

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Губаревич О.В.

**НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

Підручник

Севєродонецьк 2016

УДК 621.313.002.5 (075.8): 62-192 (075.8)
Г 93

*Рекомендовано Вченою радою Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля (протокол № 10 від 24.06. 2016 р.)*

Рецензенти:

- Шинкаренко В.Ф.**, доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», академік Академії наук вищої освіти України
- Поляков А.П.**, доктор технічних наук, професор Вінницького національного технічного університету (ВНТУ)
- Чорний О.П.**, доктор технічних наук, професор Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (КрНУ)

Губаревич О.В.

Г 93 Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. – Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.; табл. 6, іл. 20, бібліогр. 44 найм.

ISBN 978-617-11-0069-5

Містить основні базові відомості про надійність електричних машин та апаратів, а також про діагностування у сполученні з прогнозуванням технічного стану електрообладнання стосовно до кожного виду електричних машин. Наведені приклади рішення завдань за розрахунком надійності, а також завдання для самостійного вирішення та контрольні питання по розділах.

Для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка", що навчаються за спеціалізаціями "Електричні машини та апарати", "Електропобутова техніка" і "Електротехнічні системи електроспоживання", також може бути корисним молодим викладачам цих спеціальностей та фахівцям народного господарства у галузі електромеханіки.

УДК 621.313.002.5 (075.8): 62-192 (075.8)

ISBN 978-617-11-0069-5

© Губаревич О.В.
© Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2016

ВСТУП

З розвитком електричних машин значно розширюється і сфера їх застосування і, як наслідок, природно, з'являються нові контрольовані параметри (наприклад, стійкість до вібрацій і ударів, до високих температур, до високих тисків і ін.). Це у свою чергу вимагає нового випробувального устаткування і методик оцінки результатів випробувань для забезпечення надійності і працездатності такого устаткування. Проблема надійності електричних машин у сучасному машинобудуванні виникає з розвитком нової техніки в таких областях, як авіація, космонавтика, освоєння океану, в яких електричні машини грають велику роль, але традиційні способи підвищення надійності стали не ефективними.

Крім того, проблема надійності електричних машин останнім часом загострюється у зв'язку з різким розширенням сфери їх застосування і зі збільшенням втрат в народному господарстві при відмові електричних машин у процесі експлуатації. У теорії надійності розрізняють конструкційну, технологічну і експлуатаційну надійності. Підвищення однієї з цих складових призводить до підвищення загальної надійності електричної машини. Оскільки цей процес пов'язаний із зростанням вартості електричної машини, то надійність повинна розглядатися не лише як чисто технічна, але й як економічна категорія. Тому одним із завдань є завдання визначення економічно виправданого рівня надійності електричних машин в певних сферах їх застосування. Загострення цієї проблеми надійності викликано наступними чинниками:

- різким збільшенням складності технічних систем, що включають тисячі окремих вузлів і елементів;
- екстремальністю умов, в яких експлуатується виріб (високі швидкості, значні прискорення, високі температури і тиски, вібрація, підвищена радіація і т. д.);

- інтенсивністю режимів роботи системи або окремих вузлів (при високих температурах, частотах обертання, тисках, щільності струму і т. д.);

- підвищенням вимог до якості роботи (висока точність, ефективність і т. д.);

- збільшенням відповідальності функцій, що виконуються системою, високою економічною й технічною ціною відмови;

- повною або частковою автоматизацією і, як наслідок, виключенням безпосереднього контролю людиною функціонування системи і її елементів.

Основне завдання даного підручника полягає в ознайомленні студентів з розрахунком надійності при проектуванні з врахуванням економічних чинників і забезпеченням заданих показників надійності при виготовленні, експлуатації і ремонті електричних машин, а також з методами випробувань електричних машин, визначенні електричних і неелектричних величин під час випробувань та діагностування електрообладнання.

1. НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Традиційний метод дослідження надійності електричних машин – дослідження статистичних даних про відмови, тобто порушення працездатності виробу [1-3]. При дослідженні надійності систем або окремих технічних виробів користуються наступним прийомом: система розбивається на блоки, потім визначається надійність кожного з них і результируюча надійність всієї системи. Система розбивається на блоки на підставі аналізу функціонального призначення і фізичних процесів, що відбуваються в системі і блоках, проте немає сенсу досліджувати всі блоки, що входять в систему, оскільки їх надійність, як правило, сильно розрізняється. Тому при складанні структурних схем користуються методом “слабких ланок”, виділяючи лише ті блоки, надійність яких в даних умовах мінімальна.

1.1. Проблема надійності та її значення для сучасної техніки

Якість електричних машин представляє сукупність властивостей, що визначають їх придатність для експлуатації. Надійність є найважливішим техніко-економічним показником якості будь-якого технічного пристрою, зокрема, електричної машини, що визначає її здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками протягом заданого проміжку часу за певних умов експлуатації [4, 5]. При широкому вживанні електричних машин в різних системах електроприводів і автоматичного регулювання виробничими процесами, технічний рівень виробництва в значній мірі визначається надійністю цих машин. І, як наслідок, будь-які відмови електричних машин завдають відчутного матеріального збитку. Підвищення надійності електричних машин, випуск яких складає десят-

ки мільйонів виробів за рік, є найважливішою науково-технічною проблемою.

З прадавніх часів при виготовленні виробів для забезпечення надійності закладався певний запас міцності, чим і гарантувалася довговічність роботи. Проте це призводило до зайвих витрат матеріалів, збільшення габаритів, маси і вартості виробів.

З розвитком електрифікації, завдання забезпечення надійного постачання об'єктів електроенергією вирішувалися, в основному, шляхом резервування (паралельна робота трансформаторів і електричних генераторів, об'єднання розрізаних енергетичних об'єктів в єдину енергетичну систему і т. д.).

Нові проблеми надійності виникли з розвитком авіації, далекого плавання, ракетної і космічної техніки. Спочатку завдання надійності і тут вирішувалися традиційними методами. Проте цей шлях скоро став малоефективним, оскільки призводив до різкого збільшення габаритів і маси, що для авіаційної і космічної техніки є неприйнятним. Тому для підвищення надійності стали використовуватися нові методи, засновані на теорії вірогідності й математичній статистиці.

Теорія надійності електричних машин в її сучасному вигляді стала розроблятися порівняно недавно – близько 25 років тому. Впродовж декількох попередніх десятиліть електромашинобудування розвивалося у напрямі підвищення використання машин, збільшення навантажень активних матеріалів і зниженні маси машини на одиницю потужності. Паралельно з цим розроблялися і упроваджувалися нові типи активних, конструкційних і ізоляційних матеріалів, покращувалася вентиляція, з'явилися інтенсивніші методи охолодження машин. Проте запас міцності, а в той же час і стійкість до перевантажень поступово знижувались. В результаті намітилася тенденція загального зниження надійності електричних машин.

Одна з перших робіт, в якій було вказано на недостатній рівень надійності електричних машин, була опублікована в 1961 р. [2]. У ній на прикладі роботи ряду металургійних підприємств давався економічний аналіз матеріально-технічного збитку в промисловості через відмови або недостатню надійність електричних двигунів. Знадобився певний час, перш ніж стало загальноновизнаним, що підвищення використання активних і конструктивних матеріалів доці-

льне лише до тих пір, поки ця тенденція не призводить до зниження надійності електричних машин.

Проблема надійності технічних систем за останні два-три десятиліття різко загострилася, що пояснюється наступними об'єктивними причинами:

різким збільшенням складності технічних систем, що включають сотні тисяч і навіть мільйони окремих вузлів і елементів;

екстремальністю умов, в яких експлуатується виріб (високі швидкості, значні прискорення, високі температури і тиски, вібрація, підвищена радіація і т. д.);

інтенсивністю режимів роботи системи або окремих вузлів (при високих температурах, частотах обертання, тисках, щільності струму і т. д.);

підвищенням вимог до якості роботи (висока точність, ефективність і т. д.);

збільшенням відповідальності функцій, що виконуються системою, високою економічною і технічною ціною відмови;

повною або частковою автоматизацією і, як наслідок, виключенням безпосереднього контролю людиною функціонування системи і її елементів.

1.2. Статистика відмов та аналіз пошкоджень електричних машин

Традиційний метод дослідження надійності електричних машин – дослідження статистичних даних про відмови, тобто порушення працездатності виробу. При первинному вивченні статистики відмов і аналізі пошкоджень базуватимемося на диференціації відмов по типах електричних машин, «слабких» вузлах і причинах відмов [4, 5, 6].

При дослідженні надійності систем або окремих технічних виробів користуються наступним прийомом: система розбивається на блоки, потім визначаються надійність кожного блоку і результуюча надійність всієї системи. Система розбивається на блоки на підставі аналізу функціонального призначення і фізичних процесів, що відбуваються в системі і блоках, проте немає сенсу досліджувати всі блоки, що входять в систему, оскільки їх надійність зазвичай сильно

розрізняється. Відмови деяких блоків практично неможливі і їх облік при визначенні результуючої надійності лише ускладнює експерименти і розрахунки, практично не міняючи остаточний результат. Тому при складанні структурних схем користуються методом «слабких ланок», виділяючи лише ті блоки, надійність яких в даних умовах мінімальна.

У цьому аспекті розглянемо основні типи електричних машин. У асинхронних двигунах при дослідженні на надійність слід виділяти, як «слабкі ланки», обмотку статора і підшипниковий вузол. У синхронних машинах слід виділяти обмотки статора і ротора, щітковий апарат і контактні кільця, підшипники (або під'ятники), системи охолодження і пожежогасіння і так далі. Машину постійного струму, з точки зору її надійності, представляють такою, що складається з наступних вузлів: колекторно-щіткового і підшипникового вузлів, обмоток якоря, збудження, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки.

Підхід до дослідження надійності електромашинних агрегатів аналогічний. При оцінці надійності електричної машини, що працює в якій-небудь системі, необхідно враховувати надійність пускорегулюючої апаратури.

Відмови електричних машин можна розділити на конструкційні, технологічні (виробничі) і експлуатаційні. Конструкційні відмови виникають через недосконалість (незнання) або порушення правил проектування і конструювання електричної машини, технологічні – через порушення процесу виробництва або ремонту, експлуатаційні, – через неправильне вживання, відсутність захисту, порушення умов експлуатації електричних машин. Відмови електричних машин можуть бути обумовлені старінням матеріалів і зносом вузлів, а також випадковою концентрацією навантаження, передбачати яку практично неможливо.

Довга і кропітка робота по збору статистичних даних про відмови і їх аналіз необхідна для розробки і уточнення методик розрахунку надійності електричних машин, забезпеченню і підвищенню надійності, вдосконаленню технології виготовлення, розробки методик вибору електричних машин, створенню і поліпшенню систем захисту і правил технічної експлуатації.

Проаналізуємо причини відмов електричних машин різних типів.

Асинхронні двигуни (АД). У переважній більшості випадків (85-95%) відмови асинхронних двигунів с короткозамкненим ротором (найширше вживаних у виробництвах країни) потужністю понад 5 кВт відбуваються через пошкодження обмотки статора та ротора і розподіляються таким чином: обмотка статора – до 80%, ротора – до 10%. На підшипниковий вузол доводиться 10-15% відмов і невеликий відсоток, пов'язаний з такими причинами, як розпайка вивідних кінців, скручування валів, розрив стержнів ротора та ін. Детальний розподіл відмов асинхронних електродвигунів по основних складальних одиницях, видам і причинам на основі сучасної статистики ремонтних підприємств наведено на рис.1.

Причини відмов можна диференціювати таким чином: технологічні – близько 40%; експлуатаційні (головним чином, незадовільний захист електродвигунів) приблизно 45% і конструкційні – до 20%. В середньому на Україні протягом року капітально ремонтують близько 20% встановлених електричних машин (у будівництві – 50%, в гірничодобувній промисловості – 30%, в машинобудуванні – 20%, в чорній металургії – 13% і в хімічній промисловості – 9%).

Якість обмоток асинхронних двигунів залежить від властивостей обмотувальних дротів і ізоляційних матеріалів, від сумісності обмотувальних дротів і просочувальних складів. Вживані на заводах методи контролю міжвиткової ізоляції, у тому числі згідно існуючих відповідних ДСТУ [7, 8, 9], недостатні для запобігання приробітчастих відмов в експлуатації.

Під незадовільним захистом слід розуміти відсутність теплового захисту або його відмову. Дослідження показали, що розкид часу спрацьовування теплового захисту, навіть ненастроеного, практично не впливає на аварійність. При захисті електродвигунів плавкими вставками, що має місце в більшості випадків, вони відмовляють унаслідок роботи на двох фазах. Матеріали експлуатації свідчать про те, що 80% аварій (унаслідок роботи на двох фазах) відбувається через відсутність теплового захисту і лише 20% – від його несправності.

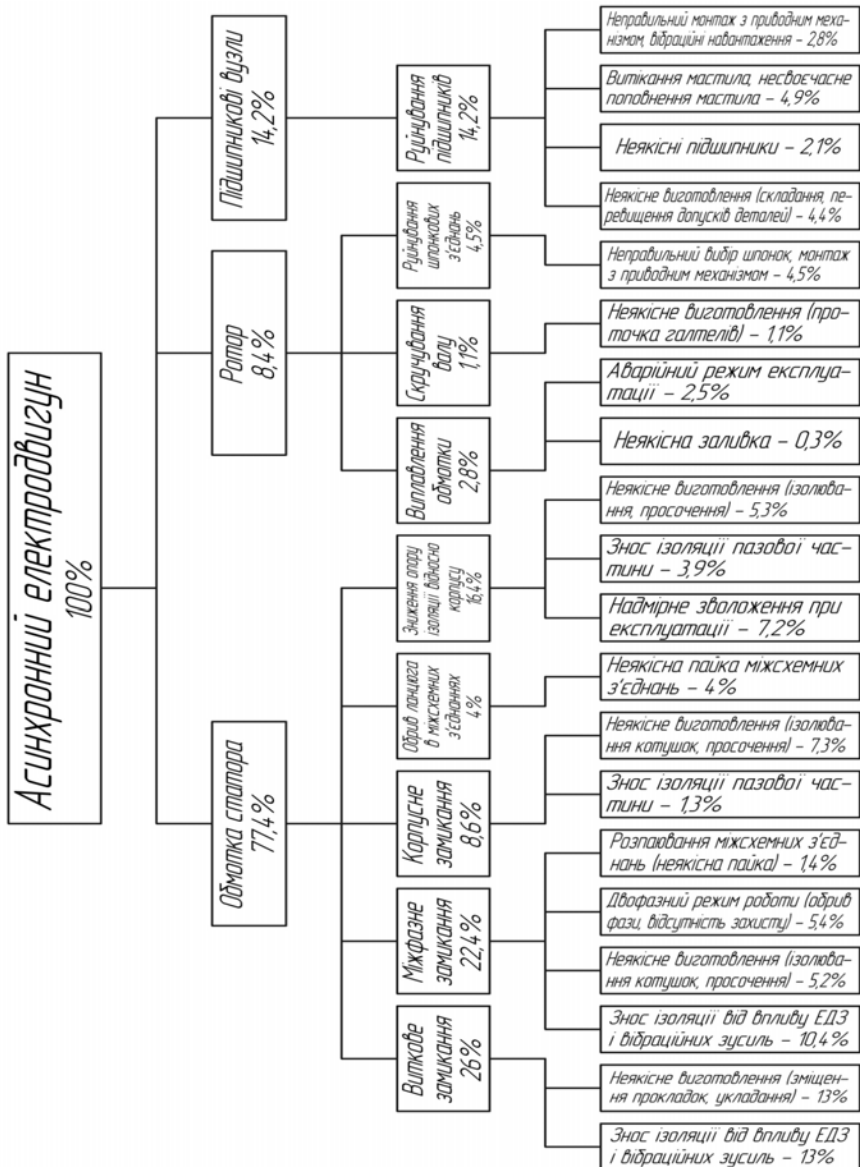


Рис. 1. Розподіл відмов асинхронного електродвигуна

Одна з поширених причин підвищеної інтенсивності відмов електродвигунів – вібрація агрегату, яка спричиняє за собою відмови підшипників, обмотки, а інколи і тріщини в чавунній оболонці електродвигуна і в лапах. Підвищена вібрація пояснюється незадовільним зчленуванням електродвигуна і виконавчого механізму, залишковою неврівноваженістю мас, що обертаються, підвищеним зазором між тілами кочення і кільцями шарикопідшипника, спотворенням форми посадочних місць під установку підшипника або їх неспіввісністю, овальністю кілець шарикопідшипника і тому подібне.

У ряді випадків до відмов наводить невідповідність конструктивного виконання електродвигунів і умов експлуатації, наприклад, вживання електродвигунів захищеного виконання в цехах з підвищеним вмістом чавунного пилу. Це істотно збільшує кількість відмов в порівнянні з вживанням в тих же умовах електродвигунів закритого виконання, що обдувається [4, 5].

Синхронні машини (СМ). Джерелом інформації для здобуття показників надійності крупних синхронних машин є дані експлуатації, оскільки організація випробувань таких машин на надійність не представляється можливою. Проте додатковий матеріал може бути отриманий шляхом поелементних випробувань окремих деталей або вузлів: стержнів, обмотки, ущільнень, охолоджувачів і так далі.

Особливістю умов роботи крупних синхронних генераторів є відносно висока якість обслуговування. Кількість відмов з причин, пов'язаних з помилками експлуатації, зазвичай сумарні з кількістю відмов через дефекти виготовлення. В той же час, в процесі експлуатації зазвичай відбувається доведення, удосконалення, модернізація генераторів і допоміжного устаткування, що дозволяє підвищити надійність синхронних машин. Іншою особливістю умов експлуатації синхронних машин є періодичні капітальні і планово-запобіжні ремонти і випробування, в процесі яких виявляється певна кількість різних пошкоджень.

Своєчасне усунення таких несправностей підвищує надійність машин, оскільки зменшує вірогідність відмов аварійного характеру.

Статистичні дані свідчать про те, що однією з основних причин відмов синхронних машин є заводські дефекти. Протягом першого періоду роботи (5-10 тис. год.) має місце прироблення, коли

замінюються і ремонтуються деталі, що мають заводські дефекти. Потім настає період нормальної експлуатації, тривалість якого в звичайних умовах складає 15-20 років. В кінці цього періоду починається поступове почастішання відмов, пов'язане зі зносом і старінням ізоляційних й інших матеріалів і елементів конструкції.

Для оцінки експлуатаційної надійності синхронних генераторів широко застосовується поняття питомої пошкоджуваності (питомого числа аварійних відключень), яке є середнім числом аварійних відключень на одну машину в рік, виражене у відсотках від загального числа відключень. Статистика показує, що питома пошкоджуваність зростає зі збільшенням потужності [10, 11]. Розподіл питомої пошкоджуваності основних вузлів генераторів представлений в табл.1, з якої виходить, що найбільш «слабким» вузлом є статор. При цьому на ізоляцію обмотки статора доводиться 2,26% відмов (ТГ) і 3,67% (ГГ), на місця паяння – 0,34 і 0,92%, на пошкодження активної сталі статора – 0,15 і 0,64% відповідно.

Таблиця 1

Питома пошкоджуваність

Вузол	Турбогенератор (ТГ)	Гідрогенератор (ГГ)
Статор	2,75	5,23
Ротор	1,63	2,20
Збудник	2,65	0,56
Інші	1,15	0,71
Усього	8,18	8,70

Становить інтерес статистика надійності синхронних генераторів невеликої потужності, що використовуються в різних установках автономного живлення. В даний час річний випуск синхронних генераторів потужністю до 100 кВт складає близько 100 тис. шт., що дає достатній матеріал для статистичних досліджень. За своїми властивостями й показниками надійності ці генератори мають загальні риси, як з крупними синхронними машинами, так і з асинхронними двигунами. Розподіл відмов в основних вузлах машин потужністю до 100 кВт, що працюють протягом 8 років, [12] складає:

	Тип генератора	
	ЕС	ЕСС
Кількість досліджених машин.....	520	230
Загальна кількість відмов.....	329	89
Розподіл відмов:		
обмотка ротора.....	26	8
обмотка статора	22	9
блок регулювання напруги	188	50
підшипниковий вузол	21	7
контактно-щітковий вузол	72	15

Основними причинами відмов є: порушення технології виготовлення, низькоякісне налаштування і наладка систем регулювання напруги, неправильна експлуатація, а також конструктивні недоробки.

Проведемо аналіз пошкоджуваності основних вузлів крупних синхронних машин. Їх відмова через пошкодження обмотки статора, як правило, відбувається в результаті пробою ізоляції обмотки [13, 14]. Ділянки зниженої електричної міцності в ізоляції обмотки можуть з'являтися внаслідок дефектів виготовлення, пошкоджень при монтажі обмотки або в процесі експлуатації, включаючи ремонтні роботи.

На процес руйнування ізоляції прискорюючий вплив надають концентрації навантажень: підвищені механічні зусилля при перехідних процесах, перевантаження по струму, перенапруження, вібрації та ін. У цій ситуації наявність ділянок із зниженою електричною міцністю і призводить до пошкодження обмотки, бо амплітуди практично можливих перенапружень недостатні для пробою доброякісної ізоляції.

При виготовленні обмотки можливе попадання на її поверхню феромагнітних часток, вібрація яких в магнітному полі призводить до поступового руйнування ізоляції.

Недостатньо надійне кріплення лобових частин обмотки створює умови для пошкодження ізоляції переважно біля виходу стержнів з пазів. З часом відбувається опускання кошика лобових частин обмотки, у зв'язку з чим з'являється додаткова напруга, а лобові частини стають більш уразливими при вібрації й ударах під дією раптових електродинамічних зусиль (короткі замикання і несинхронні

включення – для генераторів, пуски і реверси – для двигунів). На серйозну небезпеку ізоляція обмотки наражається також при теплових перевантаженнях, викликаних причинами місцевого характеру. Так, при руйнуванні ізоляції листів і місцевому замиканні сегментів активної сталі температура в області замикання може досягати 200-300°C [4]. Пошкодженню ізоляції обмотки статора сприяє також проникнення в машину води і масла.

Причиною *пошкодження активної сталі* є в основному ослаблення її запресування. Пресування сталі повинне вироблятися приблизно через кожні 0,5 м, причому тиск пресування збільшується з 80-100 до 170 Н/см². При менших тисках не забезпечується необхідна щільність пресування, при великих – виникає небезпека пошкодження лакової плівки під вентиляційними розпірками, де місцеві тиски досягають 1000-1200 Н/см².

Механічні пошкодження роторів відбуваються дещо рідше, ніж пошкодження нерухомих частин машин, але призводять до важчих аварій. Останнє особливо стосується турбогенераторів, ротори яких наділені великим запасом кінетичної енергії.

Поодинокі, але важкі аварії викликаються руйнуванням роторних валів. Причиною аварії може бути заклинення ротора при розриві бандажа, поширення тріщин від зубців в глибину валу, а також температурну напругу в тілі ротора, викликані несиметричним розподілом теплових потоків в площині поперечного перетину. Наприклад, різниця температур поверхні великого зуба і внутрішньої області ротора в нейтральній осі в турбогенераторах з непрямым охолодженням досягає 90-100°C. При цьому напруга розриву, направлена уздовж осі ротора, може складати величину близько 16000-18000 Н/см².

