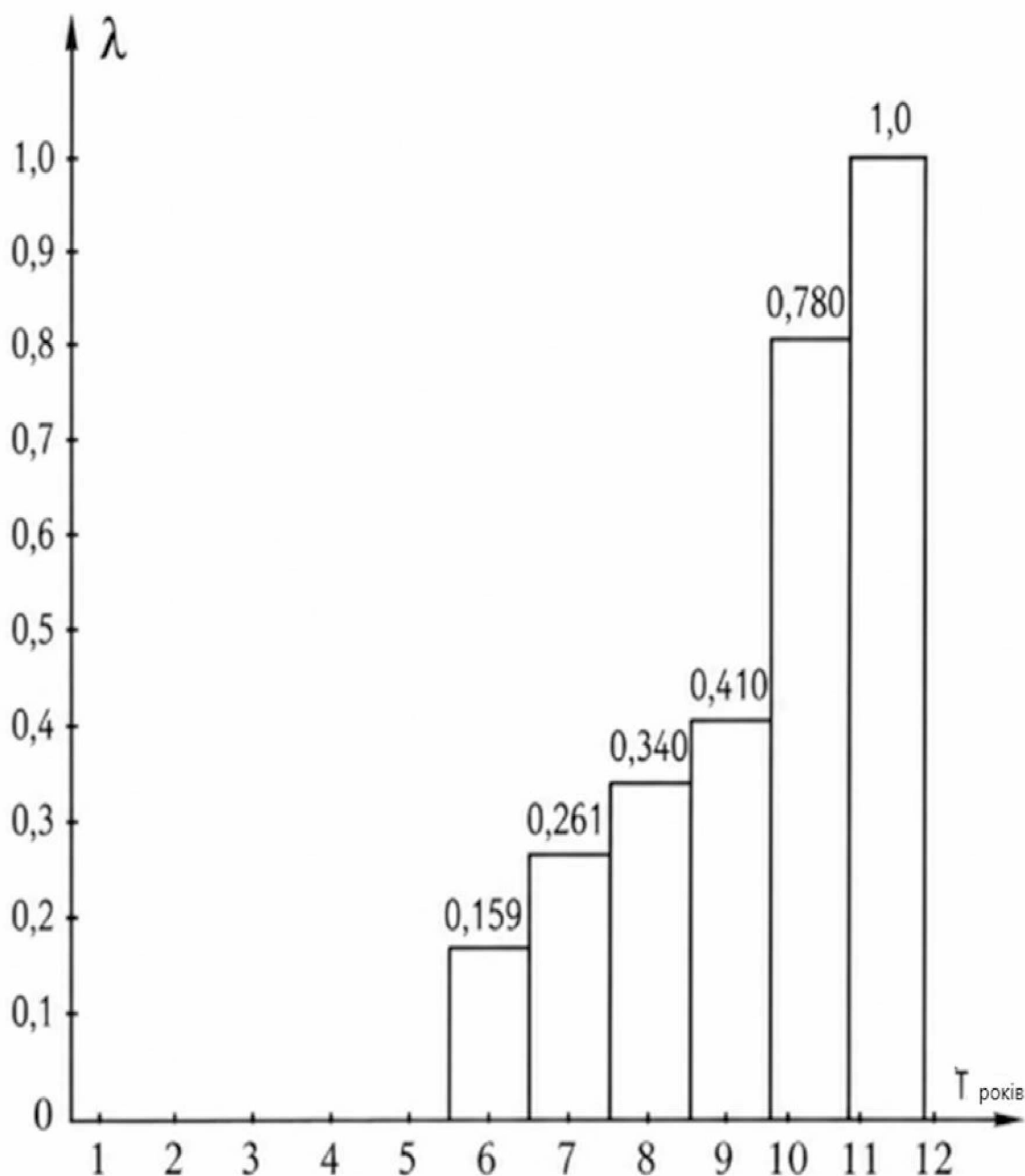
Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток додаткових полюсів