Пошкодження обмотки ротора через її переміщення при змінах температури є однією з основних причин аварій в турбогенераторів з непрямым охолодженням. Вживання безпосереднього охолодження обмоток ротора і легованої (з присадкою срібла) міді дозволяє істотно зменшити температурні деформації обмотки: якщо для чистої міді марки МІ межа текучості складає 2000-3000 Н/см², то для легованої – 15000-20000 Н/см².

До 30-40% відмов роторів викликані пошкодженнями і несправностями струмопроводів і струмознімальних вузлів. Внутрішні

струмопроводи крупних турбогенераторів мають високу надійність, проте відзначалися випадки порушення ізоляції струмоведаччих болтів, головним чином, поблизу контактних кілець, зумовлених дефектами виготовлення або збірки. Значно частіше спостерігаються пошкодження зовнішніх струмопроводів турбогенераторів малої потужності, викликані в основному втомним зломом струмоведаччих пластин біля кріплення до контактної кільця або стиранням ізоляції на вигинах струмопроводу. Порівняно часто в явноплюсних машинах, зокрема, гідрогенераторах, відбуваються розриви струмопроводу або міжполюсних з'єднань, а також перегрів і розплавлення пайок міжполюсних з'єднань при тривалих форсуваннях збудження.

Поширеною несправністю є зниження опору ізоляції ланцюга ротора через забруднення струмопроводу маслом і вугільним пилом. Зниження опору ізоляції може статися також унаслідок забруднення самої обмотки.

Найчастіше ушкодження підшипників і під'ятників супроводжуються виплавленням бабіту, пошкодженням вкладишів і цапф підшипниковими струмами і витіканням масла [15]. Виплавлення бабіту зазвичай відбувається в результаті порушення роботи системи маслопостачання. При швидкій зупинці агрегату пошкодження цапф виявляються незначними, оскільки розплавлений бабіт грає роль мастила. Пошкоджені вкладиші підлягають заміні або перезаливці. Виникнення підшипникових струмів типове для крупних електричних машин. Вельми значні струми протікають через підшипники при замиканні ланцюга збудження на корпус і наявності заземлення в зовнішньому ланцюзі ротора. В цьому випадку пошкодження шийок валу і вкладишів підшипників можуть бути дуже серйозними. Проте навіть невеликі підшипникові струми при тривалому протіканні призводять до пошкодження вкладишів і шийок валу.

Досить відповідальним вузлом гідрогенераторів є під'ятник. Їх пошкодження зумовлюють істотний відсоток відмов електричних машин цього типу. Найбільш характерними пошкодженнями під'ятників є знос, задираки і виплавлення бабітового шару на поверхні сегментів, а також пошкодження від підшипникових струмів. Підвищений знос може бути обумовлений надмірним питомим наван-

таженням на певних ділянках поверхні сегментів, викликаним їх температурною деформацією або іншими причинами.

Підвищена вібрація електричних машин свідчить про наявність недоліків конструкції, дефектів виготовлення і збірки, а також про виникнення пошкоджень. В той же час, сама вібрація є джерелом серйозних пошкоджень і аварій.

В результаті підвищеної вібрації відбувається ослаблення пресування активної сталі, порушення щільності з'єднань, руйнування зварних швів і деталей унаслідок втоми матеріалу і контактної корозії, зниження газощільності, прискорений знос ізоляції, порушення герметичності в системах водо- і маслопостачання, підвищені втрати і нагрів підшипників, розлад роботи і знос контактних кілець і щіткового апарату і так далі. Робота з підвищеною вібрацією шкідлива не лише для машини і її фундаменту, але і для оточуючих машин, контрольно-вимірювальних приладів і обслуговуючого персоналу. Стандарти, що діють, визначають наступні допустимі значення амплітуди вібрації: для турбогенераторів – не більше 40 мкм, для синхронних компенсаторів – не більше 80 мкм, для гідрогенераторів – не більше 100-180 мкм залежно від частоти обертання. Проте регламентується при цьому лише вібрація підшипників.

Машини постійного струму (МПС). Найбільша частина відмов в цих машинах доводиться на колекторно-щітковий вузол і на підшипниковий вузол. Згідно експлуатаційній статистиці в середньому близько 25% відмов машин відбувається із-за несправності колекторів. В деяких випадках (наприклад, на транспорті) ця цифра досягає 44-66%. У тягових двигунах електровозів однією з серйозних причин відмов є виникнення кругового вогню. Доля відмов колекторів через круговий вогонь складає в середньому 70% [16].

Дослідження ряду двигунів постійного струму прокатних станів показало наступний розподіл відмов по вузлах: колекторний вузол – 56%, механічні пошкодження – 34%, обмотка якоря і полюсів – 10% .

В результаті проведеного аналізу статистичних даних відмов тягових електродвигунів постійного струму великовантажних автомобілів ДК – 717А встановлено, що найменш надійними елементами є обмотка якоря і колекторно-щітковий вузол. Числа відмов електродвигунів по колекторно-щітковому вузлу коливаються від 21,6%

до 37,8% (по підприємствах міндобри) і в середньому по всіх галузях складають 26,5%; по обмотці якоря – від 19,6% до 42% (вуглепром) і в середньому – 27,7%.

На рис. 2 показана усереднена залежність інтенсивності відмов електродвигунів у функції від пробігу τ транспортних засобів.

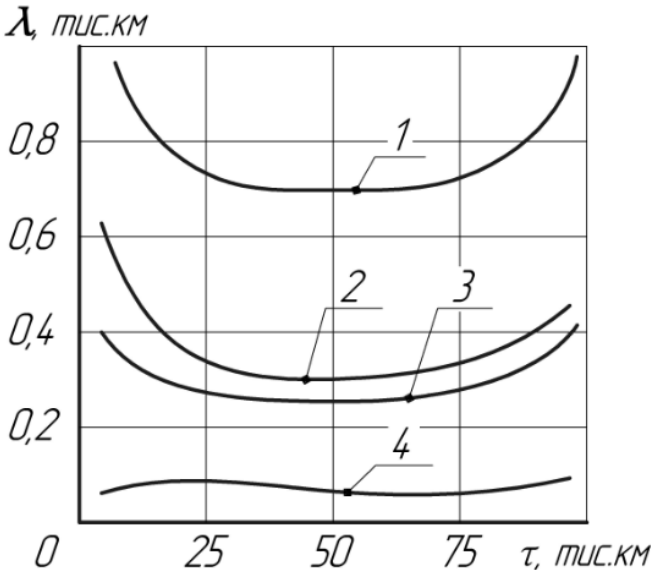


Рис. 2. Інтенсивність відмов електродвигунів (1), обмоток якорів (2), колекторно-щіткових засобів (3) і механічних (4) вузлів у функції від пробігу

Якщо представити інтенсивність відмов електродвигунів у вигляді функції $\lambda_{\text{де}} = k_p f(x_i)$ (де k_p коефіцієнт, що враховує умови роботи на групах підприємств різних галузей, x_i – інші фактори), то згідно із статистичними даними коефіцієнт k_p складає: для гірничодобувних підприємств чорної металургії – 0,837, для кольорової металургії – 0,919, для вугільної промисловості – 1,166, для хімічної промисловості – 1,137.

Розглянемо характерні пошкодження основних вузлів машин постійного струму. До характерних пошкоджень колектору відносяться зміна його форми через нерівномірний знос, порушення поліровки поверхні з появою на ній подряпин, підгорання і оплавлення пластин при несприятливій комутації і кругових вогнях. При виникненні одного з вказаних пошкоджень машина має бути зупинена для проведення відповідного ремонту. В цілях усунення виниклої несправності колектор обов'язково піддається проточці різцем.

У деяких типах електродвигунів постійного струму застосовуються колектори з пластмасовим корпусом. Відмови таких колекторів в більшості випадків пов'язані з пробоем або перекриттям дугою ізоляційної частини корпусу.

Пошкодження обмотки якоря відбувається з наступних причин: через пробій корпусної ізоляції між обмоткою і пакетом сталі якоря, міжвиткових замикань (у якорях з багатовитковими секціями), розпайки сполучних півників колекторних пластин з обмоткою (у машинах великої потужності), руйнування бандажів, що утримують обмотку якоря (у високошвидкісних машинах) і ін.

Пошкодження обмоток збудження, обмоток додаткових полюсів і компенсаційних обмоток – досить рідкі. Вони є зазвичай пробоем корпусної ізоляції між обмоткою і магнітною системою машини.

З механічних частин машин постійного струму найбільш схильні до зносу підшипники ковзання або кочення і шийки валу. Характерними ознаками пошкоджень цих вузлів є знос вкладишів, витікання мастила, порушення роботи змащувальних кілець, поломка кульок або роликів, руйнування сепараторів, заклинювання кульок, заїдання шийок валу у вкладишах підшипників і ін. Пошкодження щіткової траверси можуть виявлятися у вигляді поломки кільця траверси, що закріплює її в підшипниковому або іншому пристрої, розладі регулювання положення щіткотримачів на пальцях або бракетах траверси, пошкодження пальців або бракетов, що утримують щіткотримачі на траверсі і ін. Поява будь-яких з вказаних пошкоджень призводить до відмови машини, яка має бути зупинена для проведення відповідного ремонту.

У таблиці 2 представлені дані про інтенсивність відмов деяких типів електродвигунів постійного струму типу ДПМ і змінного

струму типу ДСД і ДС (синхронні реактивно-гістерезисні), АПН (асинхронні підвищеної надійності) і ШД (шагові). Найбільше число відмов доводиться на обмотки, підшипникові і колекторно-щіткові вузли. Відмови обмоток обумовлені короткими замиканнями між витками або на корпус, обривом дротів і порушенням місць паянь. Пошкодження підшипникових вузлів відбуваються унаслідок механічного зносу підшипників, погіршення стану мастила, неякісної посадки підшипників на вал і в щити. У колекторних машинах відмови підшипників відбуваються, головним чином, з боку колекторно-щіткового вузла через несприятливий вплив щіткового пилю, вібрації і нагріву колектору. Термін служби колекторно-щіткового вузла визначається в основному зносом щіток (граничне напрацювання електрощіток низькошвидкісних машин – близько 1000 год, високошвидкісних – 100-150 год).

Таблиця 2

Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-4}, \text{год}^{-1}$

Тип електродвигуна	Обмотка	Підшипниковий вузол	Колекторно-щітковий вузол	Результуюча
ДПМ-20-Н1-01	0,5	0,4	0,4	1,3
ДПМ-25- Н1-01	1,3	2,2	0,3	3,8
ДПМ-25-НЗ-01	0,4	0,2	0,3	1,6
ДПМ-30-Н1-01	1,4	1,2	0,2	2,8
ДС-1**	0,05	0,02	–	0,15
АПН-012/2	0,16	0,04	–	0,2
АПН-11/2	0,31	0,09	–	0,4
ШД-1	0,6	0,4	–	1,0
ШД-300/300	0,6	0,15	–	0,75

* У машині використовується відцентровий регулювальник з $\lambda = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{год}^{-1}$

** У машину вбудований редуктор з $\lambda = 0,08 \cdot 10^{-4} \text{год}^{-1}$

Нижче приведені узагальнені статистичні дані про інтенсивності відмов деяких елементів електричних машин і деяких типів машин малої потужності [5]:

Елементи і типи машин	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}, год^{-1}$
Колектори електричних машин	2,9
Підшипники ковзання	0,22
Підшипники кулькові	0,875
Передачі:	
зубчасті циліндрові	2,18
зубчасті гвинтові	0,05
зубчасті редуктори	0,2
Щити підшипникові	0,087
Генератори:	
постійного струму	0,9
змінного струму	0,7
звукової частоти	0,35
Сельсини:	
синхронних передач	0,35
вирішальних пристроїв	1,11
Електродвигуни:	
асинхронні	8,6
синхронні	0,36
постійного струму	9,36
старанні	0,23
крокові	0,37
вентиляторів	0,2

1.3. Забезпечення і підвищення надійності електричних машин

Проблема забезпечення надійності пов'язана зі всіма етапами створення електричних машин і періодом їх практичного використання. На рис. 3. наведені організаційні причини відмов електродвигунів згідно сучасних статистичних даних.

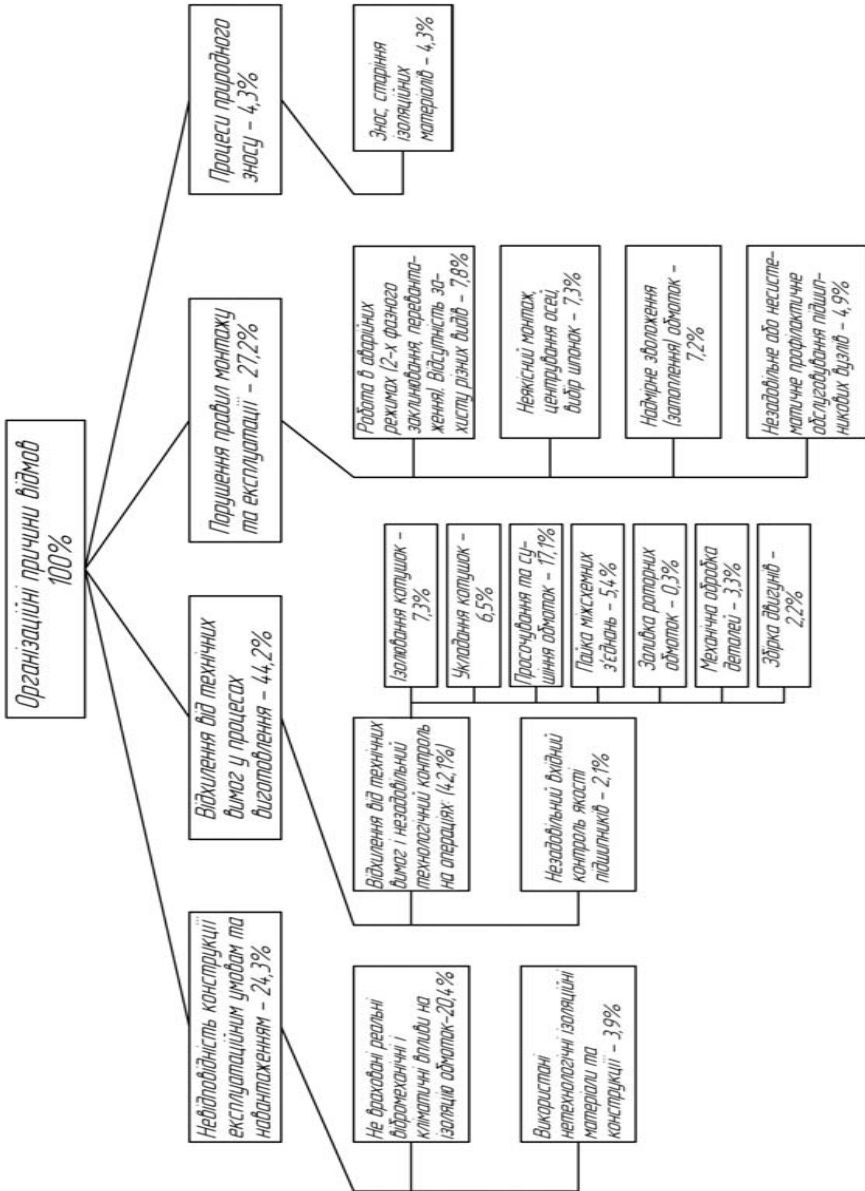


Рис. 3. Організаційні причини відмов електродвигунів

Основним завданням при проектуванні машини є забезпечення необхідних робочих характеристик, проте одночасно виробляється попередня оцінка надійності, зазвичай в три етапи [4, 17]. Перший етап, який носить якісний характер, складається з розрахунку і порівняння кількісних показників надійності для різних варіантів виконання машини і вибору оптимального варіанту (при цьому остаточно встановлюються рівні електричних, теплових і магнітних навантажень). На другому етапі виробляється уточнений розрахунок надійності вже вибраного варіанту машини. При цьому бажано знати точні значення кількісних показників окремих вузлів – це досягається за допомогою систематичного накопичення матеріалу минулих років (з подальшим прогнозуванням надійності нового типу машин). На завершальному, третьому етапі, виробляється контроль розрахункових показників шляхом випробування на надійність дослідних зразків (практично лише для машин малої і середньої потужності).

При проектуванні для забезпечення заданої надійності необхідно передбачати використання якісних активних і конструкційних матеріалів (особливо теплостійкої корпусної ізоляції і обмотувальних дротів); ефективних засобів охолодження для зниження робочої температури машини; раціонального вибору електричних і магнітних навантажень, враховуючи вимогу здобуття як заданої надійності, так і забезпечення мінімальних мас і габаритів (відмітимо, що ці вимоги зазвичай суперечливі); конструкцій окремих вузлів і елементів машини з врахуванням вимог експлуатації; простіших конструкцій машини в цілому і окремих її вузлів; спеціальних захисних пристроїв, що запобігають розвитку аварійної ситуації; вбудованих датчиків для діагностики стану різних вузлів і елементів в процесі роботи.

При виробництві електричних машин для забезпечення заданої надійності повинні виконуватися наступні вимоги (пов'язані з підтримкою технологічної дисципліни):

- періодична перевірка якості й надійності готових виробів;
- належний контроль за операціями і при випуску готових виробів;
- строге дотримання режимів в технологічному процесі і технології збірки і монтажу;

– відбракування матеріалів і вузлів, які постраждали при транспортуванні або зберіганні;

– підвищення культури виробництва;

– недопущення заміни сортності матеріалів і комплектуючих виробів;

– якщо така заміна вироблена, то вона не повинна знижувати якості (якість повинна завжди відповідати нормативно-технічній документації);

– контроль фізичних властивостей, параметрів і характеристик матеріалів і комплектуючих виробів (наприклад, обмотувальних дротів, підшипників), що поступають від підприємств-постачальників;

– введення контрольних карт.

Найбільш ефективний метод комплексного виконання перерахованих вимог – розробка і впровадження на заводах електротехнічної промисловості систем управління надійністю.

При експлуатації електричних машин для забезпечення необхідної надійності умов експлуатації (температура навколишнього середовища, рівень вологості і запиленості, вплив агресивних середовищ, загальний рівень вібрації установки і т. д.) і системи обслуговування (догляд за машинами, періодичний і профілактичний контроль, встановлена за регламентом чистота і наладка, ремонт або заміна деталей, що зносилися, і т. д.) повинні відповідати встановленим нормам при високій якості захисту електродвигунів і відповідності конструктивного виконання електродвигунів умовам експлуатації.

Підвищення надійності електричних машин, перш за все, пов'язане з подальшою розробкою наукових основ проектування (з врахуванням останніх досягнень в області надійності електричних машин) і вживанням відповідних заходів по удосконаленню методів конструювання, виробництва і експлуатації.

Відзначимо основні шляхи підвищення надійності електричних машин:

– поліпшення теплового стану машини шляхом переходу на вищий клас нагрівостійкості ізоляції, вирівнювання температури окремих частин машини за рахунок вибору навантажень, розробки

систем охолодження, вживання захисту від перевантажень (зокрема, теплового захисту);

- розробка і впровадження конструкцій і вузлів підвищеної надійності: капсулювання всипної обмотки, перехід до нових способом кріплення колекторного вузла, вживання відкритих пазів (зазвичай з магнітними клинами), розробка і використання нових конструкцій підшипникових вузлів;

- розробка і впровадження заходів щодо зниження вібрацій, як електричної машини, так і електромеханічної системи в цілому;

- підвищення якості комплектуючих виробів і матеріалів, у тому числі: вживання підшипників підвищених класів, впровадження просочувальних лаків, що володіють високою нагрівостійкістю, вологонепроникністю, що просочує і фіксує властивостями, вживання спеціальних дротів з міцною і еластичною ізоляцією, зниження жорсткості обмотувальних дротів, вживання електроціток підвищеної зносостійкості, високоякісній міканітовій ізоляції, кадмієвий міді та ін.;

- вдосконалення методів контролю (вхідний контроль матеріалів і комплектуючих виробів, міжопераційний контроль, проведення різного роду випробувань як на надійність – контрольні, визначальні, прискорені і т. д., так і типових, прийомоздаточних, контрольних і ін.);

- розширення механізації і автоматизації виробничих процесів із забезпеченням високої якості і однорідності виконання операцій, підвищення ритмічності виробництва, скорочення номенклатури виробів на підприємстві, подальша стандартизація продукції, що випускається, і методів контролю;

- розробка і впровадження у виробництво систем управління якістю і надійністю, що включають автоматизовані системи контролю і статистичної обробки даних – статистичне регулювання технологічного процесу (згідно ДСТУ 2925-94 «Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення» [18]). Під статистичним регулюванням розуміється «коректування параметрів технологічного процесу в ході виробництва за допомогою вибіркового контролю продукції, що виготовляється для технологічного забезпечення необхідної якості і попередження браку»);

– планомірне вивчення умов експлуатації і експлуатаційної надійності електричних машин, визначення характеру, причин і законів розподілу відмов;

– наладка і правильна експлуатація систем захисту електричних машин, передбачених при проектуванні;

– розробка і вдосконалення методів розрахункової оцінки надійності електричних машин, а також оцінки надійності шляхом випробувань на надійність (у тому числі прискорених);

– розробка і вдосконалення методів розрахункової і експериментальної оцінки надійності при зберіганні і транспортуванні;

розробка методів визначення економічно оптимальних показників надійності.

Звичайне підвищення надійності електричної машини пов'язано з матеріальними витратами, тому проблема підвищення надійності (за винятком особливо відповідальних випадків) повинна вирішуватися на базі техніко-економічного розрахунку. Для кожного типу електричної машини можуть бути розроблені економічно оптимальні показники надійності з врахуванням умов використання, фізичного і морального зносу, витрат на обслуговування і ремонт, інших показників.

Для машин, що не ремонтуються, збільшення терміну служби економічно доцільно. Виняток становлять випадки, коли необхідне застосування особливо дорогих і дефіцитних матеріалів або трудомісткої технології, коли надмірно зростають маса і габарит або коли довговічність машини перевищує довговічність системи, в якій ця машина використовується.

Для ремонтуваних машин проблема надійності виглядає інакше: у міру старіння вузлів електричної машини, різко збільшуються витрати на ремонт і збитки від простоїв, так що, в кінцевому рахунку, подальше відновлення стає недоцільним. В той же час, частка амортизаційних відрахувань зменшується. В результаті подібної альтернативи виникає поняття оптимальної довговічності, яка визначається мінімумом питомих (у одиницю часу) витрат споживача.

1.4. Розрахунок економічно оптимальних значень показників надійності електричних машин

Набуття надвисоких значень показників надійності (наприклад, значень вірогідності безвідмовної роботи 0,99 або навіть 0,9999) зв'язане з різким збільшенням витрат [19]. Вироби з такими високими показниками надійності зазвичай працюють в системах, при створенні яких визначним є забезпечення, наприклад, безпеки людини (авіація, космонавтика, дослідження світового океану і ін.).

Для звичайних умов в основу визначення економічно оптимальних значень надійності покладена вимога забезпечення максимальної величини додаткового економічного ефекту за амортизаційний термін служби [3]:

$$E_{max} = (m_0 - m_{opt})RT_e - \Delta K, \quad (1)$$

де E_{max} – додатковий економічний ефект за амортизаційний термін служби, грн.;

m_0 – початкове значення показника надійності при заданих режимах і умовах експлуатації;

m_{opt} – розрахункове оптимальне значення показника надійності;

R – середня вартість витрат при відмові виробу, грн.;

T_e – термін служби виробу, років;

ΔK – додаткові витрати на підвищення надійності виробу, грн.

Контрольні запитання до розділу

1. Які існують проблеми надійності та їх значення в сучасній техніці?
2. Наведить статистику відмов АД. Які основні причини відмов?
3. Наведить статистику відмов СМ. Які основні причини відмов?
4. Наведить статистику відмов МПС. Які основні причини відмов?
5. Наведить статистику відмов ЕА. Які основні причини відмов?
6. Які існують засоби забезпечення і підвищення надійності електричних машин?
7. Дайте характеристику організаційним причинам відмов.

2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ

2.1. Основні поняття і терміни теорії надійності

Розглянемо основні поняття і терміни, необхідні для вивчення питань теорії і розрахунку надійності елементів і систем технічних виробів (у основу подальшого переліку покладений ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення»).

Об'єкт – система, споруда, машина, підсистема, апаратура, функційна одиниця, пристрій, елемент чи будь яка їх частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця.

Примітка 1. Об'єкт може включати технічні мсоби, технічний персонал чи будь-які їх поєднання.

Примітка 2. Сукупність об'єктів, об'єднаних спільним призначенням і метою функціонування, може розглядатися як об'єкт.

Надійність – властивість об'єкта зберігати у часі в установленних межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Примітка 1. Надійність є комплексною властивістю, що залежно від призначення об'єкта і умов його застосування, може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність чи певні поєднання цих властивостей.

Примітка 2. Наведений термін використовують лише для загального не кількісного опису вказаних властивостей.

Безвідмовність (властивість) – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку.

Довговічність – властивість об'єкту зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Ремонтпридатність – властивість об'єкту, що полягає в пристосуванні до попередження і виявлення причин виникнення відмов (пошкоджень), до підтримки і відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування і ремонтів.

Збережуваність – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, під час і після зберігання та (чи) транспортування.

Працездатний стан (працездатність) – стан об'єкту, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Граничний стан – стан об'єкту, при якому його подальше вживання за призначенням недопустимо або недоцільно або відновлення його справного або працездатного стану неможливе або недоцільно.

Відмова – подія, що полягає в порушенні працездатності об'єкту. Відмови класифікуються по характеру процесу прояву – на раптові і поступові, по зв'язку з іншими відмовами – на залежні і незалежні, по фізичній картині процесу – на катастрофічні і параметричні, по ступеню впливу на працездатність – на повні і часткові.

Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною параметрів під впливом багатьох випадкових чинників, пов'язаних з дефектами елементів, з порушеннями режимів або умов роботи, помилками обслуговуючого персоналу і тому подібне. При поступовій зміні параметрів в результаті старіння вузлів і матеріалів елементів або систем може статися поступова відмова. Проте розділення на раптові і поступові відмови носить все ж досить умовний характер.

Відмова якого-небудь вузла відноситься до незалежних, якщо він не є наслідком відмови інших вузлів. Інакше мають місце залежні відмови. Що ми можемо сказати про відмову обмотки електричної машини при розрегулюванні струмового реле або про відмову підшипника при підвищеному іскрінні колектору машини постійного струму? У першому випадку відмова носить залежний характер, в другому – незалежний.

Відмови типу пробою ізоляції, заклинювання підшипників, руйнування валу, короткого замикання відносяться до катастрофічних відмов, які призводять до повного порушення працездатності.

Параметричні відмови є частковими відмовами складних виробів і виражаються в погіршенні якості функціонування виробу.

Крім того, відмови розділяються на конструкційні, виробничі і експлуатаційні.

Відновлюваний об'єкт – об'єкт, для якого в тій, що розглядається ситуації проведення відновлення працездатного стану передбачене в нормативно-технічній і (або) конструкторській документації.

Невідновлюваний об'єкт не підлягає відновленню в даній ситуації.

Слід відзначити, що залежно від ситуації навіть один і той же об'єкт може бути віднесений до того або іншого вигляду.

Напрацювання – тривалість або об'єм роботи об'єкту.

Напрацювання повністю – напрацювання об'єкту від початку його експлуатації до виникнення першої відмови.

Технічний ресурс (ресурс) – напрацювання об'єкту від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Термін служби – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкту або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

У складних технічних виробках і системах застосовують резервування – спосіб підвищення надійності. Резервування – це вживання додаткових засобів і (або) можливостей з метою збереження працездатного стану об'єкту при відмові одного або декількох його елементів. Резерв – сукупність додаткових засобів і (або) можливостей, використовуваних для резервування. Резерв може бути навантаженим, коли резервний елемент знаходиться в тому ж робочому режимі, що і основний, полегшеним і, нарешті, ненавантаженим, коли резервний елемент навантаження практично не несе (до початку виконання ним функцій основного елемента).

Показник надійності – кількісна характеристика однієї або декількох властивостей, складових надійності об'єкту.

2.2. Показники надійності

Показники надійності можна розбити на дві групи, що характеризують невідновні (обмотки ротора і статора електричних машин, щітки, підшипники) і відновлювані (колекторно-щітковий вузол, підшипниковий вузол, пускорегулююча апаратура) об'єкти [3, 5, 20].

До широко вживаних кількісних характеристик надійності невідновних об'єктів відносяться: імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і відмови $Q(t)$, частота відмов $a(t)$, інтенсивність відмов $\lambda(t)$, середнє напрацювання до першої відмови $T_{ср}$.

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) – це імовірність того, що за певних умов експлуатації в заданому інтервалі часу не станеться жодної відмови. *Імовірність $P(t)$* – функція убуває (рис. 4), причому

$$0 \leq P(t) \leq 1, P(0) = 1, P(\infty) = 0.$$

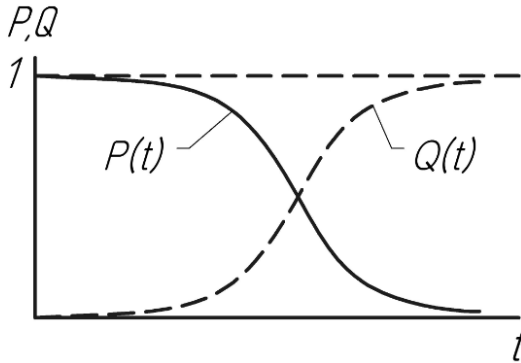


Рис. 4. Криві імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ і вірогідності відмов $Q(t)$

Імовірність безвідмовної роботи за статистичними даними про відмови оцінюється вираженням:

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}. \quad (2)$$

Тут $P^*(t)$ – статистична оцінка ІБР; N_0 – число виробів на початку випробувань; $n(t)$ – число виробів, що відмовили, за час t .

При великому числі виробів N_0 статистична оцінка $P^*(t)$ практично збігається з імовірністю $P(t)$.

Імовірність відмови $Q(t)$ – це імовірність того, що за певних умов експлуатації в заданому інтервалі часу станеться хоч би одна відмова.

Відмова і безвідмовна робота – події протилежні і неспільні:

$$Q(t) = 1 - P(t); Q^*(t) = n(t) / N_0 . \quad (3)$$

Частота відмов $a(t)$ – є відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до первинного числа випробовуваних виробів:

$$a^*(t) = n(\Delta t) / (N_0 \cdot \Delta t), \quad (4)$$

де $n(\Delta t)$ – число виробів, що відмовили, в інтервалі часу Δt .

Частота відмов або щільність імовірності відмов $f(t)$ може бути визначена як похідна за часом імовірності і відмов:

$$A(t) = f(t) = dQ(t)/dt = -dP(t)/dt. \quad (5)$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – умовна щільність імовірності і виникнення відмови, яка визначається як відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до середнього числа виробів, що справно працюють в даний відрізок часу:

$$\lambda^*(t) = n(\Delta t) / (N_{cp} \cdot \Delta t), \quad (6)$$

де $N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2$ – число виробів, справно працюючих в інтервалі Δt ,

N_i, N_{i+1} – відповідно число виробів, справно працюючих на початку і кінці інтервалу $\Delta t, N_i \geq N_{i+1}$.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ є також відношенням частоти відмов до ІБР:

$$\lambda(t) = a(t)/P(t) = -P'(t)/P(t) \quad (7)$$

Імовірність безвідмовної роботи і інтенсивність відмов пов'язані виразом:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (8)$$

Інтенсивність відмов залежить від часу, лише в разі експоненціального закону розподілу відмов $\lambda(t)=\text{const}$.

Середнім напрацюванням до відмови T_{cp} називається математичне очікування напрацювання об'єкту до першої відмови. Математичне очікування m_x обчислюється таким чином:

$$m_x = \int_0^{\infty} P(t)dt \quad (9)$$

За статистичними даними про відмови середнє напрацювання до першої відмови обчислюється за формулою:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (10)$$

де t_i – час безвідмовної роботи i -го зразка;

N_0 – число випробовуваних виробів.

Для визначення T_{cp} необхідно знати час безвідмовної роботи всіх випробовуваних виробів. Інколи це не представляється можливим і тому користуватися формулою (10) незручно. Маючи дані про кількість елементів n_i в кожному i -м інтервалі часу, середнє напрацювання до першої відмови можна визначити з рівняння:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cp_i}}{N_0}, \quad (11)$$

де m – кількість інтервалів тривалістю Δt .

Значення t_{cp_i} і m знаходяться за наступними залежностями:

$$t_{cp_i} = (t_{i-1} + t_i)/2; \quad m = t_k / \Delta t, \quad (12)$$

де t_{i-1} , t_i – час початку і закінчення i -го інтервалу;

t_k – час, протягом якого вийшли з строю всі вироби.

Приклад розв’язання задачі. Проводяться ресурсні випробування. Встановлено 400 машин. Через 3000 год роботи відмовило 200 машин. Випробування продовжувалися, і через 100 відмовило ще 100 машин. Визначити $P^*(3000)$, $Q^*(3000)$, $P^*(3100)$, $Q^*(3100)$, $P^*(3050)$, $\lambda^*(3050)$, $a^*(3050)$.

Відповідно до формул (2) і (3) визначимо імовірність безвідмовної роботи і імовірність відмови за 3000 і 3100 год:

$$P^*(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5;$$

$$Q^*(3000) = 200/400 = 0,5; P^*(3100) = (400 - 300)/400 = 0,25;$$

$$Q^*(3100) = 0,75.$$

Середнє число справно працюючих машин в інтервалі від 3000 до 3100 год:

$$N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2 = (200 + 100) / 2 = 150.$$

Число машин, що відмовили за 3050 год і $P^*(3050)$ рівні

$$n(3050) = N_0 - N_{cp} = 400 - 150 = 250;$$

$$P^*(3050) = (400 - 250) / 400 = 0,375.$$

Частота і інтенсивність відмов визначаються по формулах (4) і (6):

$$a^*(3050) = n(\Delta t) / (\Delta t \cdot N_0) = 100 / (100 \cdot 400) = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda^*(3050) = n(\Delta t) / (\Delta t \cdot N_{cp}) = 100 / (100 \cdot 150) = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Розглянемо коротко характеристики відновлюваних об’єктів. На випробуваннях знаходиться N_0 виробів, які при відмові негайно замінюються новими або відремонтованими. Испит закінчуються, якщо число відмов досягає величини, достатньої для оцінки надійності. Якщо не враховувати час на відновлення системи, то кількісними характеристиками можуть бути, наприклад, параметр потоку відмов $\omega(t)$ і напрацювання на відмову t_{cp} .

Параметр потоку відмов $\omega(t)$ – відношення середнього числа відмов відновлюваного об’єкту за довільно мале його напрацювання до значення цього напрацювання $\sum t_i$:

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{\sum t_i \cdot \Delta t}, \quad (13)$$

де $n(\Delta t)$ – число відмов в інтервалі Δt .

Середнє напрацювання на відмову (напрацювання на відмову) t_{cp} – відношення напрацювання відновлюваного об'єкту до числа його відмов протягом цього напрацювання. Напрацювання на відмову t_{cp} визначається як середнє значення часу між сусідніми відмовами:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (14)$$

де t_i – час справної роботи виробу між $(i-1)$ -м та i -м відмовами;
 n – число відмов за деякий час t .

Формула (14) використовується при випробуванні одного зразка виробів. Якщо на випробуванні знаходиться N зразків протягом часу t , то t_{cp} обчислюється таким чином:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n t_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j}, \quad (15)$$

де t_{ij} – час роботи j -го зразка виробів між $(i-1)$ -м та i -м відмовами;
 n_j – число відмов за час t j -го зразка.

Гамма-процентне напрацювання повністю – напрацювання, протягом якого відмова об'єкту не виникає з імовірністю, вираженою у відсотках.

Для оцінки часу, необхідного для відновлення ремонтovanого виробу, тобто для оцінки готовності виробу до виконання своїх функцій, використовуються коефіцієнти готовності і вимушеного простою.

Коефіцієнтом готовності K_r називається відношення сумарного часу справної роботи t_p до суми сумарних часів справної роботи t_p і вимушених простоїв t_{np} :

$$K_r = \frac{t_p}{t_p + t_{np}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{npi}}, \quad (16)$$

де t_{pi} – час роботи між $(i-1)$ -ою та i -ю відмовами;

t_{npi} – простою після i -ї відмови;

n – число відмов виробів.

Коефіцієнтом вимушеного простою K_{II} називається відношення часу вимушеного простою до суми часу справної роботи і вимушених простоїв:

$$K_{II} = t_{np} / (t_p + t_{np}) . \quad (17)$$

Коефіцієнти K_G і K_{II} зв'язані залежністю

$$K_{II} = 1 - K_G . \quad (18)$$

Інколи надійність відновлюваних виробів або системи оцінюється до першої відмови або вживання резервування. В цьому випадку показниками надійності відновлюваних систем можуть служити показники надійності невідновних систем.

Наявність декількох показників надійності зовсім не означає, що потрібно оцінювати надійність об'єктів по всіх цих показниках. При дослідженні надійності електричних машин найбільш часто використовується імовірність безвідмовної роботи.

Перераховані вище показники надійності відносяться до показникам безвідмовності. Крім того, ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення» визначає показники довговічності (середній ресурс, гамма-процентний ресурс, призначений ресурс, середній термін служби, гамма-процентний термін, призначений термін служби); показники ремонтпридатності (імовірність відновлення працездатного стану, середній час відновлення працездатного стану); показники збережуваності (середній термін збережуваності, гамма-процентний термін збережуваності).

В термінах показників довговічності слід вказувати вигляд дій після настання граничного стану об'єкту (наприклад, середній ресурс до капітального ремонту; гамма-процентний ресурс до середнього ремонту і т. д.). Якщо граничним станом обумовлене остаточне зняття об'єкту з експлуатації, то показниками довговічності називаються: повний середній ресурс (термін служби), повний гамма-процентний ресурс (термін служби), повний призначений ресурс (термін служби). У повний термін служби входить тривалість

всіх видів ремонту об'єкту. Показники довговічності визначаються таким чином.

Середній ресурс – математичне очікування ресурсу.

Гамма-процентний ресурс – напрацювання, протягом якої об'єкт не досягне граничного стану із заданою вірогідністю, вираженою у відсотках.

Призначений ресурс – сумарне напрацювання об'єкту, при досягненні якого вживання за призначенням повинно бути припинено.

Середній термін служби – математичне очікування терміну служби.

Гамма-процентний термін служби – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкту, протягом якої він не досягне граничного стану із заданою вірогідністю γ , вираженою у відсотках.

Призначений термін служби – календарна тривалість експлуатації об'єкту, досягши якої вживання за призначенням має бути припинене.

Показники ремонтпридатності і збережуваності визначаються таким чином.

Імовірність відновлення працездатного стану – це імовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкту не перевищить заданого.

Середній час відновлення працездатного стану – це математичне очікування часу відновлення працездатного стану.

Середній термін збережуваності – це математичне очікування терміну збережуваності.

Гамма-процентний термін збережуваності – це термін збережуваності, що досягається об'єктом із заданою вірогідністю, вираженою у відсотках.

2.3. Періоди роботи технічних виробів

Всякий технічний виріб, у тому числі і електрична машина, в процесі свого функціонування проходить три характерні періоди роботи: прироблення ($0 < t < t_1$), починаючи з виходу нового виробу з цехів заводу ($t = 0$); нормальної експлуатації ($t_1 < t < t_2$) і старіння або зносу ($t > t_2$) (рис. 5) [16, 21, 22, 23].

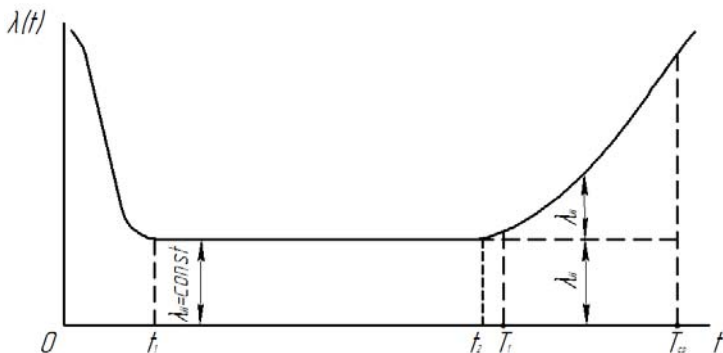


Рис. 5. Періоди роботи технічних виробів

Період прироблення характеризується високою інтенсивністю відмов, яка поступово падає. Ці відмови обумовлені технологічними, виробничими або конструкційними недоліками, властивими як самому виробу, так і виробництву (включаючи також виробництво матеріалів, їх зберігання і транспортування). Відмови, що виникають в період прироблення, прагнуть виключити шляхом заміни або доведення окремих вузлів. У електричних машинах перед випуском виробляється притирання або прироблення щіток на колекторі або на кільцях, відладка підшипникових вузлів, контроль ізоляції і так далі.

Відмови в період прироблення приблизно підкоряються закону Вейбулла.

Період нормальної експлуатації характеризується мінімальною інтенсивністю відмов. В період нормальної експлуатації відбуваються раптові відмови, які мають випадковий характер. Природа даних відмов обумовлена несподіваною концентрацією навантажень усередині виробу (або ззовні). Регулярність подій не спостерігається.

Закон розподілу відмов в цей період експоненціальний.

Період старіння або зносу характеризується різким збільшенням інтенсивності відмов. З якогось моменту елементи і деталі машини починають старіти і інтенсивно зношуватися. Відмови обумовлені старінням матеріалів, конструкцій і самого виробу. Закон розподілу відмов – або нормальний, або логарифмічно-нормальний (можуть бути й інші випадки).

На кривій інтенсивності відмов, показаній на рис. 3 (інколи її називають «крива життя» технічного виробу), показані значення T_1

– середньої довговічності виробу і $T_{cp} > T_1$ – середнього напрацювання до першої відмови. Середнє напрацювання до першого відмови зазвичай вельми значна і характеризує запас надійності машини в період нормальної експлуатації. Зазвичай T_1 ненабагато перевищує час t_2 , тобто відповідає початковій ділянці періоду старіння і зносу.

На рис. 6 показана «крива життя» електромеханічного перетворювача, що включає в себе машину постійного струму і синхронну машину.

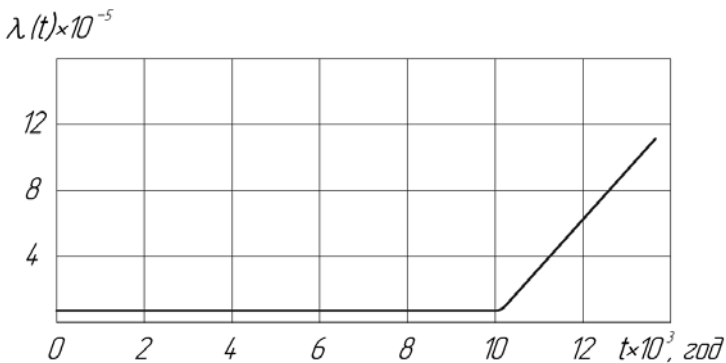


Рис. 6. Періоди роботи електромеханічного перетворювача

Електромеханічні перетворювачі – вельми відповідальні виробы, відмови яких призводять до небажаних наслідків, тому, як видно з рисунка, відмови в період прироблення, практично, повністю виключені. Це досягається ретельним контролем ізоляції, обробкою колектору і кілець по високому класу точності, наладкою і контролем підшипникового вузла та пускорегулюючої апаратури, зниженням рівня вібрації пристрою та обов'язковими випробуваннями на прироблення протягом 100 год.

Період нормальної експлуатації – 10000 год. Інтенсивність відмов мала: $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год. Технічний ресурс перетворювача дорівнює періоду нормальної експлуатації, тобто $T_1 \approx 10000$ год. Період зносу починається з $t > 10000$ год. і характеризується різким зростанням λ (в 10 разів за 5000 год.). Середнє значення напрацювання до першої відмови складає $T_{cp} = 15000$ год.

2.4. Структурна надійність

Структурною надійністю системи називається результуюча надійність при заданій структурі і відомих значеннях надійності всіх вхідних в неї блоків або елементів [10, 11].

Розбиття системи на блоки здійснюється на базі єдності функціонування і фізичних процесів, що відбуваються при роботі виробу.

Розглянемо для прикладу електролебідку, яка використовується на кораблях. При розрахунку всієї енергосистеми корабля електролебідка є окремим блоком. Детальніше електролебідку можна представити у вигляді блоків: електродвигун, редуктор, барабан і канат. У свою чергу, блоки діляться на вузли, кожен з яких з точки зору фізичної структури і функціонування представляє автономну одиницю: двигун – підшипниковий вузол, колектор і щітки, обмотки статора і ротора; редуктор – зубчасті колеса і підшипники; барабан – корпус і підшипники. Не береться до уваги при розрахунку (прирівнюються до одиниці) надійності валу, магнітопроводів, корпусу – в двигуна; в редуктора – надійність корпусу, різьбових з'єднань.

Розрахунок надійності при послідовному (основному) з'єднанні елементів. Коли відмова технічного виробу настає при відмові одного з його вузлів, то такий виріб має послідовне (основне) з'єднання елементів (рис. 7, а). Електрична машина практично завжди представляється у вигляді послідовного з'єднання вузлів.