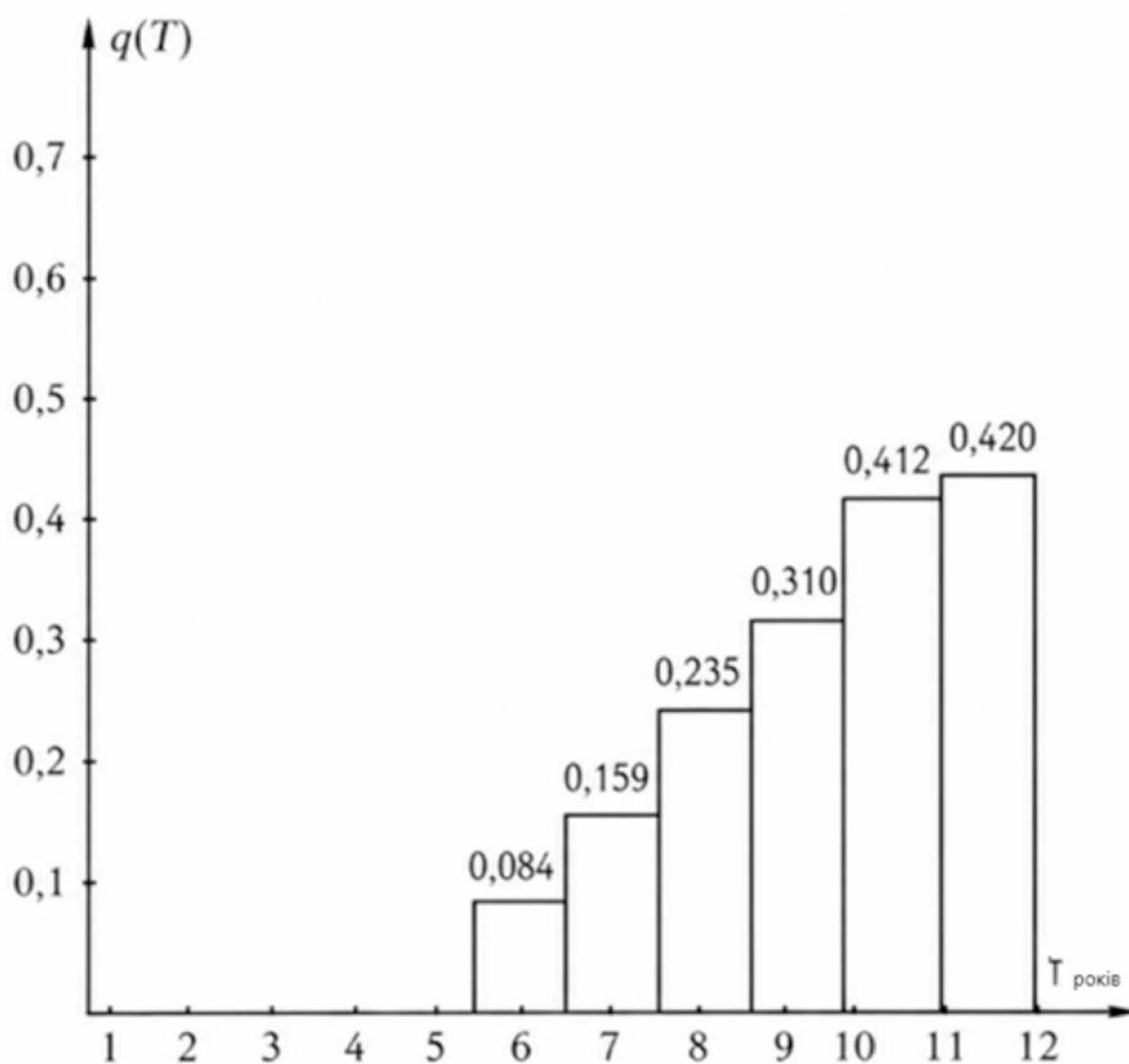
					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-06	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Додаток Г

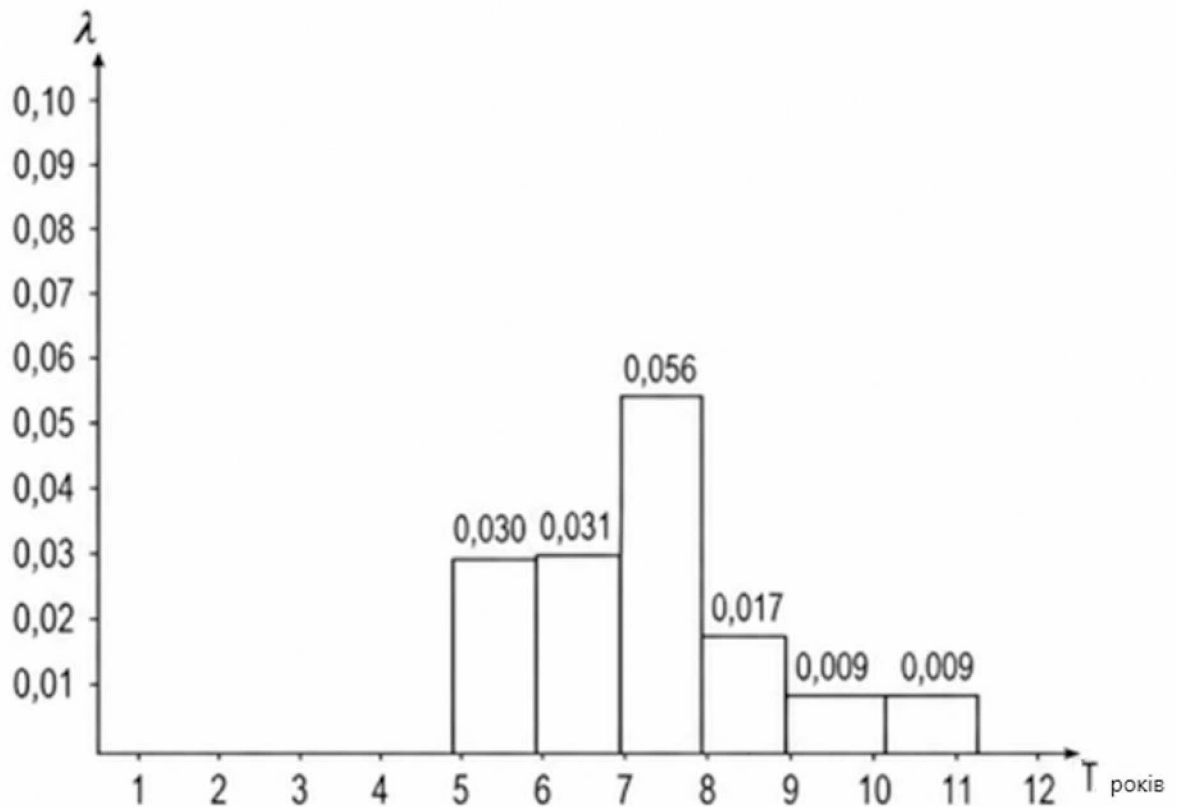
Гістограма ймовірності відмови тягового двигуна, що спричиняє загальний пробій ізоляції його обмоток



Ймовірнісний розподіл можливості відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток якоря



Ймовірнісний розподіл можливості відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції обмоток додаткових полюсів



Ймовірнісний розподіл можливості відмови тягового двигуна, що спричиняє пробій ізоляції компенсаційних обмоток