Якщо надійність окремих вузлів p_1, p_2, \dots, p_i не залежить один від одного, то надійність системи, що складається з N вузлів, визначається як твір значень надійності для окремих частин:

$$P_c = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \dots p_N = \prod_{i=1}^N p_i. \quad (19)$$

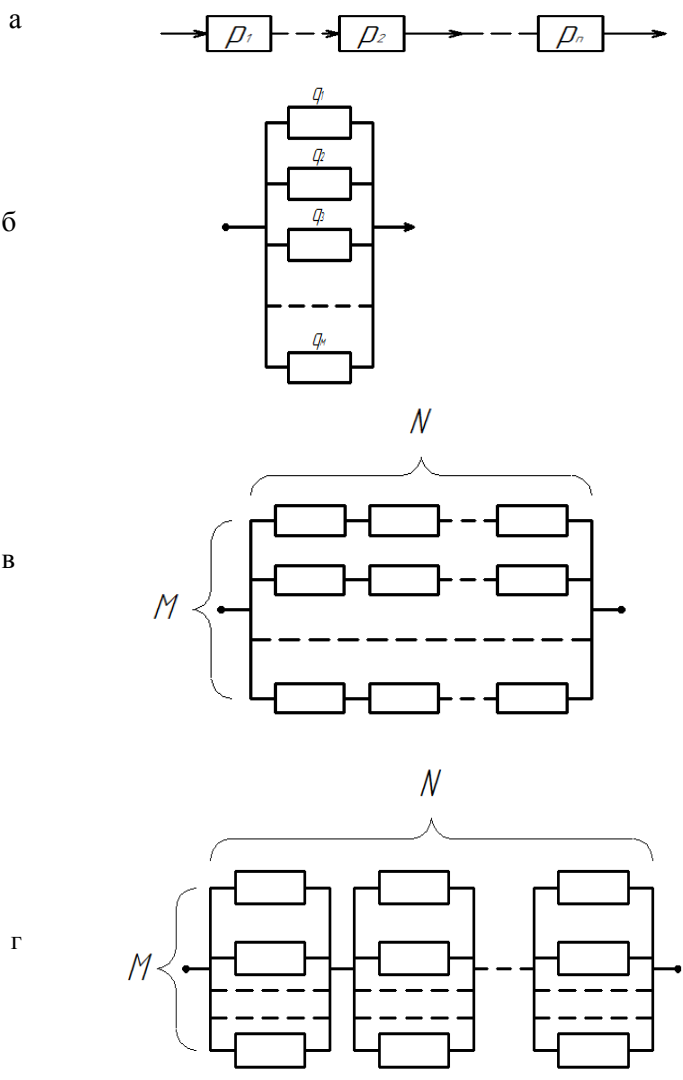


Рис. 7. Блок-схеми для визначення структурної надійності при послідовному (а), паралельному (б) і змішаному (для загального (в), і роздільного (г) резервування) з'єднанні елементів

Приклад розв'язання задачі. Яка імовірність безвідмовної роботи машини постійного струму, структурна схема надійності якої складається з колекторно-щіткового ($p_k = 0,92$) і підшипникового ($p_n = 0,95$) вузлів, обмоток якоря ($p_a = 0,99$) і збудження ($p_e = 0,99$). Всі дані приведені для $t=5000$ год.

Розв'язання. При виході з будь-яких з перерахованих вузлів матиме місце відмова всієї машини. Значить, структурна схема надійності є чотири послідовно включених блоки. Згідно формули (19) результуюча надійність буде дорівнювати:

$$P_{МПТ} = p_k \cdot p_n \cdot p_a \cdot p_e = 0,92 \cdot 0,95 \cdot 0,99 \cdot 0,99 = 0,856.$$

Розрахунок надійності при паралельному з'єднанні елементів (резервування). Для підвищення надійності часто використовується резервування або дублювання. Застосовується паралельна робота трансформаторів і синхронних генераторів в енергосистемах, в електронних схемах часто використовується паралельне включення діодів і так далі. На рис. 7, б представлена структурна схема елементів, сполучених в M паралельних гілок.

Результуюча імовірність відмови системи:

$$Q_c = q_1 \cdot q_2 \dots q_M = \prod_{j=1}^M q_j. \quad (20)$$

Результуюча імовірність безвідмовної роботи:

$$P_c = 1 - \prod_{j=1}^M q_j = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_j). \quad (21)$$

Розглянутий тип паралельного з'єднання представляє собою резервування з повною кратністю.

Розрахунок надійності при паралельно-послідовному (змішаному) з'єднанні елементів. Зазвичай в складніших системах елементи з'єднуються паралельно-послідовний (наприклад, в системах автоматичного управління, в потужних електроприводах, в радіо- і електронних схемах) [10, 21, 24]. Зупинимось на двох найбільш характерних випадках паралельно-послідовних з'єднань.

У першому випадку (його називають загальним резервуванням з постійно включеним резервом і цілою кратністю) система складається з M паралельних ланцюжків по N блоків в кожній (рис. 5, в).

Вважаємо, що імовірність безвідмовної роботи всіх блоків однакова і дорівнює p . Тоді надійність кожного послідовного ланцюга буде p^N . Вірогідність відмови кожного ланцюга $q=(1-p^N)$. І, нарешті, результуюча надійність всієї системи

$$P_c=1-(1-p^N)^M. \quad (22)$$

У другому випадку (його називають також роздільним резервуванням з постійно включеним резервом і цілою кратністю) система складається з послідовно сполучених груп N , що складаються з M паралельно включених однакових блоків (рис. 5, г). Визначаємо надійність паралельної групи

$$P_r=1-q^M \quad (23)$$

і надійність всієї системи

$$P_c=(1-q^M)^N. \quad (24)$$

2.5. Закони розподілу відмов

Відмови в роботі електричних машин як випадкові події підкоряються різним законам розподілу в часі t . Основний з них: експоненціальний, Вейбулла, нормальний, логарифмічно-нормальний [4, 5, 20, 25]. Зупинимося на короткій характеристиці кожного з перерахованих законів.

Експоненціальний закон розподілу. Цьому закону підкоряються відмови деяких вузлів електричних машин малої потужності (наприклад, колекторний вузол), а також відмови деяких типів машин малої потужності. Експоненціальний закон широко використовується для опису надійності пускорегулюючої апаратури, елементів радіоелектроніки (діоди, тріод-пентоди, конденсатори), в теорії масового обслуговування. Розподіл імовірності безвідмовної роботи в часі і середнє напруцювання повністю складають:

$$P(t) = e^{(-\lambda t)}, \quad T_{cp} = 1/\lambda. \quad (25)$$

Експоненціальний закон – однопараметричний, з незмінною інтенсивністю відмов λ , тобто $\lambda = \text{const}$.

Розподіл Вейбулла широко використовується при оцінці надійності механічних, електромеханічних вузлів і елементів радіоелектронної апаратури. В електричних машинах цим законом описується надійність підшипникових вузлів, а також розподіл пробивної напруги в обмотках асинхронних двигунів.

Розподіл Вейбулла двохпараметричний, який включає λ_0 – параметр, що визначає масштаб, і k – параметр асиметрії. Характеристики закону видозмінюються залежно від параметра k . При $k=1$ розподіл Вейбулла стає експоненціальним ($\lambda = \text{const}$), при $k>1$ інтенсивність відмов зростає, при $k<1$ інтенсивність відмов падає згідно із законом, близьким до гіперболічного. Розподіл імовірності безвідмовної роботи в часі

$$P(t) = e^{(-\lambda_0 t^k)}. \quad (26)$$

При підрахунку середнього напрацювання T_{cp} повністю використовується гамма-функція $\Gamma(1/k+1)$, значення якої даються в відповідних таблицях:

$$T_{cp} = \frac{\Gamma(\frac{1}{k} + 1)}{\lambda_0^{1/k}}. \quad (27)$$

Інколи розподіл Вейбулла розглядають як трьохпараметричне, включаючи в нього параметр положення.

Нормальний закон (закон Гауса) широко використовується при оцінці надійності виробів, на надійність яких впливає ряд випадкових чинників, кожен з яких несуттєво впливає на результуючий ефект (немає домінуючих чинників). В електричних машинах зазвичай нормальному закону підкоряються відмови колекторного вузла, контактних кілець, а також щіток (інколи підшипники і ізоляція):

$$Q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-m_x)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (28)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення;

m_x – математичне очікування.

Нормальний закон – двохпараметричний з параметрами σ і m_x .

Для розрахунку імовірності події в заданому інтервалі t_1, t_2 користуються формулою

$$P(t_1 < t < t_2) = \frac{1}{2} [\Phi(x_2) - \Phi(x_1)] = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{t_2 - m_x}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - m_x}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right]. \quad (29)$$

Тут $\Phi(x)$ – інтеграл імовірності (інтеграл Лапласа) вигляду [26]

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (30)$$

Функція $\Phi(x)$ табульована і представлена в Додатку 1 (таблиця Д.1).

Якщо використовується центрована і нормована функція Лапласа $\Phi(z)$ (див. таблицю Д1) із заміною змінних $z = (t - m_x)/\sigma$, то розрахунок імовірності безвідмовної роботи в часі проводиться по формулі:

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - m_x}{\sigma}\right). \quad (31)$$

Логарифмічно-нормальний розподіл використовується при описі надійності металоконструкцій, відмов електромашинних підсилювачів, деяких типів електромашинних перетворювачів і так далі. Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(lt-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (32)$$

де μ – математичне очікування натурального логарифма випадкової величини за час t , означаючий напрацювання на відмову.

Розрахунок $P(t)$ при логарифмічно-нормальному розподілу здійснюється за допомогою спеціальних таблиць.

2.6. Модель «слабкої ланки»

Модель «слабкої ланки» знайшла широке вживання при дослідженні електричних машин на надійність, зокрема, при створенні моделей надійності тих або інших вузлів електричних машин [27, 28].

Прикладом використання даного методу є модель надійності статорів обмоток асинхронних двигунів, розроблена О.Д. Гольдбергом [1]. Модель «слабкої ланки» є системою з послідовним з'єднанням елементів, в якій при відмові одного елемента виходить з ладу весь ланцюг.

У найзагальнішому випадку проблема формулюється наступним чином: як визначити вірогідність безвідмовної роботи елемента, блоку, ланцюга або системи, коли прикладена напруга перевищує міцність. Принципової відмінності немає: чи розглядаються механічна напруга і міцність (при дослідженні механічних вузлів) або електрична напруга і діелектрична міцність (при дослідженні ізоляції обмоток електричних машин, комутації колектору і т. д.).

Введемо наступні позначення: $f(u)$ – щільність розподілу напруги u ; $f(U)$ щільність розподілу міцності (рис. 6). Якщо $U > u$ то руйнування матеріалу не станеться. Імовірність безвідмовної роботи елемента запишеться так:

$$P_s = P(U > u). \quad (33)$$

Область перекриття кривих $f(U)$ і $f(u)$, показана штрихуванням на рис. 8, характеризується певною імовірністю відмови. Розглянемо невеликий інтервал du області перекриття. Імовірність того, що деяке значення напруги знаходиться в цьому інтервалі, дорівнює площі елемента du :

$$P\left(u^* - \frac{du}{2} \leq u \leq u^* + \frac{du}{2}\right) = f(u^*)du, \quad (34)$$

де u^* – значення напруги в середині інтервалу du .

Імовірність того, що міцність U перевищує деяке значення напруги u^* , записується вираженням

$$P(U > u^*) = \int_{u^*}^{\infty} f(U) dU. \quad (35)$$

Виразення для імовірності того, що значення напруги заключено в інтервалі du , а міцність U перевищує напругу, що задається цим інтервалом, записується як добуток імовірності, тобто

$$f(u^*) du \int_{u^*}^{\infty} f(U) dU. \quad (36)$$

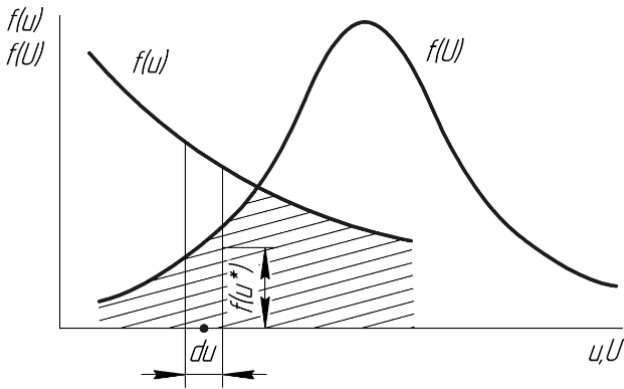


Рис. 8. Перекриття розподілу напруги $f(u)$ і міцності $f(U)$

В цьому випадку імовірність безвідмовної роботи – є імовірність того, що міцність U перевищує напругу u для всіх можливих значень напруги i , отже, записується так:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \left[\int_u^{\infty} f(U) dU \right] du. \quad (37)$$

Вираз (37) характеризує найбільш загальний випадок. Перейдемо до моделі «слабкої ланки» – системи з послідовно сполученими елементами. Як приклад візьмемо обмотку електричної машини, представлену у вигляді ланцюга з n ідентичних елементів. Ізоляція цієї обмотки піддається дії прикладеної напруги (вважаємо, що від-

мовою є пробій ізоляції). В цьому випадку елемент ланцюга, що має найменшу діелектричну міцність, вийде з строю першим, і ймовірність безвідмовної роботи системи буде записана так:

$$P_0 = \min P_i,$$

де P_i – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента

Отже, має місце ситуація, розглянута вище, а саме: що складається з n елементів, виходить зі строю, коли на одному з елементів прикладена напруга перевищує міцність. Ймовірність безвідмовної роботи будь-якого елемента визначиться по формулі (37) або, якщо взяти межі інтеграції від 0 до ∞ :

$$P_i = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(u)f(U)dUdu. \quad (38)$$

Вираз (38) може бути записаний з використанням інтегральної функції розподілу $F(U)$:

$$P_i = \int_0^{\infty} f(u)[1 - F(U)]du. \quad (39)$$

У тому випадку, коли ланцюг складається з n випадково вибраних елементів, це еквівалентно вибору випадкових значень міцності в сукупності з розподілом $f(U)$. Позначимо через U_n випадкову величину, що показує міцність ланцюга, що складається з n елементів, тоді $U_n = \min(U_i)$, де U_i – міцність i -го елемента. Відповідно до розподілу екстремальних значень, маємо $G(U_n) = 1 - [1 - F(U_n)]^n$, де $G(U_n)$ – функція розподілу міцності ланцюга.

Для цієї моделі «слабкої ланки» ймовірність безвідмовної роботи системи має вигляд: $P_n = P(U_n > u)$. Використовуючи вираз (39), можна записати:

$$P_n = \int_0^{\infty} f(u)[1 - F(U)]^n du. \quad (40)$$

Отримана остаточною формула є ймовірністю безвідмовної роботи всієї системи, записаною через число елементів n , щільність розподілу навантаження $f(u)$, що діє на систему і розподіл міцності $F(U)$.

2.7. Надійність основних вузлів електричних машин. Моделі надійності

2.7.1. Надійність колекторно-щіткового вузла і контактних кілець. Аналіз роботи колекторно-щіткового вузла

Працездатність і довговічність колекторного вузла визначається дією трьох груп основних чинників, пов'язаних з електромагнітними процесами, механічними діями і фізико-хімічною природою ковзаючого контакту.

До чинників електромагнітного характеру відносяться електромагнітні навантаження, напруга між суміжними пластинами, реактивна ЕРС, струмові перевантаження й ін.

Чинники механічної дії визначаються технологічними і конструктивними особливостями машини (ослаблення пресування, ексцентриситет і еліпсність колектору, рівень вібрації всієї машини або агрегату, частота обертання ротора).

Чинники фізико-хімічної природи ковзаючого контакту визначаються умовами струмозйому і станом довкілля (знос щіток і колектору, натиснення на щітку, матеріал колектору, температура, вологість, кислотність і запиленість довкілля). Слід згадати про утворення контактної плівки (політури) на поверхні колектору. Наявність плівки знижує швидкість його зносу і сприяє більш сприятливому розподілу струму під щітками. Волога, наявність в середовищі активних газів і особливо запиленість надають руйнівну дію на матеріал колектору. Крім того, велике число пошкоджень колекторів викликається тертям щіток об колектор і високою щільністю струмів під щітками при їх нещільному приляганні до колектору, що супроводжується значним підвищенням температури (місцевий перегрів окремих ділянок). В результаті цього настає термічна іонізація щіткових контактів. Розмикання і замикання контактних точок на поверхні колектору з утворенням малих електричних дуг приводять до руйнування поверхні колектору. Найбільш ефективними засобами зменшення зносу колектору є: поліпшення умов комутації машини шляхом правильного налаштування додаткових полюсів, підбір марки і розміру щіток для даної потужності і напруги машини, знижен-

ня окружної швидкості колектору і вибір оптимального тиску щітки на колектор. Істотним є також ретельне балансування якоря для зниження вібрацій на колекторі.

Дані експлуатації і експерименту показують, що знос колекторів при безперервній роботі машин знаходиться в межах 0,03 – 2 мм в рік.

Спільний аналіз фізичних чинників, що впливають на колекторний вузол, і статистичних даних, отримуваних в результаті випробувань, експериментів і експлуатації машин постійного струму дозволяє вирішувати завдання створення математичних моделей надійності колекторно-щіткового вузла машин постійного струму (МПС).

Моделі надійності колекторно-щіткового вузла. Математична модель надійності – це певний математичний вираз, що зв'язує значення фізичних параметрів системи, навантажень, що діють, і вимоги імовірності безвідмовної роботи системи або інших показників надійності.

Будь-яка математична модель відображає лише міру нашого пізнання реального механізму функціонування системи і є лише деяким наближенням до досліджуваного об'єкту. Процес розробки математичної моделі полягає не тільки в теоретичній розробці якої-небудь гіпотези, але і в постійній перевірці відповідності прийнятої гіпотези і наявних статистичних даних, що отримують в результаті дослідів [17, 19].

При побудові математичних моделей надійності широко використовуються методи теорії вірогідності і математичної статистики. Спочатку вирішується завдання за визначенням закону розподілу відмов. З цією метою будуються гістограми розподілу, і робиться припущення про закон розподілу. Подальша перевірка відповідності теоретичного і експериментального розподілу дозволяє уточнити закон розподілу. Так, встановлено, що для більшості машин знос щіток описується з достатньою мірою точності нормальним або логарифмічно-нормальним законами. Надалі отримані залежності використовуються для оцінки надійності, як випробовуваних машин, так і для знов проєктованих. При скорочених за часом випробуваннях закон розподілу дозволяє оцінити надійність за будь-який час.

В деяких випадках надійність колекторно-щіткового вузла визначається лише зносом колектору.

$$\alpha = 8,73 \cdot 10^{-2} \frac{n}{l_u L_p} \tau_o^2, \quad (40)$$

де n – частота обертання якоря (об/хв);

l_u – збігаючого краю щіток;

τ_o – тривалість горіння іскрових розрядів між щіткою і колекторною пластиною (мкс);

L_p – індуктивність контуру, що розривається (Гн).

На швидкість зносу колекторів впливає велика кількість різно-рідних за своєю природою випадкових чинників, тому розподіл α (40) вважається нормальним. Використовуючи закон нормального розподілу величини зносу, визначають імовірність безвідмовної роботи колектору у функції часу і рівня іскріння. Напрацювання окремих машин до відмови досягало більше 25000 год., причому виявлена залежність терміну служби від температури, окружної швидкості, вібрації і марки вживаних щіток.

Інструментом при побудові моделей надійності як колекторних, так і інших вузлів електричних машин є використання методів теорії планування експерименту. При використанні цього методу об'єкт піддається дії певних чинників і фіксується реакція об'єкту на дану дію. Після математичної обробки результатів отримуємо модель надійності досліджуваного вузла машини (зазвичай у вигляді поліномів). За допомогою методів теорії планування експериментів було визначено час безвідмовної роботи (t_p) колекторного вузла в електромашинних перетворювачах при зміні температури Θ (°C), вібрації (подвійна амплітуда вібрації – 2A) і частоти обертання ротора n . Для здобуття цієї залежності був проведений дробовий факторний експеримент типу 2^{3-1} . Інтервали варіювання чинників наступні: температура мінялася від 20 до 100°C, вібрація – від 20 до 80 мкм, частота обертання – від 3000 до 4000 об/хв. За нижній рівень діапазону варіювання узяті параметри номінального режиму. В результаті обробки результатів отримана інтерполяційне співвідношення:

$$t_p = 71410 - 162Q - 223(2A) - 12n . \quad (41)$$

Реалізація експерименту і подальша обробка дозволяє отримати поліном

$$z = kJj \left(\frac{u}{100}\right)^\xi \left(\frac{n}{1000}\right)^\gamma \sigma^\alpha \delta^i \beta^m, \quad (42)$$

де z – рівень іскріння, виміряний методом додаткової щітки, В;

J – струм, А;

u – напруга живлення, В;

n – частота обертання, об/хв;

σ – середньоквадратичне відхилення перепадів між колекторними пластинами, мкм;

δ – биття колектору, мкм;

β – здвиг осі щіток з геометричної нейтралі;

k, j, ξ, α, i, m – коефіцієнти, залежні від конструкції і технології виготовлення колектору.

Закон розподілу відмов щіток нормальний, тому:

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - m_x}{\sigma}\right). \quad (43)$$

При розрахунку надійності величину m_x можна прийняти рівному найбільшому напрацюванню t_{max} електрощітки до граничного стану. Величину середньоквадратичного відхилення σ в у практичних розрахунках можна прийняти приблизно рівною $(0,2 \div 0,3)t$, де t – час, для якого визначається вірогідність безвідмовної роботи.

Критерії працездатності і критерії відмови колекторно-щіткового вузла. При побудові моделей надійності колекторно-щіткового вузла, а також при перевірці їх адекватності найважливішим етапом є випробування на надійність. Оцінка стану вузла при випробуваннях на надійність виробляється за допомогою критеріїв працездатності й відмов. До критеріїв працездатності відносяться: іскріння, биття, знос щіток, знос і температура колектору, ширина безіскрової зони, перехідний опір щіткового контакту, падіння напруги і величина небалансної ЕРС. До критеріїв відмови відносяться перевищення рівня іскріння вище допустимого, швидкість або величина зносу щіток, знос колектору вищий за допустиме значення, підвищення температури колектору над допустимим рівнем,

стабільність перехідного опору щіткового контакту і перевищення биття колектору вище допустимого.

Численні дослідження дозволяють зробити висновок, що найбільш загальними критеріями оцінки якості роботи колекторного вузла є середньоквадратичне відхилення перепадів рівнів колекторних пластин і рівень іскріння (на практиці зазвичай використовуються показники: биття і іскріння). Причому, якщо перший критерій включає в основному причини механічного характеру, то другий є найбільш загальним і включає в себе всі три види причин (електромагнітні, механічні, фізико-хімічні), що обумовлюють комутаційний процес. Метод оцінки якості комутації по рівню іскріння офіційно прийнятий ДСТУ 2848-94.

Розрахунок надійності щіткового вузла. Електрощітка – елемент невідновний, і її надійність оцінюється вірогідністю безвідмовної роботи. Час безвідмовної роботи електрощітки складає:

$$t = (h - h_{np}) / v_{щ},$$

де h і h_{np} – первинна і гранично допустима висота електрощітки, мм;
 $v_{щ}$ – швидкість зносу щітки, мм/год.

Швидкість зносу електрощітки $v_{щ}$ залежить від великого числа різномірних чинників (тиск на щітку, окружна швидкість, щільність струму, конструкція і матеріал колектору і т. д.) і є випадковою величиною. Багатолітні систематичні спостереження за роботою електрощіток показали, що розподіл значень швидкості їх зносу підкоряється нормальному закону. В результаті випробувань (прискорених або в нормальних умовах) можна визначити середньостатистичні показники вибіркового характеру електричних характеристик електрощіток:

$$v_{щ}^{-*} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{щi}; \quad (44)$$

$$\sigma_{щ}^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{щi} - \overline{v_{щ}})^2}{(n-1)}}, \quad (45)$$

де $v_{щ}^*$ – оцінка математичного очікування швидкості зносу електрощітки;

$\sigma_{\text{ш}}^*$ – оцінка середньоквадратичного відхилення;
 n – число електрощіток.

Імовірність безвідмовної роботи за час t :

$$P(t) = 1 - Q(t). \quad (46)$$

Імовірність відмови за час t :

$$Q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (47)$$

визначає імовірність безвідмовної роботи щітки:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 0,5 - \Phi[(t_1 - \bar{T}) / \sigma]. \quad (48)$$

Якщо дана машина постійного струму відноситься до класу машин, в яких надійність колекторно-щіткового вузла визначається в основному надійністю щіткового апарату, то

$$P_k(t) = P_{\text{щ.а.}}(t), \quad (49)$$

де $P_k(t)$ і $P_{\text{щ.а.}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи колекторно-щіткового вузла і щіткового апарату відповідно.

На електричній машині встановлене N щіток однієї марки. Якщо вихід навіть однієї щітки призводить до відмови всього щіткового апарату, то надійність щіткового апарату визначається як

$$P_{\text{щ.а.}}(t) = [P(t)]^N. \quad (50)$$

Якщо допустиме число відмов електрощіток в комплекті рівне n_1 , то вірогідність події (а, значить, і вірогідність безвідмовної роботи щіткового апарату), що при N випробуваннях зустрічається не більш за n_1 відмови, визначається відповідно до формули Бернуллі:

$$P_{\text{щ.а.}}(t) = P_{n_1 N} = \sum_{k=0}^{n_1} C_N^k P(t)^{N-k} [1 - P(t)]^k, \quad (51)$$

де $C_N^k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$.

Таким чином, розглядаючи комплект електрощіток в машині як вибірку об'ємом N генеральної сукупності, яка характеризується надійністю $P(t)$, можна розрахувати імовірність безвідмовної роботи щіткового апарату.

Надійність контактних кілець. Характерною відмовою для контактних кілець є утворення під дією нагріву плям на їх робочій поверхні, кілець, що складаються з оксидів металу. Це призводить до підвищеного зносу контактних кілець, місцевого іскріння і передчасного виходу з ладу контактного вузла, що вимагає після цього проточки і шліфовки кілець.

Важливим показником роботи контактного вузла є перегрів контактних кілець, допустимий рівень якого залежить від матеріалу кілець. Так, при виконанні контактних кілець з мідь-срібла і сталі 1Х18Н9Т їх перегрів обмежується величиною 180°C, при перевищенні якого кільця піддаються окисленню. При використанні мідь-кадмію, міді МІ і БРАЖ-МЦ (марка безолов'яної бронзи) або латуні їх перегрів не повинен перевищувати відповідно 130, 100 і 80°C через схильність до ерозії, окислення і полярного ефекту (величина перехідної напруги на негативному кільці в 5 разів більше, ніж на позитивному).

При нормальному стані поверхні контактних кілець і номінальному тиску на щітку помітного іскріння в перехідному контакті не спостерігається. Іскріння виникає, як правило, в разі аварійного стану контактних кілець (порушено кріплення щіток, значного зношення підшипників, що призводить до ексцентричного обертання кілець, незадовільне натиснення щіток, забруднення контакту і ін.), і тому рівень іскріння більш ніж один бал вже може бути прийнятий як критерій відмови контактного вузла.

Температура контактних кілець також є критерієм відмови. Перевищення температури вище припустимих значень свідчить про відмову контактного вузла. Вимір температури здійснюється зазвичай способом потенціометра.

Доцільно також за критерій працездатності струмозійному контактних кілець узяти сумарну площу оксидів, що з'являються на контактних кільцях як плюсової, так і мінусової полярності. Цей критерій щонайкраще оцінює фізико-хімічні явища в перехідному контакті. Методи виміру площі плям оксидів нескладні і не потребують спеціального пояснення.

2.7.2. Надійність підшипникових вузлів електричних машин

Ненормальна робота підшипникового вузла виявляється по надмірному підвищенню температури, шуму, витоку мастила, підвищеному опору при обертанні і збільшенню моменту рухання. Причини, що призводять до цього, досить різноманітні як по своїй фізичній природі, так і по мірі їх впливу на кінцевий результат. Розглянемо умови роботи підшипників і підшипникових вузлів, чинники, що впливають на їх працездатність, а також шляхи підвищення надійності.

Фізико-хімічні властивості поверхневого шару металу залежать від величини контактної напруги, робочої температури, залишкової напруги, мікротвердості, міри пластичної деформації металу в поверхневому шарі. Контактуючі деталі підшипників сприймають значні питомі тиски при розвитку значних температур і виникненні пластичних деформацій металу в поверхневих шарах, фізико-хімічні процеси, що протікають у зовнішніх шарах і пов'язані з взаємодією металу робочої поверхні з оксидними плівками, мастилом або газовим середовищем в умовах високих тисків і температур у зоні контакту.

Характерно, що навантаження, яке допускається підшипником, при нерухомому стані нижче, ніж при обертанні, оскільки сліди взаємного втискування деталей можуть заважати подальшій роботі підшипників. Залишкові ж деформації, що утворюються при обертанні кільця, зазвичай наводять лише до збільшення зазору і мало змінюють умови роботи деталей підшипників. На зносостійкість і довговічність деталей підшипників впливають структурні особливості металу, хімічна комбінація матеріалу і мастила, корозія, теплова дія, стан поверхневого шару і механічні навантаження на поверхні і в тілі кочення.

Переважаючим виглядом зносу підшипника, викликаного контактною втомою робочих поверхонь, є викришування з них металу у вигляді дрібних точок, а також відшаровування частинок металу. Найбільше практичне підтвердження отримала наступна гіпотеза, що пояснює природу цього явища.

Під дією розтягуючої напруги на робочій поверхні утворюються тріщини, після чого настає утомне викришування через розклинювання утворених тріщин мастилом.

При використанні мастила з високою в'язкістю процес утомного викришування сповільнюється. Окрім вказаного існують ще два види зносу – абразивний і корозійний [15, 30].

Абразивний знос виникає через наявність в зоні контакту сторонніх часток. Такий знос виникає, наприклад, в незахищених підшипникових вузлах або під дією пульсуючих поштовхів тіл кочення і їх автоколивань в межах існуючих зазорів, наприклад, знос гнізд сепараторів.

Знос в результаті корозії. В результаті дії корозії – самостійного або у поєднанні з тертям – поверхні набувають шорсткості. Існує так зване помилкове бринелювання кілець тілами кочення, яке представляє собою контактно-корозійний процес, що поєднується з місцевими абразивними ефектами і що характеризується виникненням лунок з кроком, що відповідає відстані між тілами кочення. Лунки виникають в результаті пульсуючого контакту без обертання підшипника або при періодичному зсуві його на дуже малий кут. В умовах того, що виникає у вузьких щілиновидних зазорах між тілами кочення і кільцями ефекту корозії під впливом відгону мастила при інтенсивних коливаннях (такий ефект має ще найменування «фретинг-корозія») відбувається швидке окислення металу з утворенням часток оксидів, що абразивно діють в зоні контакту. Таке явище спостерігається при роботі підшипників в умовах вібрації, перекосів і частих поштовхів.

Аварійні поломки підшипників виникають під дією перевантажень, перекосів і грубих технологічних дефектів виготовлення. Проходження електричного струму через підшипники (так званих підшипникових струмів) часто наводить до їх заклинювання.

Вібрація підшипникових вузлів. У електричних машинах найбільше застосування знаходять підшипники кочення, які за формою тіл кочення можуть бути кулькові і роликові. Останні, у свою чергу, залежно від форми роликів розділяють на групи: з короткими та довгими циліндричними, з бочкообразними симетричними та несиметричними, з голчастими, з конічними, з витими. За точністю підшипники розділяють на класи, що позначають цифрами порядку

росту точності, як наприклад для кулькових радіальних і радіально-упорних та роликкових радіальних, а саме: 8, 7, нормальний, 6, 5, 4, Т, 2. Точність підшипників кочення в основному характеризується точністю геометричних розмірів деталей, точністю взаємного розміщення поверхонь деталей і точністю обертання. Зі зростанням класу точності вартість підшипника значно збільшується. Залежно від спеціальних вимог до рівня вібрації, моменту тертя та ін. підшипники розділяють на категорії – А, В, С. Точність виготовлення підшипника визначає його функціональні можливості і ресурс. Найбільшого поширення в загальному машинобудуванні набули підшипники нормального класу точності категорії С без спеціальних вимог.

Згідно Єдиної системи допусків і посадок (ЄСДП, ДСТУ 2500-94) передбачені поля допусків для посадочних місць валів і отворів підшипників кочення загального призначення. Поля допусків (якості) забезпечують по внутрішньому і зовнішньому діаметрах підшипника посадки із зазором, перехідні посадки, посадки з натягом, призначення яких залежить від типу, розмірів і класу точності підшипників, від величини, напряму і характеру вантаження підшипника, від режиму роботи вузла й інших умов експлуатації. Значення жорсткості посадочних поверхонь валів і корпусів, відхилення від правильної геометричної форми, що допускаються, і биття заплечиків обмежені встановленими значеннями.

Практика показує, що підшипники кочення є найбільш інтенсивними джерелами вібрації в багатьох типах машин і особливо в швидкохідних [16, 28]. Механічна вібрація є рухом тіла відносно положення рівноваги в просторі. Коливання, що генеруються електричними машинами, доцільно розглядати в діапазонах низьких, середніх і високих частот. Найбільш вірогідними причинами низькочастотних коливань (від 0 до 300 Гц) є ексцентриситет, невірноваженість мас, що обертаються, недосконалість підшипників кочення.

Вібрація підшипників. Виготовлення деталей підшипників пов'язане з наявністю відхилень геометричних форм і розмірів в межах допусків, що нормуються відповідними Державними стандартами України. Ці відхилення обумовлюють вібрацію, а, отже, і знос підшипникового вузла. Найбільш істотними джерелами вібрації є: радіальне осьове биття кілець, овальність, граність і конусність,

різномірність кульок, допуски в гніздах сепараторів, хвилястість і шорсткість доріжок кочення, овальність і граність кульок.

Радіальне биття зовнішніх кілець порушує співвісність в підшипникових вузлах. Бічне биття торців внутрішніх і зовнішніх кілець викликане їх непаралельністю, яка призводить до перекосу внутрішнього кільця відносно зовнішнього.

Овальність кілець є причиною вібрації з частотою (Гц), рівною подвійній частоті обертання машини (об/с):

$$f=2n. \quad (52)$$

Частота вібрацій, що збуджується різномірністю кульок, залежить від швидкості обертання сепараторів і конкретного розподілу різномірних кульок в підшипнику. При рівномірному чергуванні в підшипнику кульок великого і малого розміру ця частота (Гц):

$$f = \frac{r_1 z n}{(r_1 + r_2) 2}, \quad (53)$$

де r_1, r_2 – радіуси доріжок кочення відповідно внутрішнього і зовнішнього кілець;
 z – число тіл кочення.

Овальність і граність тіл кочення залежать від класу точності підшипників. Частота вібрації (Гц), викликана граністю тіл кочення:

$$f = (1 - d_{u.o.}^2) z k_1 n / d_{u.o.}, \quad (54)$$

де $d_{u.o.} = d_u / D_0$ – відносний діаметр тіл кочення;
 D_0 – діаметр кола по центрах тіл кочення;
 d_u – діаметр тіл кочення;
 k_1 – число граней.

Надмірно великі зазори в гніздах сепараторів призводять до зсуву сепараторів на величину зазору і появи вібрації з частотою (Гц):

$$f = (1 - d_{u.o.}) n / 2. \quad (55)$$

Вібрація з такою ж частотою виникає із-за невірноваженості сепаратора. Малі зазори можуть бути причиною заїдання кульок і

порушення кінематики обертання підшипника, що є причиною підвищеного шуму.

Динамічні імпульси, що виникають в підшипникових вузлах, від хвилястості не мають періодичного характеру. Частота і спектр вібрацій, обумовлених цими причинами, – нестабільні. Складові цього спектру лежать переважно в області високих частот. Рекомендується стосовно доріжок кочення кулькових підшипників хвилястостю рахувати поглиблення, що перевищують по висоті 0,1 мкм і довжиною, сумірною з радіусом кульок.

Частота (Гц) вібрацій, обумовлена хвилястістю:

$$f \approx m(1 \pm d_{u.o.})n / 2, \quad (56)$$

де m – число хвилястостей по колу доріжок кочення внутрішнього (–) або зовнішнього (+) кільця.

Шорсткість поверхонь кочення має менше значення у бринелюванні підшипників через малу відстань між окремими виступами в порівнянні з радіусом кульок.

Окрім вказаних причин можливі локальні дефекти на доріжках кочення. До таких дефектів належить місцеве бринелювання доріжок кочення при транспортуванні машин залізницею. Частота (Гц) вібрації, що обумовлена цим явищем:

$$f = z(1 \pm d_{u.o.})k_2n / 2, \quad (57)$$

де k_2 – число дефектів на доріжках кочення.

Знак « - » приймається за наявності дефектів на зовнішньому кільці.

Вібрація підшипників збуджується також періодичними змінами жорсткості підшипника при перекочуванні тіл кочення. Частота (Гц) цієї вібрації:

$$f = z(1 - d_{u.o.})n / 2. \quad (58)$$

На рівень вібрації з цією частотою окрім жорсткості кілець впливають радіальний зазор і величина навантаження на підшипник.

Всі вказані частоти можна виявити в спектрі вібрації машини, знімаючи його на зовнішніх кільцях підшипників.

Критерії працездатності підшипникових вузлів. Основними критеріями працездатності підшипників кочення є: момент тертя, температура зовнішнього кільця, загальний рівень вібрацій, віброспектр підшипникового вузла, хімічний склад мастила.

Підвищений момент тертя викликає розігрівання деталей підшипникового вузла, тому збільшення температури зовнішнього кільця понад допустиме значення свідчить про несправності підшипника. Критерієм відмови зазвичай є підвищення температури на 15-20°C за 10-15 год. роботи машини. Підвищення загального рівня вібрації на 15% від первинного значення в номінальному режимі роботи також є критерієм відмови підшипникового вузла. Розрахувавши значення так званих інформативних частот по формулах (52) – (58) і визначивши спектр вібрації підшипникового вузла, можна не лише судити про його працездатність, але і виявити характер пошкоджень. Підвищення амплітуди вібрації на будь-якій з інформативних частот свідчить про вихід або швидкий вихід підшипника з ладу, а також указує на причину вібрації, яка викликає цю інформативну частоту.

Тут слід зазначити, що зниження вібрації підшипникових вузлів і всієї електричної машини може бути досягнуте установкою підшипників ковзання.

Зміна хімічного складу мастила призводить до зміни в'язкості, а, значить, погіршує умови обертання. Близько 95% електричних машин в країні змащують пластичними змащувальними матеріалами. Потужні електромашини (вище 100 кВт) з підшипниками ковзання зазвичай змащують маслами, проте таке розмежування умовне. Досить широко пластичні мастила використовують і в підшипниках машин потужністю 300 і навіть 500 кВт.

Швидкісний чинник для підшипників електричних машин складає 50-400 тис. мм об/хв. При безперервній роботі машин необхідно, аби мастило замінялось через 8-10 тис. год. Сучасні пластичні мастила (ВНПНП-242, ВНПНП-288) зберігають працездатність підшипників електричних машин протягом 5-10 років. Однією з найвідоміших є синє мастило для підшипників ВНПНП-246. Воно виглядає як досить м'яка мазь. Його особливістю є велика межа робочих температур: від -80 до +200 градусів. Синє мастило для підшипників використовують для малонавантажених деталей

швидкісних кочення, в електродвигунах, механізми зубчастих передач, що працюють в умовах широкого температурного розбігу або вакуумі. Однак це дорогий продукт. Існують інші, більш дешеві варіанти подібних речовин. В такому ж діапазоні температур застосовують темно-фіолетову мазь ВНШП-235. Але для повного вакууму вона не підходить. Застосовується цей продукт в низькошвидкісних підшипниках кочення, системах управління літаками.

Вибір оптимального мастильного матеріалу з метою мінімізації тертя та зношування на цей час пропонується виконувати з урахуванням визначення ймовірності реалізації гідродинамічного режиму змащування, при якому знос контактуючих поверхонь практично виключений, а тертя мінімальне. Для цього використовують параметр відносної товщини мастильної плівки.

Основи розрахунку довговічності підшипників. В даний час розрахунок підшипників на довговічність базується на втомній міцності деталей [15, 29]. Втомна витривалість металу визначається експериментальним шляхом.

Характеристика залежності механічної напруги σ від числа циклів навантаження N графічно представляється у вигляді кривої втоми, званою кривою Велера (рис. 9) і знімається таким чином. Металева деталь піддається впливу різної циклічної напруги і фіксується число циклів навантаження σ , при якому руйнування деталі не настає теоретично ніколи.

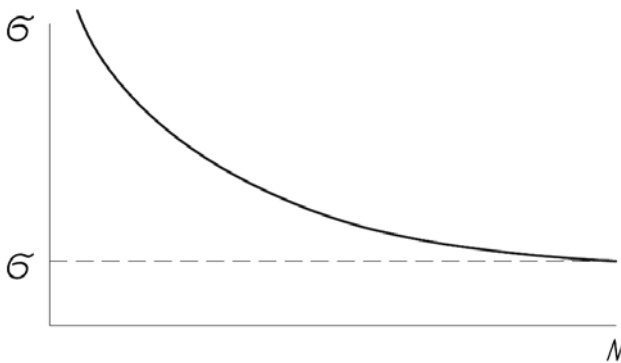


Рис. 9. Крива Велера

При розрахунку підшипників кочення визначають їх типорозміри при заданих термінах служби, навантаженні і частоті обертання. Найбільше радіальне навантаження (Н) на підшипник:

$$R = (G + T_0)b / l + F_n k_0, \quad (59)$$

де G – тяжіння осердя ротора з обіймою і ділянкою валу по довжині осердя, Н;

T_0 – сила однобічного магнітного тяжіння, Н;

F_n – поперечна сила від передачі, Н;

k_0 – коефіцієнт, залежний від розташування підшипника ($k_0 = (l+c)/l$ – для підшипника виступаючого кінця валу,

$k_0 = c/l$ – для підшипника, встановленого з протилежного боку валу);

b – відстань від точки додатка сил тяжіння і однобічного магнітного тяжіння до опори виступаючого кінця валу;

l – відстань між опорами;

c – відстань від опори виступаючого кінця валу до точки додатка сили F_n .

Величини G , T_0 і F_n визначаються з виразів:

$$\begin{aligned} G &= (a_2 D_{n2}^2 l_2 + 60 D_{\kappa}^2 l_{\kappa}) \cdot 10^{-6}; \\ T_0 &= 0,15 D_{n2} l_2 e_0 / \delta; \\ F_n &= (k_n M_2 / r) \cdot 10^3, \end{aligned} \quad (60)$$

де a_2 – коефіцієнт, залежний від типу машини (для синхронної машини $a_2 = 61$, для асинхронної і постійного струму – 64);

D_{n2} – зовнішній діаметр осердя ротора або якоря, мм;

l_2 – довжина осердя ротора або якоря без радіальних вентиляційних каналів, мм;

$D_{\kappa} l_{\kappa}$ – зовнішній діаметр і довжина колектору, мм;

e_0 – величина зсуву осердя, мм;

δ – величина повітряного зазору, мм;

k_n – коефіцієнт, залежний від виду механічної передачі (при використанні пружної муфти $k_n = 0,3$, при використанні клинового ремня – 1,8);

M_2 – номінальний момент обертання машини, Н·м;

R – радіус кола розташування пальців пружної муфти або кола шківа, мм.

Динамічне приведенне навантаження (Н) для однорядного радіального кулькового підшипника:

$$Q = k_{\sigma}R \text{ при } A/R \leq e; \quad (61a)$$

$$Q = k_{\sigma}(0,56R + YA) \text{ при } A/R > e; \quad (61б)$$

для радіального роликотпідшипника з короткими циліндричними роликотами – по (61), для радіально-наполегливого здвоеного кулькового підшипника:

$$Q = k_{\sigma}(R + 0,92A) \text{ при } A/R \leq 0,68;$$

$$Q = k_{\sigma}(0,67R + 1,41A) \text{ при } A/R > 0,68;$$

де k_{σ} – коефіцієнт, що враховує характер навантаження машини (при режимі роботи з помірними поштовхами і короткочасним перевантаженням до 150% від номінального навантаження до $k_{\sigma} = 1,5$);

A – аксіальне навантаження, Н;

Y – коефіцієнт приведення аксіального навантаження до радіального.

Значення e і Y однорядних радіальних підшипників в залежності від A/C_0 (де C_0 – статична вантажопідйомність (Н) прийнятого типу підшипника, яка береться з відповідних ДСТУ визначають за даними таблиці 3.

Таблиця 3

Залежності e і Y від A/C_0

A/C_0	0,014	0,028	0,056	0,084	0,11	0,17	0,28	0,42	0,56
e	0,19	0,22	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44
Y	2,30	1,99	1,71	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1,00

Для проміжних значень A/C_0 застосовують лінійну інтерполяцію. При $A/C_0 < 0,19$ приведенне навантаження $Q=R$. При відсутності аксіального навантаження і горизонтальному розташуванні валу осьове магнітне тяжіння в розрахунку не береться до уваги, а при вертикальному розташуванні валу:

$$A = 1,15G + F_c + 0,1R,$$

де $F_c = 9,81 m/2$ – сила тяжіння сполучного пристрою (пружної напівмуфти або шків), Н;

m – маса пружної муфти або шків, кг.

Необхідна динамічна вантажопідйомність (Н) кулькового підшипника:

$$C = (Q / 25,6) \sqrt[3]{L \cdot n}, \quad (62a)$$

роликотидшипника:

$$C = (Q / 18,5)(L \cdot n)^{0,3}, \quad (62b)$$

де L – розрахунковий термін служби підшипника, г (зазвичай приймають 12000 год);

n – найбільша робоча частота обертання машини, об/хв.

З довідників або відповідних для кожного типу, згідно існуючих ДСТУ, вибирають підшипник відповідної серії, в якого внутрішній діаметр дорівнює діаметру шийки валу, а динамічна вантажопідйомність – не менше значень, обчислених по формулах (62a, б).

Використовуючи в основі розрахунку довговічності функцію Вейбулла, яка з найбільшим наближенням апроксимує закон розподілу довговічності підшипників, можна записати:

$$B = e^{-(1/A)^r}, \quad (63)$$

де B – доля із загального числа підшипників, для яких забезпечується задана довговічність; A ,

r – параметри закону, які залежать від відношення середньої довговічності h_{cp} до гарантованої $h_{г}$.

Встановлено, що для більшості типів підшипників відхилення $h_{cp}/h_{г} = 4,08$, виходячи з чого

$$A_{4,08} = 5,35d/h; r_{4,08} = 1,34,$$

де h – необхідний ресурс, протягом якого гарантується безаварійна робота;

d – умовна розрахункова довговічність.

Рівняння Вейбулла в цьому випадку набирає вигляду:

$$B = e^{(-h/5,35d)^{1,34}}, \quad (64)$$

На основі залежності (64) розроблена методика розрахунку довговічності підшипників з жорсткими вимогами до гарантії довговічності. Ця методика найточніше відображає закономірність контактного зносу однорядних радіальних кулькових підшипників [4, 5].

Розглянемо ще один метод визначення надійності підшипникових вузлів електричних машин. Тут з врахуванням різних причин відмов надійність оцінюється імовірністю безвідмовної роботи також за допомогою розподілу Вейбулла:

$$\begin{aligned} P(t) &= e^{-\left(\frac{t-a}{b}\right)^k} \quad \text{при } t > a; \\ P(t) &= 1 \quad \text{при } t \leq a, \end{aligned} \quad (65)$$

де параметр здвигу a характеризує зону, в якій імовірність відмови практично дорівнює нулю.

В деяких випадках показник виявляється близьким до одиниці, що відповідає постійній інтенсивності відмов. Параметри a , b , k знаходяться експериментальним шляхом за формулами:

$$\begin{aligned} a^* &= (nT_{cp} - T_p) / (n - 1); \\ b^* &= n(T_p - T_{cp}) / (n - 1), \end{aligned}$$

де a^* , b^* – оцінки параметрів a и b ;

n – об'єм вибірки;

T_{cp} – напрацювання до першої відмови;

T_p – середній ресурс.

Зауважимо, що останнім часом з розвитком математичних методів і теорії експерименту як моделі надійності підшипникових вузлів електричних машин все частіше використовуються інтерполяційні поліноміальні моделі, отримані реалізацією факторних експериментів. Використовуються подібні моделі як для режимів роботи в нормальних умовах, так і у форсованих режимах.

2.7.3. Надійність ізоляції обмоток електричних машин

В процесі експлуатації ізоляція часто працює в тяжких умовах зовнішніх дій. Руйнування ізоляції відбувається в результаті нагріву, механічних зусиль (вібрація, тиск, удари і т. д.), впливу вологи, агресивних середовищ і інших факторів. У високовольтних машинах істотне значення має дію електричного поля. Поступове руйнування ізоляції в експлуатаційних умовах або під час випробувань зазвичай завершується пробоем.

Електрична міцність діелектриків. Основним критерієм працездатності ізоляції є пробивна напруга $U_{пр}$. Розрізняють три основні форми пробою твердих однорідних діелектриків: тепловий, електричний і іонізаційний. Тепловий пробій діелектрика відбувається, коли порушується стаціонарний тепловий стан. В цьому випадку тепловиділення перевищує тепловіддачу, відбувається недопустимо високе розігрівання діелектрика і настає теплове руйнування матеріалу.

Пробивна напруга при тепловому пробіі пов'язана з рядом чинників: частотою поля, умовами охолодження, температурою довкілля і ін. Крім того, напруга теплового пробою залежить від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики мають нижчі значення пробивної напруги при тепловому пробіі, ніж неорганічні, унаслідок їх малої нагрівостійкості.

Електричний пробій розглядають за наступних умов. У діелектрику унеможливлено, провідність p і діелектричні втрати $tg\delta$ малі; матеріал діелектрика хімічно стабільний, відсутня іонізація газових включень. Таким чином, електричний пробій характеризує речовина діелектрика, пов'язана з його структурою і мало залежить від зовнішніх умов. Електричний пробій відбувається в більшості випадків при напруженості електричного поля 10^6 - 10^7 В/см.

Іонізаційний пробій пов'язаний з іонізаційними процесами в газових включеннях ізоляції. При іонізації газового включення відбувається електронне і іонне бомбардування твердого діелектрика, дотичного з газовими включеннями. Через деякий час, якщо інтенсивність бомбардування достатня, настає пробій найближчого до газового включення шару твердого діелектрика. Розвиток цього процесу може призвести до повного або часткового пробою твердо-

го діелектрика. Іонізаційний пробій найбільш характерний для органічної ізоляції.

Залежність пробивної напруги від температури для дроту з ізоляцією на основі поліефірного лаку (ПЕТВ) представлена на рис. 10. На графіку можна виділити ділянки електричного (1) і теплового (2) пробію [5, 13, 14].

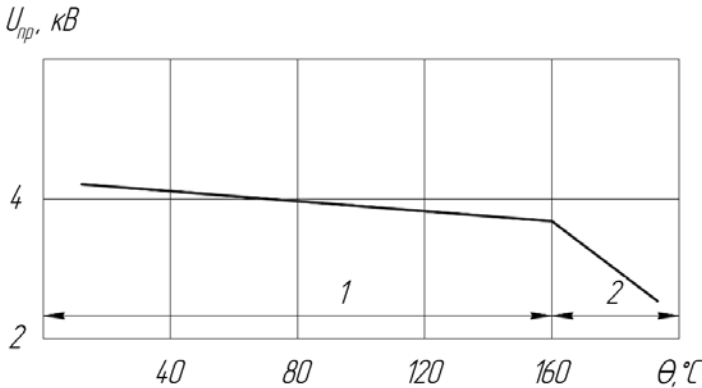


Рис. 10. Залежність пробивної напруги від температури для ізоляції ПЕТВ

Основи розрахунку довговічності ізоляції. Чинниками, що впливають на термін служби ізоляції електричних машин, є температура обмотки, дія електричного поля, механічні зусилля, а також вплив вологи, агресивних середовищ, запиленості і так далі. З перерахованих чинників у багатьох випадках домінує температура і, як наслідок – теплове старіння ізоляції. Це явище досліджене досить детально.

Під нагрівостійкістю розуміють здатність матеріалу без істотної зміни характеристик витримувати дію гранично допустимої для даного класу ізоляції температури протягом якогось періоду, відповідного до терміну служби машини.

Нагрівостійкість визначається швидкістю старіння ізоляції в умовах підвищених температур.

Перші роботи за визначенням терміну служби ізоляції належали, в основному, до ізоляції класу А. В результаті досліджень було сформульоване так зване «правило восьми градусів», згідно якого

перевищення температури на кожні вісім градусів понад гранично допустиме скорочує термін служби ізоляції удвічі. Аналітично це правило записується у вигляді рівняння:

$$\tau = T_0 e^{-0,0866\Theta}, \quad (66)$$

де τ – термін служби ізоляції при температурі Θ , роки;

Θ – температура нагріву ізоляції, °С;

T_0 – умовний термін служби ізоляції при $\Theta = 0$ ($T_0 = 6,225 \cdot 10^4$ років при $\tau = 7$ років і $\Theta = 105$ °С);

e – основа натурального логарифма.

Чим вище клас ізоляції, тим повільніше відбувається її старіння при даній температурі, тому для ізоляції класу B величина $\Delta\Theta$ складає 10 °С, для класу H – близько 12 °С.

Проте рівняння (66) отримане емпіричним шляхом, і ним можна користуватися лише при орієнтовних розрахунках. Строгий підхід до фізики процесів старіння ізоляції полягає в застосуванні до них загальних законів кінетики хімічних реакції. Вант Гоффом і Ареніусом було отримано рівняння (назване їх іменами), яке представляє постійну швидкість протікання реакції як величину, що визначає відносне число ефективних зіткнень часток, що завершуються хімічною взаємодією:

$$K = A e^{-E_a/(RQ)}. \quad (67)$$

На практиці для розрахунків важливо знати час τ , протягом якого ізоляція досягає свого граничного стану унаслідок старіння:

$$\begin{aligned} \ln\tau &= E_a / (RQ) - G; \\ G &= \ln A - \ln \ln(C_0 / C), \end{aligned} \quad (68)$$

де C_0 – початкова концентрація молекул;

C – концентрація молекул в даний момент;

A – коефіцієнт;

E_a – енергія активації Дж/моль;

$R = 8,317$ – універсальна газова постійна, Дж/(град-моль);

Q – абсолютна температура, К.

Якщо відомий термін служби ізоляції τ_1 при температурі Θ_1 , то можна визначити термін служби τ_2 при температурі Θ_2 за рівнянням:

$$\tau_2 = \tau_1 e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right)}. \quad (69)$$

Величини E_a , G и $B = -E_a/R$ для ізоляції різних класів визначені експериментально і приведені в довідкових таблицях, а залежності терміну служби обмотувальних дротів у функції від температури випробувань приведені також у спеціальній довідковій літературі. Слід зазначити, що такі залежності лише приблизно характеризують міру старіння ізоляції, оскільки враховують лише один чинник – температуру.

Старіння ізоляції під дією електричного поля спостерігається у високовольтних машинах з номінальною напругою від 6 кВ і вище. В процесі експлуатації ізоляція електричних машин тривалий час знаходиться під роботою напруги і періодично випробовує дію підвищених напруг при різних хвилових явищах і профілактичних випробуваннях. Вплив електричного поля на термін служби ізоляції досліджений доки недостатньо.

Для оцінки цього впливу можна користуватися експоненціальною залежністю:

$$\lg \tau = \lg A_e - m \lg E, \quad (70)$$

де E – напруженість електричного поля;

A_e , m – коефіцієнти, залежні від властивостей ізоляційного матеріалу.

Механічні і термомеханічні чинники, що впливають на ізоляцію, також значною мірою впливають на термін служби. Термомеханічні навантаження виникають в результаті періодичного нагріву і охолодження обмоток. Механічні навантаження є наслідком електродинамічних сил, що виникають в машині, неврівноваженості частин, що обертаються, магнітного тяжіння, відцентрових зусиль, ударів і поштовхів з боку приводу або приводного механізму. Перераховані зусилля зазвичай мають знакозмінний циклічний характер, причому найбільш типовою є вібрація з частотою близько 100 Гц.

При перехідних процесах амплітуди вібрацій збільшуються в десять разів унаслідок квадратичної залежності електродинамічних сил від струму.

Механічні характеристики ізоляції залежать від температури, а саме: при нагріванні межа міцності ізоляції швидко знижується і одночасно ізоляція стає більш еластичною.

Особливо це відноситься до ізоляційних конструкцій на основі термопластичних компаундів. Наприклад, межа міцності мікалентної ізоляції, що компаундує, при розтягуванні складає 3340 Н/см² при 20°C і відповідно 344 Н/см² при 100°C, тобто знижується майже в 10 разів. При зниженні температури така ізоляція стає крихкою. Механічні характеристики ізоляції на термореактивних єднальних стабільніші.

Експериментальні дані показують, що підвищена вібрація скорочує термін служби ізоляції у декілька разів. Старіння ізоляції низьковольтних машин, що працюють при помірних температурах, взагалі важко визначити з позиції теплових або електричних явищ. Тут найбільш істотними причинами, що призводять до руйнування ізоляції, є механічні навантаження і дія доквілля. У ізоляції, на яку впливають вібрацією, спостерігаються дефекти, близькі за своїм характером до змін в ізоляції зі значним напруженням; осцилограми електричного пробою ізоляції після вібраційного старіння і тривалої експлуатації аналогічні. Все це свідчить про прискорення процесу старіння ізоляції.

Розглянемо деякі аналітичні залежності. Якщо переважає процес продавлювання ізоляції, то можна скористатися рівнянням Р. Ходвінка для швидкості продавлювання плівки [5]:

$$\frac{dh}{dt} = F_1 \cdot \psi \cdot h^{F_2} \frac{k_f^n}{\theta_0^{F_3}}, \quad (71)$$

де h – двостороння товщина ізоляції дроту;

ψ – коефіцієнт текучості полімерного ізоляційного матеріалу;

θ_0 – площа опору провідників;

n – параметр, залежний від температури;

F_1, F_2, F_3 – функції від n ;

k_f – зусилля, що діє в місці контакту дротів.

Час, за який відбувається повне продавлювання, або довговічність τ , визначається так:

$$\tau = \frac{F_1}{\psi \cdot k_f^n}, \quad (72)$$

Аналітично термін служби ізоляції по адгезії визначається за рівнянням:

$$\tau = \tau_0 e^{U_0 - \gamma \sigma}, \quad (73)$$

де $\tau_0 = 10^{12} \div 10^{13} \text{ c}$ – константа;

U_0 – енергія активації руйнування адгезійного зв'язку, Дж/моль;

γ – величина, залежна від граничного шару полімеру, приліглого до субстрата, і товщини плівки;

σ – внутрішня напруга в полімері, МПа.

Серйозними чинниками, що впливають на термін служби ізоляції, є волога і хімічно агресивні середовища. Волога проникає в ізоляцію тоді, коли машина знаходиться в неробочому стані, особливо під час її охолодження. Малі в'язкості й інші властивості води сприяють проникненню в найдрібніші пори. Волога знижує опір ізоляції і її електричну міцність, створюючи тим самим передумови для появи в ізоляції струмів витоку, часткових розрядів і інших явищ, які збільшують вірогідність пробою. Просочення не завжди оберігає матеріал від зволоження (все залежить від її складу і технології), а лише зменшує швидкість поглинання вологи, оскільки просочувальні склади не проникають в мікроскопічні пори ізоляції, куди легко проникає вода.

Шкідливу дію на ізоляцію надає хімічно активні речовини, такі, як кислоти, луги і їх ангідриди, що знаходяться в довкіллі. Ізоляцію руйнують масла і пари розчинників. Пил, що міститься в повітрі, надає на ізоляцію абразивну дію і знижує опір ізоляції. При сильному забрудненні поверхні ізоляції у високовольтних машинах можливе виникнення поверхневого розряду.

Вплив на довговічність ізоляції температури, вологості й агресивних середовищ оцінюють по формулі:

$$\tau = A e^{B/T} C^{-m} \eta^{-n}, \quad (74)$$

де C – концентрація агресивного агента;

η – відносна вологість;

m, n – коефіцієнти.

Отже, вплив вологи і агресивних середовищ сприяє прискоренню і активізації процесів старіння і подальшого пробною ізоляції. В основі ж руйнування ізоляції лежать температурні і механічні дії.

При випробуванні електричних машин на надійність, а також при оцінці експлуатаційної надійності користуються критеріями працездатності. Основним критерієм працездатності ізоляції є пробивна напруга, яке характеризує стан найбільш "слабкої" ланки. Але визначення величини пробивної напруги пов'язане з руйнуванням ізоляції, тому необхідно використовувати такі критерії працездатності, які можна вимірювати, не руйнуючи електричну ізоляцію. До таких критеріїв відносяться: активний опір ізоляції і ємність, тангенс кута діелектричних втрат, амплітуда і частота імпульсів акустичної емісії, декремент загасання перехідного процесу в ізоляції, температура обмотки. Ці критерії характеризують загальний стан ізоляції.

Акустична емісія – це явище виникнення звукових хвиль при розтріскуванні будь-якого твердого матеріалу. За амплітудою імпульсів акустичної емісії можна судити про розміри дефектів в ізоляції, а за частотою – про їх число.

Якщо на ізоляцію на початку фази обмотки подати прямокутний імпульс напруги, то на виході можна заосцилографувати перехідний процес. Аналіз кривої загасання цього процесу дозволяє судити про всі складові повного опору ізоляції. Таким чином, загасання перехідного процесу в ізоляції є комплексним критерієм її працездатності.

Моделі надійності ізоляції обмоток електричних машин. Ізоляцію з точки зору надійності необхідно представити як систему, що складається з послідовно сполучених елементів. Кожен елемент у вихідному стані матиме деякий розподіл імовірності пробивної напруги, що залежить від вживаних матеріалів, технології і так далі. Експериментально дослідивши цей розподіл, можна оцінити вихідний стан елемента. В процесі експлуатації ізоляції під впливом зовнішніх чинників і навантажень розподіл імовірності пробивної напруги елемента змінюватиметься.

Прикладена до ізоляції напруга також має деякий розподіл імовірності, причому вочевидь, що воно практично не змінювати-

меться в процесі експлуатації. При зіставленні цих розподілів можна оцінити імовірність того, що приложена до ізоляції напруга перевищить пробивне, тобто оцінити імовірність відмови системи ізоляції в різні моменти часу. Це і буде бажана математична модель надійності ізоляції.

У вихідному стані елементи системи, як правило, мають досить високу пробивну напругу і імовірність безвідмовної роботи, розрахована по математичній моделі, близька до одиниці. Проте в результаті зносу електроізоляційних матеріалів при експлуатації пробивна напруга знижується і відповідно зменшується імовірність безвідмовної роботи системи ізоляції. Прогнозування цієї зміни – одне з основних завдань, що вирішуються при побудові математичної моделі.

Одним із шляхів розв'язання цієї задачі перебуває в експериментальному дослідженні залежності параметрів розподілу пробивної напруги від часу дії експлуатаційних факторів, яка може бути записана, наприклад, у вигляді полінома. Знаючи цю формулу, можна визначити параметри розподілу пробивної напруги у будь-який момент часу, а значить, за допомогою математичної моделі розрахувати вірогідність безвідмовної роботи. Цей шлях може бути застосований в тих випадках, коли є можливість накопити достатній експериментальний матеріал шляхом проведення недорогих масових випробувань на натурних зразках, причому умови експлуатації можуть бути відносно легко і досить повно відтворені експериментально. Реалізація такого шляху для велико-габаритних, дорогих виробів, які експлуатуються в складних, умовах, утруднена і вимагає пошуку інших шляхів рішення задачі.

В даний час не існує єдиної математичної моделі надійності ізоляції електричних машин, а розроблені і використовуються на практиці моделі надійності конкретних електричних машин і вузлів.

Найбільш поширені і достовірні моделі надійності машин змінного струму.

Математична модель надійності міжвиткової ізоляції всипних обмоток асинхронних двигунів. Модель розроблена О.Д. Гольдбергом [1] і лягла в основу ряду галузевих стандартів і керівних технічних матеріалів, що діють в електропромисловості. Елементами моделі є два витки, розташовані поруч і розділені міжвитковою ізоляцією з просоченим складом. Для безвідмовної роботи обмотки

необхідна справність всіх складових її елементів. Окремі елементи відмовляють незалежно один від одного.

Відмова обмотки, зрештою, завжди пояснюється міжвитковим замиканням, тому найбільш показовою характеристикою природно рахувати значення пробивної напруги. Відмова відбувається, коли напруга, прикладена до сусідніх витків, перевищує пробивну напругу міжвиткової ізоляції.

Прикладена напруга і пробивна напруга міжвиткової ізоляції є випадковими величинами.

Імовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції обмотки, що складається з n елементів, буде:

$$P_B = \int_0^{\infty} g(U)[1 - F(U_B)]^n dU, \quad (75)$$

де $g(U)$ – щільність розподілу прикладеної напруги;

$F(U)$ – функція розподілу пробивної напруги міжвиткової ізоляції.

Формула (75) є математичною моделлю надійності міжвиткової ізоляції обмотки з n пар витків, виражена в загальному вигляді.

Для побудови математичної моделі, придатної для розрахунку надійності обмотки, необхідно знати реальні розподіли пробивної напруги міжвиткової ізоляції і прикладеної напруги, а також характер зміни випадкової функції розподілу пробивної напруги міжвиткової ізоляції у функції часу.

Напруга між сусідніми витками залежить від розподілу комутаційних перенапружень по секціях і витках обмотки. Експериментально було показано, що перенапруження розподіляються практично рівномірно.

Імовірність пробивної напруги міжвиткової ізоляції підкоряється закону розподілу екстремальних значень типу III (при експериментальному визначенні електричної міцності ізоляції фактично буде визначена електрична міцність елементарної ділянки з мінімальною електричною міцністю) – розподіл Вейбулла. З використанням цього закону функція розподілу імовірності виткової пробивної напруги записується у вигляді:

$$F(U_B) = 1 - e^{-\alpha U_B^\alpha / U_0}, \quad (76)$$

де α , U_0 – параметру розподілу.

Для розрахунку надійності слід знати закон розподілу імовірності пробивної напруги у будь-який момент часу. Якщо прийняти допущення, що закон розподілу імовірності пробивної напруги в процесі експлуатації не змінюється, а змінюються лише його параметри, необхідно визначити функції $U_0=f(t)$ і $\alpha =\varphi(t)$ за заданих умов експлуатації. Ці функції можуть бути визначені за допомогою теорії планування експерименту шляхом реалізації матриці планування повного факторного експерименту для чотирьох чинників (матриця типу 2^4) [6, 31].

На підставі приведених експериментальних і теоретичних досліджень розроблена методика розрахунку надійності обмоток асинхронних двигунів. Вихідні дані для розрахунку наступні: марка і діаметр обмотувального дроту, марка складу, що просочує, кількість ефективних провідників в секції S , кількість послідовно сполучених секцій q , кількість пазів статора z , кількість сторін секцій в пазу c , частота пусків двигуна в годину f , стала температура обмотки при експлуатації T , режим роботи двигуна, міра зволоження, температура довкілля при зволоженні, емпіричні залежності $\lg U_0=f(\tau)$ і $\alpha =\varphi(\tau)$ за заданих умов експлуатації.

Розрахунок надійності здійснюється таким чином.

1. Визначається кількість ефективних провідників в обмотці $N=Scz$. Для одношарової обмотки $c=1$, для двошарової $c=2$.

2. Визначається кількість елементів моделі $n=2,7N$. Ця формула отримана при розрахунку середнього числа провідників, з якими стикається кожен провідник в пазу.

3. Загальний час τ , за який слід визначити імовірність безвідмовної роботи $P(\tau)$, розбивається на ряд інтервалів $\Delta\tau$ так, щоб значення статистик пробивної напруги міжвиткової ізоляції $\lg U_0$ і α в у кожному інтервалі могли бути прийняті постійними.

4. Визначається імовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції послідовно для кожного інтервалу часу при одному включенні. Розрахунки слід проводити за допомогою ЕОМ. Вихідна формула (75) перетворюється з урахуванням (76) і (77):

$$P_{\Delta\tau_i} = 1 - Q_{\Delta\tau_i}, \quad (77)$$

де $Q_{\Delta\tau_i}$ – імовірність відмови.

5. Визначається імовірність безвідмовної роботи для кожного Δt з врахуванням кількості включень двигуна:

$$v_i = f \Delta \tau_i,$$

$$P_{\Delta \tau_i, v_i} = (1 - Q_{\Delta \tau_i})^{v_i}.$$

6. Імовірність безвідмовної роботи у функції часу виходить шляхом послідовного перемножування значень $P_{\Delta \tau_i}$:

$$P_B(\tau) = \prod_{i=1}^n P_{\Delta \tau_i, v_i}. \quad (78)$$

7. Імовірність безвідмовної роботи пазовою, міжфазною і міжсекційною ізоляціями (в разі двошарової обмотки) $P_{II}(\tau)$, $P_M(\tau)$, $P_C(\tau)$ можуть бути визначені по аналогічній методиці.

Проте, як правило, імовірність безвідмовної роботи цих елементів системи ізоляції обмотки близька до одиниці і практично не позначається на значенні імовірності безвідмовної роботи всієї обмотки, яка розраховується по формулі:

$$P_{\text{обц}}(\tau) = P_B(\tau) \cdot P_{II}(\tau) \cdot P_M(\tau) \cdot P_C(\tau). \quad (79)$$

Математична модель надійності обмоток електродвигунів розроблена Ю. П. Похолковим для всипних обмоток асинхронних двигунів і використовується на заводах електротехнічної промисловості [1]. Основні положення і допущення цієї моделі наступні: відмова ізоляції обмоток відбувається в результаті короткого замикання (виткового, корпусного, міжфазного). Замикання можливе лише при існуванні дефектів виткової, корпусної або міжфазної ізоляції. Під «дефектом» розуміється кризне пошкодження ізоляції, а за «дефектну ділянку» береться елементарна ділянка, пробивна напруга якої не вище напруги перекриття по поверхні ізоляції довжиною, рівною товщині ізоляції.

Перекриття проміжків між струмопровідними частинами в місцях дефектів відбувається в результаті дії перенапруги, що виникають в обмотці при перехідних процесах. У моделі, що розглядається, емпіричний розподіл перенапруги описується суперпозицією двох нормальних законів. У методиці враховано, що далеко не кожне пе-

рекриття перенапруженням проміжку з дефектом призводить до відмови ізоляції.

Отримана емпірична формула для визначення імовірності виникнення короткого замикання при одному перекритті:

$$P(k / n) = 1 - e^{-(0,007U + 0,00015V)/z}, \quad (80)$$

де $P(k/n)$ – умовна імовірність короткого замикання при появі перекриття дефектного проміжку;

U – робоча напруга;

V – величина імпульсу перенапруги;

z – відстань, що перекривається.

Крім того, приймається, що відмова корпусної або міжфазної ізоляції може статися лише при пошкодженні всіх шарів в межах елементарної ділянки. Передбачається, що пошкодження (технологічні і експлуатаційні) окремих шарів композиції ізоляції незалежні.

Розрахунок імовірності відмови обмотки проводиться для послідовних інтервалів часу напрацювання. Величина інтервалу вибирається такою, в межах якої дефектність ізоляції не змінюється.

2.8. Оцінка надійності за даними випробувань і експлуатації

2.8.1. Основні методи оцінки надійності

Експериментальна оцінка надійності (випробування на надійність готових виробів) є одним з найважливіших етапів в процесі розробки і серійного випуску промислових виробів. Основні види випробувань на надійність – визначальні і контрольні (рис. 11) [6, 32, 33].

Визначальні випробування на надійність виробів, серійне виробництво яких налагоджене знов або після модернізації, проводяться з метою знаходження фактичних кількісних показників надійності. Термін випробування проводяться на зразках, що виготовляються згідно циклу серійного виробництва. При визначальних випробуваннях можуть оцінюватися закони розподілу відмов і їх параметри.

Результати визначальних випробувань служать для оцінки відповідності фактичних показників надійності технічним умовам.

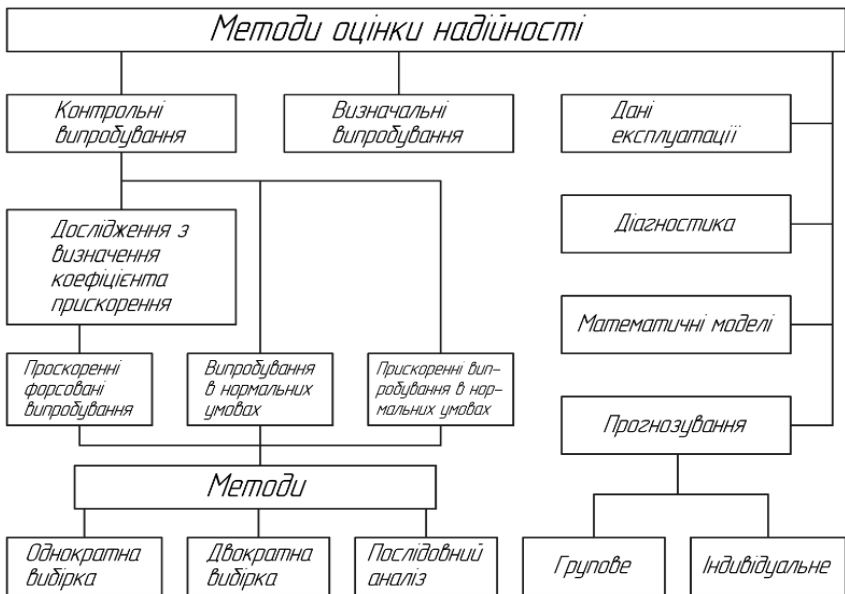


Рис. 11. Класифікація методів оцінки надійності

Контрольні випробування на надійність проводяться з метою визначення відповідності кількісних показників надійності вимогам стандарту, технічних умов або технічного завдання. Контрольні випробування проводяться періодично в терміни, встановлені стандартами на даний технічний виріб.

Ресурс сучасних електричних машин складає 20000-50000 год., у зв'язку з чим, проведення випробувань може затягнутися на 5-10 років. Для скорочення термінів використовуються форсовані методи випробувань, проте при цьому має бути знайдена відповідність між випробуваннями в нормальних умовах і форсованими (прискореними). Цій меті служать дослідження за визначенням коефіцієнтів прискорення [3, 34].

Коефіцієнт прискорення є відношення часу випробувань в звичайних умовах (t_n) до часу випробування у форсованих режимах

(t_{np}) за умови рівності значень вірогідності безвідмовної роботи в обох випадках (рис. 12):

$$k = t_n / t_{np}.$$

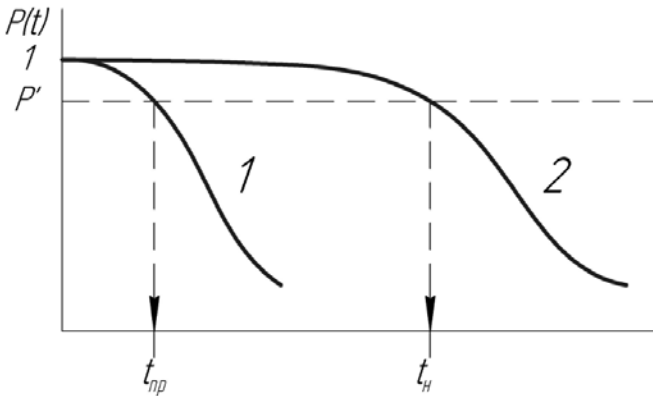


Рис. 12. Визначення коефіцієнта прискорення:

1 – прискорені випробування; 2 – випробування в нормальних режимах

Основна вимога, що пред'являється до прискорених випробувань, – це ідентичність процесів старіння і зносу по відношенню до нормальних умов, що у свою чергу, означає ідентичність законів розподілу. У загальному випадку метою випробувань є знаходження функціональних залежностей, що зв'язують коефіцієнти прискорення k_{np} і чинники форсування z_i , і значення максимально можливого (з точки зору збереження адекватності фізики процесів старіння) коефіцієнта прискорення.

В деяких випадках проводяться прискорені контрольні випробування в нормальних умовах. Ці випробування базуються на відомій математичній моделі процесу. Методи контрольних випробувань викладені в ДСТУ 2864-94 «Надійність техніки. Експериментальне оцінювання. Контроль надійності» та ДСТУ 3004-95 «Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними» [8, 9].

До основних способів отримання даних про надійність відноситься обробка інформації про відмови виробів в процесі експлуатації, тобто оцінка надійності за даними експлуатації. Це вельми тривалий і складний процес, пов'язаний з подоланням об'єктивних

труднощів в здійсненні правильної організації збору статистичних даних. Окрім того, унаслідок зміни конструкцій і технології виготовлення електромеханічних виробів, дані про надійність, якоюсь мірою застарівають. Проте і в цьому випадку обробка й аналіз даних експлуатації є корисною для оцінки надійності родинних по призначенню, конструкцій і технологій виробів.

Спеціальні дослідження проводяться з метою прогнозування надійності і технічного стану машин [35, 36, 37].

До інформації про надійність технічних виробів слід також віднести діагностику. Метою діагностики є визначення працездатності виробу в даний момент часу і виявлення дефектів окремих його вузлів.

При дослідженні надійності використовуються спеціальні методи випробувань: крокового навантаження, матричний, граничний і ін. По першому методу випробування проводяться з дискретним збільшенням навантаження. При використанні другого методу для випробувань технічних виробів вибирають такі чинники, які зв'язані між собою так, що утворюють матрицю. Третій метод використовується в тих випадках, коли регламентуються такі параметри, як чутливість, смуга частот, коефіцієнт посилення і ін. Вихід параметрів за встановлені межі класифікується як параметрична відмова елемента або пристрою.

Контрольні випробування проводяться вибірково, тому при ухваленні рішення можливі помилки першого роду, коли хороша партія бракується, і другого роду, коли погана партія приймається. Імовірність помилки другого роду β – *ризиком замовника (споживача)*; імовірність помилки першого роду α – *ризиком виробника*.

Найлегше плануються контрольні випробування по методу однократної вибірки, проте з точки зору об'єму вибірки виробів, необхідних для проведення випробувань, цей метод найменш економічний. Контроль по методу двократної вибірки економічніший, але ця перевага виявляється лише при контролі великих партій з дуже низькою або дуже високою надійністю. Проте обробка результатів більш трудомістка, ніж при одиночному контролі, тому метод двократної вибірки використовується рідше. Найбільш економічний метод послідовного аналізу, при використанні якого середній об'єм вибірки складає 50-70% об'єму при одиночному контролі, але при біль-

шому часі робіт (з цим недоліком можна успішно боротися шляхом раціональної організації випробувань).

Методика контрольних випробувань на надійність в найзагальнішому випадку повинна містити перелік показників надійності, що підлягають контролю, а також по кожному конкретному показнику надійності наступні дані:

- приймальний P_α і бракування P_β рівні імовірності безвідмовної роботи,
- ризику замовника β та виробника α ,
- метод проведення випробувань, план випробувань, перелік параметрів, які характеризують стан виробу, умови випробувань (значення чинників, що впливають, їх послідовність, тривалість і т. д.) і вирішальне правило.

Можливий спрощений план випробувань (у тому числі і для електричних машин). Вихідними даними в цьому випадку є: число допустимих відмов c (приймальне число за час t випробувань); імовірність безвідмовної роботи P_β за час t і ризику замовника β . Перед випробуваннями проводять прироблення машин (зазвичай протягом 100 год.), причому двигуни, що відмовили, замінюють новими. Інколи з метою скорочення об'єму вибірки збільшують тривалість випробувань. Число c вибирають невеликим (0-2), аби не збільшувати об'єм вибірки n , який визначають по таблиці 4.

В результаті випробувань число відмов d має бути не більшим приймального числа, тобто $d \leq c$ (вирішальне правило).

Прискорені випробування в нормальних режимах здійснюються таким чином. Допустимо, що виріб (звичайно це підсилювач, перетворювач або колекторний вузол) характеризується параметричними відмовами і має безперервну характеристику «вхід – вихід». Як приклад представимо залежність вихідного параметра у функції часу:

$$y = y_0 + a_0 t^\alpha. \quad (81)$$

Якщо задана допустима зміна параметра $\Delta = y - y_0 = \delta$, то можна знайти середній час t_n , необхідний для досягнення відхилення δ . Позначимо $\delta/a_0 = V$, тоді з (81) отримаємо:

$$t_n = [\delta / a_0]^{1/\alpha}. \quad (82)$$

Для прискорених випробувань встановлюють вужчі межі відхилення $\delta' = \delta/m$, де $m=1,5 \div 5,0$. Отже, середній час, необхідний для досягнення δ' , буде $t_y < t_n$ і визначається з виразу (82).

Таблиця 4

Об'єм вибірки n при $\beta = 0,1$

с	$P_{\beta}(t)$														
	0,9	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,4	0,3
0	22	20	18	17	15	14	10	8	6	5	5	4	3	3	2
1	38	34	31	29	27	25	18	15	12	10	9	8	7	5	4
2	52	47	43	40	37	34	25	20	16	14	12	10	9	7	6
3	65	59	54	50	46	43	32	25	21	18	15	13	12	9	8

**2.8.2. Прискорені випробування на надійність.
Визначення коефіцієнта прискорення**

Прискорені випробування електричних машин проводяться в спеціальних умовах, які характеризуються підвищеним рівнем деяких факторів, званих факторів форсування. До них відносяться: підвищена температура, підвищена вібрація, частота обертання, частота пусків, підвищена вологість, питома натискання і щільність струму під щіткою, запиленість та ін. При прискорених випробуваннях на надійність кількість факторів форсування звичайно варіюється від двох до чотирьох. Для отримання залежності коефіцієнта прискорення у функції факторів форсування (ці функціональні залежності значно розширюють можливості подальших випробувань на надійність в порівнянні з точковими значеннями) необхідно реалізувати спеціальні плани, які складені згідно математичної теорії планування експериментів. Функціональні залежності записуються у поліноміальному вигляді: для планів першого порядку:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j, \quad (83)$$

для планів другого порядку:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2. \quad (84)$$

Функціональний зв'язок коефіцієнтів прискорення та факторів форсування знаходиться після математичної обробки.

Для проведення випробування з визначення коефіцієнта прискорення попередньо необхідно виконати наступні операції: розділити досліджувану систему на окремі підсистеми; встановити фактори, що впливають на окремі вузли, і визначити сукупність чинників, які повинні бути відтворені при прискорених випробуваннях; встановити граничні значення основних впливаючих факторів; вибрати контрольні параметри та встановити критерії відмови; скласти план випробувань з визначення коефіцієнтів прискорення та забезпечити реалізацію заданих рівнів форсування по кожному з факторів.

Розглянемо як приклад машину постійного струму, яку як систему можна розбити на окремі підсистеми, а саме: підшипниковий вузол, колекторно-щітковий вузол, обмотки статора і ротора.

Залежно від характеру впливу факторів на досліджувані об'єкти їх можна розбити на три групи: випадкові \overline{W} , постійні \overline{C} і змінні \overline{X} .

До випадкових факторів можна віднести: відхилення геометрії магнітної системи, розлад комутації, сплески струмів, ексцентриситет колектору, еліптичності колектору, його ослаблення, відхилення в технології виготовлення колекторів та щіток, перекиї щіток в щіткотримачі і т. д.

До постійних факторів належать: конструкція колекторного вузла, застосовувані матеріали, марка щіток, конструкція щіткотримача.

До змінних, контрольованих факторів впливу відносяться: температура, вологість, кислотність, запиленість, вібрація, тиск на щітку, щільність струму під щіткою, частота пусків, частота обертання, величина навантаження і час безперервної роботи.

Фактори груп \overline{W} і \overline{C} в основному визначаються конструкцією, технологією, настроюванням машини, а також умовами її експлуатації. При реалізації планів теорії експерименту фактори груп \overline{W} і \overline{C} автоматично враховуються в рівняннях регресії.

Фактори, що впливають, групи \overline{X} можуть бути змінені в досить широких межах. Для отримання найбільших коефіцієнтів прискорення режими випробування повинні бути більш жорсткими, але

нескінченно підвищувати форсування не можна, щоб не порушити фізичну картину процесів старіння окремих підсистем. Досвід створення методик прискорених випробувань показує, що коефіцієнт прискорення не повинен перевищувати 12-15 (в деяких випадках 20).

Вибір інтервалів варіювання параметрів групи є складним завданням і ґрунтується на даних технічних умов, лабораторних випробуваннях, аналізі всього об'єкта в цілому, після проведення попереднього експерименту інтервали варіювання уточнюються.

Орієнтовно граничні значення для машин постійного струму складають: температура колектору – до 150°C , частота обертання – до 1,5 номінальної, вологість навколишнього повітря – до 98%, подвійна амплітуда вібрації – не більше потрійний від номіналу, щільність струму під щіткою – до 12 A/cm^2 .

Критерії працездатності розглянемо на прикладі колекторного вузла. До них можна віднести: биття (статичне і динамічне), іскріння, знос щіток, температуру колектору, ширину безіскрової зони, перехідний опір щіткового контакту, падіння напруги в щітках. Критерії відмови: перевищення рівня іскріння вище допустимого, швидкість зносу щіток або величина зносу щіток, знос колектору вище допустимого, істотне перевищення температури колектору вище допустимого.

Функціональні залежності, що зв'язують коефіцієнт прискорення і фактори форсування, знаходяться за допомогою методів теорії планування експерименту. Перед проведенням випробувань повинні бути здійснені наступні процедури: вибір параметра оптимізації (вихідного параметра); вибір факторів форсування (вони не повинні бути закорельовані); вибір центру плану, рівнів і інтервалів варіювання факторів; вибір схеми планування.

2.8.3. Методики проведення випробувань на надійність. Методика контрольних випробувань

Методика розрахована на підтвердження імовірності $P(t)$ безвідмовної роботи виробу за час t , заданою вимогами технічних умов. [20]. Періодичність контролю кількісних показників надійності встановлюється в технічних умовах; контроль виробляється також при різних змінах в конструкції, технології і так далі Комплектування вибірки виконуються методом випадкових чисел. Для складання вибірки використовується таблиця випадкових чисел. Методика дозволяє зменшити час випробувань за рахунок форсування режимів випробувань (в разі прискорених випробувань).

Умови проведення випробувань. Зразки виробів для випробувань відбираються з числа прийнятих технічним контролем заводу з обов'язковим проходженням прироблення.

Випробування рекомендується проводити цілодобово у форсованому режимі.

Під час випробувань проводяться регламентні і профілактичні роботи, передбачені відповідними інструкціями.

Прискорені випробування є циклічними. Рівні чинників, що впливають, вибираються такими, аби забезпечити заданий коефіцієнт прискорення. Значення коефіцієнта прискорення задається залежно від інтервалу варіювання чинників, передбачуваній тривалості випробувань і коректується можливістю його реалізації на стендах підприємства.

При збільшенні часу випробувань t_e в порівнянні із заданим t ($t_e > t$) об'єм вибірки зменшується.

Якщо підприємство має в своєму розпорядженні необхідну кількість виробів n^* для проведення випробувань, то задаються приймальним числом s і з таблиці 4, при відомій з технічних умов імовірності $P_\beta(t)$ безвідмовної роботи за час t для відповідного значення β визначають необхідний для випробувань об'єм вибірки $n \leq n^*$.

Усі n виробів випробовуються протягом часу t_g і за результатами випробувань підтверджують або відхиляють гіпотезу, що висувається. Якщо число відмов при випробуваннях $d \leq c$, то результат позитивний, якщо, якщо $d > c$, то результат негативний.

В тому випадку, якщо підприємство не має в своєму розпорядженні необхідного для випробувань числа виробів ($n > n^*$), слід збільшити час випробувань $t_g > t$.

2.8.4. Метод послідовного аналізу

Особливість методу послідовного аналізу полягає в тому, що при заданих α і β кількість випробовуваних виробів заздалегідь не фіксується, а залежить від результату спостережень. В процесі експерименту приймається одне з трьох рішень: про приймання, про відбракування або продовження випробувань.

На підставі накопиченого досвіду встановлені деякі норми, які дають низьке значення ризику виробника і не потребують надмірних витрат на випробування. У технічне завдання при цьому вони включаються як норми надійності: T_α і T_β – часи напрацювання на відмову, які відповідають ризикам відповідно виробника і замовника

$$(T_\alpha = kT_\beta \text{ где } k = 1,5 \div 3).$$

Ухвалення рішення засноване на послідовному критерії відношення правдоподібності (стосунки вірогідності):

$$\gamma = \frac{P[T_\beta]}{P[T_\alpha]}. \quad (85)$$

До тих пір, поки $\gamma > \beta/(1-\alpha)$, вирішення про прийом партії виробів є необґрунтованим, і, навпаки, поки в $\gamma < (1-\beta)/\alpha$, рішення про відбракування необґрунтовано. Тут $(1-\alpha)$ – вірогідність прийому хорошої партії, $(1-\beta)$ – вірогідність відбракування поганої партії. Отже, поки виконується нерівність:

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \gamma < \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (86)$$

випробування необхідно продовжувати.

Якщо ж нерівність так чи інакше порушується, то випробування припиняються з ухваленням рішення.

Визначальні випробування і оцінка надійності за даними експлуатації. План визначальних випробувань характеризує основні риси експериментальної оцінки показника надійності, що зберігаються незалежно від конкретного вигляду випробовуваного виробу. Кожен план має деяку кількість параметрів (змінних), для кожного з них задається діапазон можливих значень, і значення, які мають бути визначені до початку випробувань. Набір фіксованих значень параметрів називають перетином плану.

План випробувань можна вважати заданим, якщо визначені: оцінюваний показник надійності, перелік параметрів плану, перелік безпосередніх результатів випробувань, методика здобуття безпосередніх результатів і додаткові умови, що визначають рамки вживання даного плану.

Розглянемо приклад плану випробувань для оцінки імовірності $P(\tau)$ безвідмовної роботи виробу протягом фіксованого інтервалу часу. Проводяться m дослідів, кожен з яких полягає у випробуванні одного зразка виробу до виділення часу τ , якщо донині відмова не настала, або повністю, якщо час виникнення відмови $t < \tau$. Фіксується кількість дослідів d , що закінчилися відмовою. На основі величин m і d обчислюється точкова оцінка $P^*(\tau)$, а також всі необхідні показники точності та достовірності цієї оцінки: верхні і нижні довірчі границі $P_u(\tau)$, $P_n(\tau)$, відповідні заданій довірчій вірогідності Q , відносна довірча помилка δ_p . Параметром плану є кількість дослідів m , достатньою статистикою – кількість дослідів m і число відмов d .

Для конкретизації вибраного плану служить програма випробувань, яка складається в результаті планування випробувань і включає наступні позиції: оцінюваний показник надійності; показники точності і достовірності оцінки; значення параметрів плану; кількість зразків, що беруть участь у випробуваннях; умови довілля; необхідне випробувальне устаткування, стенди й прилади; режими роботи й технічного обслуговування випробовуваного зразка; процедура здобуття безпосередніх результатів; формули для обчислення шуканих показників; спосіб оформлення результатів випробувань.

Оцінка імовірності безвідмовної роботи $P(\tau)$ здійснюється при використанні різних планів випробувань.

2.9. Методи теорії планування експериментів

Планування випробувань зводиться до визначення єдиного значення параметра – мінімальної кількості дослідів m , необхідного для забезпечення заданої достовірності Q і точності δ_p оцінки показника P , а також орієнтовного значення сумарної витрати ресурсу t_{Σ} [6]. Основні співвідношення наступні:

$$d=m(1-P^*), \quad (87)$$

$$P_n = P^{*1-\delta_p}. \quad (88)$$

Одним з найважливіших способів отримання даних про надійність технічних пристроїв є збір і статистична обробка інформації про знос і відмови, що відбулися в процесі експлуатації.

Отримані дані з відмов виробів (в результаті випробувань або за даними експлуатації) піддаються статистичній обробці для здобуття наступних результатів:

- визначення вигляду функції щільності розподілу або інтегральної функції розподілу;
- обчислення параметрів отриманого розподілу;
- встановлення за допомогою критеріїв згоди ступеня збігу емпіричного (експериментального) розподілу з передбачуваним теоретичним розподілом;
- визначення параметрів надійності досліджуваних виробів.

Для визначення функції працездатності $y=f(x_i)$ використовуються наступні плани [7]: плани першого порядку – повний факторний експеримент (ПФЕ) і дрібний факторний експеримент (ДФЕ); плани другого порядку – ортогональне центральне композиційне планування (ОЦКП); плани другого порядку – рототабельне центральне композиційне планування (РЦКП).

Перед реалізацією плану виконуються наступні процедури.

1. Збір інформації, при різкому дефіциті якої необхідне проведення однофакторних перетинів, тобто реалізація однофакторних залежностей $y=f(x_j)$, де y – функція відгуку (критерій працездатності досліджуваного об'єкта).

2. Вибір факторів форсування (незалежних змінних). При нестачі інформації про ступінь впливу кожного з факторів і необхідність виділення домінуючих чинників реалізуються експерименти, що відсіваються.

3. Призначення інтервалів варіювання факторів, тобто галузі дослідження бажаної функції $y=f(x_i)$.

4. Кодування факторів. Кодування (переклад у відносні одиниці) здійснюється за формулою:

$$x_i = \frac{x_i - x_{i\text{cp}}}{x_{i\text{cp}} - x_{i\text{min}}} = \frac{x_i - x_{i\text{cp}}}{x_{i\text{max}} - x_{i\text{cp}}} = \frac{x_i - x_{i\text{cp}}}{\Delta\lambda}, \quad (89)$$

де x_i і X_i – кодовані і натуральні змінні;

$X_{i\text{min}}$ і $X_{i\text{max}}$ – мінімальне (нижній рівень) і максимальне (верхній рівень) значення;

$X_{i\text{cp}} = (X_{i\text{max}} + X_{i\text{min}})/2$;

$X_{i\text{cp}}$ - нульовий рівень;

$\Delta\lambda = X_{i\text{max}} - X_{i\text{cp}}$ – інтервал варіювання.

Кодовані змінні приймають значення: (+1) – на верхньому рівні, (-1) – на нижньому, (0) – на нульовому рівні.

5. Призначення плану експерименту.

Далі вибирається одна з матриць планування експериментів, на якій проводяться досліди зі зміною параметрів згідно з прийнятою матрицею. Після завершення всіх дослідів визначаються оптимальні значення змінних параметрів відповідно до заданих значень.

Контрольні запитання до розділу

1. Перерахуйте і дайте визначення основним показникам та термінам теорії надійності.
2. Проаналізуйте періоди роботи технічних виробів.
3. У чому полягає структурна надійність і як вона розраховується для кожного виду з'єднання елементів?
4. Наведіть аналітичні вирази основних законів розподілу відмов.
5. У чому полягає модель «слабкої ланки»?
6. Наведіть статистику відмов машин малої потужності.
7. Які критерії працездатності підшипникових вузлів?
8. Перерахуйте та проаналізуйте процеси що впливають на надійність підшипникових вузлів.
9. Як розраховується довговічність ізоляції? Наведіть правило «восьми градусів».
10. Які існують методи оцінки надійності?
11. У чому полягає ризик замовника й ризик виробника?
12. Розкрийте суть планування випробувань та методів теорії планування.

3. ОСНОВНІ ЕТАПИ І ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

3.1. Виділення найбільш інформативних показників оцінки працездатності основних вузлів електричних машин

Для основних вузлів електричних машин не існує єдиного інформаційного показника, який повністю характеризує технічний стан досліджуваного вузла, в зв'язку з чим для контролю роботи вузла бажано фіксувати як можна більше число показників, критеріїв працездатності, тому що в сукупності вони досить повно описують картину технічного стану. Однак виконання цієї умови наштовхується на різко зростаючі технічні труднощі і подорожчання експерименту.

Завдання вирішується таким чином: зі всього спектру показників працездатності вибираються найбільш інформативні, тобто такі, які в даних умовах якнайповніше описують роботу вузла або машини і одночасно по можливості не дуже ускладнюють експеримент.

Розглянемо застосування методу експертних оцінок для визначення критеріїв працездатності вузлів електричної машини [16, 22, 23]. Цей метод не вимагає проведення спеціального експерименту, досить простий в обробці даних і заснований на використанні досвіду експертів, а експериментальні дані в цьому методі замінюються інформацією, накопиченою групою експертів у процесі їх самостійної наукової діяльності.

В основі методу експертних оцінок лежать п'ять вихідних умов групового вибору рішень, сформульованих К. Ерроу, а саме: вільний вибір експертів; наявність позитивних зв'язків громадських та індивідуальних переваг; незалежність незв'язаних альтернатив; наявність суверенності експертів і відсутність диктаторства.

Визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностуванню.
Правильний вибір підлягаючих діагностуванню вузлів і деталей (елементів) електрообладнання, є одним з важливих питань розробки загальної системи діагностування. Від нього залежить напрямок і зміст подальших робіт з визначення параметрів, вимірюваних при діагностуванні, розробки методів і засобів діагностування, розробці технології, і, в кінцевому рахунку, економічна ефективність діагностування даного типу електричної машини або апарата.

Під час створення методів і засобів діагностування зустрічаються випадки, коли розробка ведеться для електричних машин і апаратів, що випускаються серійно і пропрацювали певний час, і коли розробка ведеться для нового електрообладнання. У першому випадку для визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностуванню, зазвичай збирають дані про відмови електричних машин і апаратів в умовах експлуатації. У другому випадку для отримання вихідних даних проводять випробування дослідної партії нового електрообладнання.

На підставі аналізу кількості і причин відмов визначається перелік елементів конструкції, які обмежують ресурс чи працездатність електричної машини або апарата. У зв'язку з тим, що діагностування електрообладнання, як і будь-якої машини або механізму, доцільно проводити тільки при отриманні відповідного економічного ефекту або забезпечення безпеки експлуатації, нижче викладено методику визначення номенклатури деталей і вузлів (елементів), що підлягають діагностуванню, а також розрахунок шкоди, що виникає внаслідок відмов елементів електрообладнання.

Наведені витрати на експлуатацію елемента електричної машини або апарата без застосування діагностування визначаються виразом:

$$Z_{ei} = Z_{Ti} + Z_{pi} + Z_{oi} + U_i, \quad (90)$$

де Z_{Ti} , Z_{pi} – приведені витрати відповідно на технічне обслуговування та ремонти (поточний і капітальний) елемента, грн.;

Z_{oi} – приведені витрати на усунення відмов елемента, грн.;

U_i – наведений збиток від відмови елемента, грн.

Збиток внаслідок відмови елементів електрообладнання, як правило, пов'язаний з простоем робочих машин, механізмів і технологічних ліній або установок. Простий викликає зменшення кількості вироблюваної продукції, її псування й інші негативні наслідки.

Наведені витрати при експлуатації електричної машини або апарата:

$$Z_m = \sum_{i=1}^n Z_{ei}, \quad (91)$$

де n – число елементів електричної машини або апарата.

На першому етапі приймають, що діагностуванню підлягають елементи, що обмежують ресурс роботи електроустаткування, тобто у яких в процесі експлуатації виникають відмови, що викликають витрати на їх усунення.

Оцінкою для порівняння наслідків відмов елементів машини або апарата є ставлення:

$$G = (Z_{oi} + Y_i) / Z_m. \quad (92)$$

У першу чергу, подальшому аналізу повинні бути піддані елементи, у яких відношення (92) має найбільше значення. Маючи в своєму розпорядженні вичислені за формулою (92) значеннями G в ряд у порядку спадної послідовності, записуємо нерівність, яка вказує на черговість подальшого аналізу елементів для визначення доцільності їх діагностування:

$$G_1 \geq G_2 \geq G_3 \dots G_n.$$

У зв'язку з тим, що діагностування пов'язано з певними витратами, доцільність його проведення для елемента визначають за наявності економічного ефекту. Застосування діагностування призводить до зміни витрат на технічне обслуговування, зменшення їх на ремонт і усунення відмов, звичайно знижує збиток від простоїв.

Приведені витрати при експлуатації елемента із застосуванням діагностування $Z_{e,oi}$ записуються виразом:

$$Z_{e,oi} = Z_{m,oi} + Z_{p,oi} + Z_{o,oi} + Y_{oi} + Z_{di}, \quad (93)$$

де $Z_{m,\partial i}$, $Z_{p,\partial i}$ – приведені витрати відповідно на технічнеобслуговування і ремонт елементу при вживанні діагностування, грн.;

$Z_{o,\partial i}$ – приведені витрати на усунення відмов елементу, грн.;

$Y_{\partial i}$ – приведений збиток від відмов елементу при вживанні діагностування, р.;

$Z_{\partial i}$ – приведені витрати на діагностування елементу, грн.

Приведені витрати при експлуатації електричної машини або апарату із застосуванням діагностування записуються аналогічно виразу (91):

$$Z_{m,\partial} = \sum_{i=1}^n Z_{e,\partial i}. \quad (94)$$

Економічний ефект при вживанні діагностування елементу електричної машини або апарату $E_{e,\partial i}$ визначається з виразу:

$$E_{e,\partial i} = Z_{ei} - Z_{e,\partial i}.$$

Зменшення витрат, пов'язаних з експлуатацією елементу електричної машини або апарату, при діагностуванні досягається збільшенням ресурсу і безвідмовності, а також встановленням оптимальної періодичності обслуговування.

Діагностування елементу доцільне, якщо дотримується нерівність

$Z_{ei} > Z_{e,\partial i}$, тобто коли приведені витрати при експлуатації елементу без вживання діагностування більше приведених витрат при вживанні діагностування. Інакше діагностування елементу (вузла або деталі) недоцільне. Економічний ефект при вживанні діагностування електричної машини або апарату:

$$E_{m,\partial} = \sum_{i=1}^{n_i} E_{e,\partial i}, \quad (95)$$

де n_i – число елементів машини або апарату, діагностування яких забезпечує здобуття економічного ефекту.

Основні терміни та визначення технічної діагностики наведено в ДСТУ 2389-94 [38].

3.2. Вибір параметрів і розробка методів діагностування електрообладнання

При розробці методів діагностування електрообладнання важливим і складним завданням є визначення оптимального набору параметрів, що використовуються при діагностуванні і характеризують технічний стан контрольованого об'єкта. Параметри, величини яких доцільно вимірювати при діагностуванні електрообладнання, характеризуються номінальними значеннями і полем допусків, залежностями номінальних значень від зовнішнього середовища (наприклад, струмів витоку ізоляції від ступеня його зволоження), закономірностями зміни в залежності від часу експлуатації або напрацювання, необхідною точністю вимірювань і ін.

В електричних машинах і апаратах значне число параметрів можна виміряти безпосередньо (напругу, частоту та ін.) Для вимірювання інших параметрів застосовують перетворювачі. Для вибору застосовуваних при діагностуванні параметрів, що характеризують технічний стан вузлів і деталей електричної машини або апарата, їх можна класифікувати таким чином: параметри, виражені електричними величинами і дозволяють вимірювати їх значення безпосередньо (напруга і сила змінного чи постійного струмів, частота, тривалість і амплітуди імпульсів, індуктивності, ємності, опору та ін.); параметри, виражені електричними величинами і вимагають для свого вимірювання додаткового перетворення (великі чи малі струми і напруги, модуляція та ін.); параметри, вимірювані непрямим шляхом; параметри, виражені неелектричними величинами і потребують для свого вимірювання первинного перетворення (температура переміщення та ін.); параметри, оцінка яких проводиться візуально (наявність слідів перегріву або нагару на контактних поверхнях, наявність раковин на поверхні колектору або контактних кілець і ін.)

За інформативністю параметри можна умовно розділити на дві групи: узагальнені і локальні. Узагальнений параметр несе велику кількість інформації і характеризує стан декількох або одного вузла, кількох деталей, а локальний - тільки однієї деталі (елементу) [16, 23].

Для оцінки технічного стану електричної машини або апарата можна виміряти багато десятків параметрів, однак таке вимірювання вимагає наявності великої кількості приладів і великих витрат часу, що може звести ефективність застосування діагностування до мінімуму і навіть призвести до збитків. Тому із сукупності параметрів обирають оптимальне їх число і поєднання, що забезпечує необхідну достовірність результатів діагнозу при мінімальних витратах. Часто доводиться виключати з діагностичного ряду параметри, що несуть великий обсяг інформації, але мають високу вартість вимірювання. Отже, вибір діагностичних параметрів для даної електричної машини або апарата зводять до вирішення завдання оптимізації набору цих параметрів. При виборі діагностичних параметрів керуються такими основними положеннями. Кожному значенню параметру, що перевіряється, вузла або деталі електроустаткування (наприклад, провалу контактів магнітних пускачів) повинно відповідати тільки одне значення діагностичного параметра (вимога однозначності). Діагностичний параметр повинен відносно легко вимірюватися по можливості простими засобами (вимога доступності і зручності вимірювання). Діагностичний параметр повинен мати якомога більший діапазон вимірювання при зміні контрольованого параметра вузла або деталі в процесі роботи електроустаткування, що дозволяє підвищити точність вимірювання та достовірність діагностування (вимога широти області зміни).

При виборі номенклатури діагностичних параметрів зазвичай проводять аналіз всіх параметрів, що характеризують технічний стан електричної машини або апарата, виражених фізичними величинами, які можна виміряти. У першу чергу, аналізують параметри, які можна виміряти безпосередньо, не вдаючись до перетворень.

При аналізі діагностичних параметрів перевага віддається параметрам, які мають прямий функціональний зв'язок з технічним станом вузла або деталі, що діагностуються, і володіють великою інформативністю.

Крім потенціалу інформативності для кожного діагностичного параметра визначають прилади, якими його можна виміряти, а також трудомісткість і вартість вимірювання. У загальному випадку застосування параметра як діагностичного доцільно, якщо дотримується умова, за якої витрати Z_{oi} на визначення технічного стану еле-

мента за допомогою діагностичного параметра менше або дорівнюють витратам Z_{ni} на визначення технічного стану цього ж елемента шляхом «прямого» вимірювання параметрів після розбирання електричної машини або апарату, тобто коли:

$$Z_{oi} = Z_{ni}; \quad (96)$$

$$Z_{ni} = Z_e + q \cdot Z_p, \quad (97)$$

де Z_e – витрати на вимірювання параметрів елемента після розбирання електричної машини або апарату, грн.;

Z_p – витрати на розбирально-складальні роботи для визначення технічного стану електричної машини або апарату, грн.;

q – вірогідність відмови електричної машини або апарату внаслідок відмови даного елемента.

При визначенні вартості діагностування враховують витрати часу на діагностування, розряд та тарифні ставки діагностів, амортизаційні відрахування на прилади, витрати на електроенергію та інші витрати.

Після визначення діагностичних параметрів наступним етапом робіт є вибір та розробка методів і засобів для діагностування, після чого можна уточнити вартість діагностування і остаточно встановити номенклатуру діагностичних параметрів.

При розробці методів, у першу чергу, прагнуть для спрощення процесу вимірювання та підвищення ефективності діагностування використовувати деталі та вузли електрообладнання в якості датчиків або коштів переміщення одних деталей щодо інших. Наприклад, обмотку котушки магнітного пускача можна використовувати для вимірювання переміщення контактів при діагностуванні контактної системи, а обмотки і магнітопровід електродвигуна - як електромагніту, що переміщує ротор в радіальних напрямках паралельно розточення статора, при вимірюванні зазорів в підшипниках.

Розробка методів зазвичай ведеться на підставі статистичних даних про режими роботи, функціональних залежностей величин параметрів від часу роботи електрообладнання, а також даних теоретичних та експериментальних досліджень.

3.3. Вибір і розробка засобів для діагностування електрообладнання

Виходячи із завдань і принципів організації робіт, при діагностуванні електрообладнання застосовуються прилади та пристрої [15, 16, 22, 25, 28].

Досить широке застосування отримують пристрої для діагностування електрообладнання, які можуть здійснювати постійний або періодичний автоматичний контроль за технічним станом і сигналізувати про настання передаварійного стану. Такі пристрої не дозволяють автоматично або вручну вмикати та вимикати електрообладнання з мережі при загрозі виникнення несправностей. Перспективи широкого застосування пристроїв для діагностування пояснюються тим, що електрообладнанням, на відміну від інших машин і механізмів, порівняно легко можна керувати завдяки наявності апаратури управління та схем автоматизації його роботи. Природно, що автоматичні діагностичні пристрої, в першу чергу, доцільно встановлювати для контролю за електрообладнанням, відмови якого призводять до великого збитку, а також за електрообладнанням, доступ до якого важкий або взагалі неможливий. Слід зазначити, що один пристрій може контролювати групу електрообладнання, наприклад, електродвигуни однієї потокової технологічної лінії.

Засоби для діагностування за принципом дії на об'єкт діагностування поділяються на дві групи: тестову і функціональну [29]. За допомогою засобів тестової групи при діагностуванні в контрольоване електрообладнання надсилаються сигнали (тестові впливи), при цьому вимірюють необхідні параметри, що характеризують реакцію електрообладнання на сигнали, і по цих параметрах оцінюється його технічний стан. Засобами діагностування функціональної групи визначається технічний стан електрообладнання під час роботи, причому ніяких зовнішніх впливів, що відбиваються на функціонуванні електрообладнання, не проводиться. При розробці засобів в першу чергу проводиться класифікація діагностичних параметрів, за допомогою яких визначається технічний стан електрообладнання, а також встановлюються межі зміни цих параметрів.

Досвід розробки та впровадження діагностування в практику експлуатації електрообладнання показує, що засоби діагностування доцільно розділити за наступним принципом:

1. Прості засоби для діагностування по обмеженому числу узагальнених діагностичних параметрів, що дозволяють визначати загальний технічний стан електроустаткування. Ці засоби призначаються для визначення технічного стану електрообладнання при технічному обслуговуванні, а також для виявлення найпростіших несправностей. До таких засобів належать прості переносні прилади.

2. Засоби для проведення повного діагностування і прогнозування, що дозволяють визначати технічний стан всіх елементів, що обмежують ресурс роботи або працездатність електрообладнання. Ці засоби призначені для проведення планового діагностування та пошуку несправностей електрообладнання.

3. Засоби для проведення доремонтного і післяремонтного діагностування, призначені для застосування в спеціалізованих електроремонтних підприємствах або ділянках з метою визначення номенклатури підлягають ремонту вузлів та деталей і якості ремонту електроустаткування за параметрами, які характеризують післяремонтний ресурс.

У залежності від призначення засоби для діагностування можуть розроблятися переносними, пересувними і стаціонарними. Важливим показником засобів для діагностування є ступінь їх автоматизації. Умовно засоби для діагностування поділяють на автоматизовані, автоматичні і ручного управління.

Оптимальний вибір діагностичних засобів повинен забезпечувати мінімальну вартість перевірки елементів, мінімум витрат від похибки перевірки елементів, а також максимальну економічну ефективність застосування засобів. Слід зазначити, що економічна ефективність застосування засобу, що розробляється, тим вища, чим більшу кількість електроустаткування можна продіагностувати з його допомогою, тобто чим вища його продуктивність.

3.4. Знос і пошкодження деталей і вузлів електрообладнання в процесі експлуатації

3.4.1. Закономірності процесів зносу деталей і вузлів електроустаткування

Незважаючи на різноманітність призначення, конструкційних форм, матеріалів, навантажень, умов експлуатації та інших факторів, процеси зношування деталей, вузлів електричних машин і апаратів, як і інших машин і механізмів, що мають спільні закономірності.

Звичайно процес зношування деталей умовно поділяють на три періоди (рис. 13).

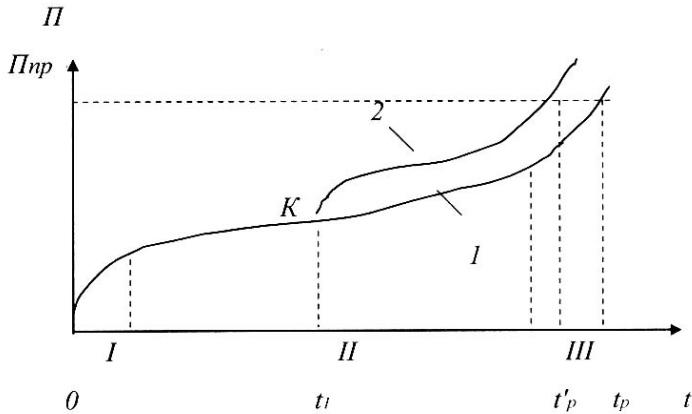


Рис. 13. Класична крива зносу:

- I — період приробітки; II — період нормального зношування;
- III — період інтенсивного зношування

У 1-му періоді приробітки інтенсивність зношування досить висока, тому що відбувається стирання нерівностей обробки і як би «пригін» сполучених поверхонь деталей. У 2-му періоді (нормального зношування) відбувається рівномірний з порівняно сталою швидкістю знос деталей. Зазвичай це найтриваліший період експлуатації деталі або вузла. 3-й період (інтенсивного зносу) характеризується різким збільшенням швидкості зносу даної деталі або вузла і пов'я-

заних з ними інших деталей і вузлів, збільшення зазорів і т.п. У 3-му періоді найбільш ймовірний вихід деталі з ладу або вона може послужити причиною виходу з ладу іншої, пов'язаної з нею деталі або вузла. У деяких випадках такий знос деталі та вузла не створює аварійну ситуацію, тобто не призводить до відмов, але робить роботу електричної машини або апарата економічно не вигідним.

Одним із основних заходів визначення справності деталі або вузла, тобто здатності виконувати задані функції, є встановлення граничних значень зносу або інших параметрів, що характеризують їх працездатність. Якщо зношування й інші параметри ще не вийшли за свої граничні значення, вважається, що деталь або вузол працюють задовільно. При виході зносу або параметрів за граничні значення деталь або вузол вважаються такими, що вийшли з ладу. На рис. 11 граничне значення зносу позначена на осі ординат P_{np} .

Число відмов будь-якого технічного пристрою за певний період (інтенсивність відмов в одиницю часу) є основною кількісною характеристикою його надійності.

Відмови електрообладнання, як машин і механізмів, поділяються на конструктивні, технологічні, експлуатаційні та знос.

Конструктивні відмови – це результат помилок і прорахунків при розробці конструкції обладнання. Ці відмови найчастіше виникають у 1-й період експлуатації електрообладнання. До особливостей конструктивних відмов можна віднести і те, що вони виникають майже у всіх машин або апаратів певного типу. Прикладом може бути вихід з ладу підшипників електродвигунів з алюмінієвими підшипниковими щитами, в які не запресовані сталеві втулки для посадки підшипників. Посадочні місця під підшипники в таких щитах швидко зношуються і частки металу підшипникового щита потрапляють у підшипник. Одночасний знос посадочних місць під підшипники, доріжок і тіл кочіння підшипників призводить до збільшення асиметрії положення ротора щодо розточування статора і в результаті – до зачіпанні ротора за статор.

Технологічні відмови електроустаткування обумовлені порушенням технологічних процесів виготовлення деталей та вузлів. Технологічні відмови, як правило, виникають у 1-й період експлуатації електрообладнання. Прикладом технологічних відмов служать відмови асинхронних електродвигунів, викликані обривами стрижнів

короткозамкнених обмоток роторів. Навіть при невеликих відхиленнях від температурного режиму заливки короткозамкненої обмотки в її стрижнях виникають несплавління, порожнечі і тріщини.

Експлуатаційні відмови виникають у випадках порушення правил технічної експлуатації електрообладнання, при невідповідності конструкції електрообладнання умов зовнішнього середовища або режимів роботи. Наприклад, несвочасна заміна мастила в підшипниках електричних машин призводить до відмов підшипникових вузлів, а установка електродвигунів захищеного виконання (А, А2 та ін.) на відкритому повітрі або у вологих приміщеннях - до виходу їх з ладу.

Відмови зносу електроустаткування обумовлені старінням матеріалів ізоляційної конструкції, виникненням корозії, зносом робочих поверхонь деталей та іншими причинами. Прикладом зносної відмови може служити відмова магнітного пускача в результаті зносу напайок нерухомих або рухомих контактів.

За даними практики експлуатації термін служби електрообладнання, як і процес зношуваності деталей, можна умовно розділити на три періоди. Прикладом правомірності такого поділу служать дані про відмови асинхронних електродвигунів. Першим є період приробітки, який відноситься до початку роботи електродвигунів і в якому спостерігається найбільше число відмов, обумовлених технологічними дефектами. У результаті вивчення характеру і причин відмов встановлено, що для асинхронних електродвигунів єдиних серій потужністю від 0,6 до 100 кВт період приробітки складає приблизно 1000 годин роботи.

Другий період (нормальної експлуатації) характеризується приблизною сталістю інтенсивності відмов в одиницю часу. У цей період основною причиною відмов є випадкові явища: робота на двох фазах при відсутності або неправильно налаштованому захисті, технологічні перевантаження, аварії механізму, приводом якого є електродвигун і ін.

Протягом третього періоду відмови виникають внаслідок зносу і старіння вузлів та деталей електродвигунів, особливо ізоляції обмоток.

Слід зазначити шкідливий вплив розбирання конструкції електрообладнання на процеси зношування деталей і вузлів. Як і для

будь-якої машини або механізму, для електричних машин і апаратів передчасне розбирання негативно впливає на подальшу працездатність. Особливо шкідливі розбирання, при яких порушується взаємне розташування сполучених деталей. Після демонтажу та наступної збірки, як би ретельно вони не були проведені, внаслідок зміни затягування з'єднань, деформації деталей, зміни взаємного розташування знову відбувається приробіток сполучених деталей, тобто виникає період підвищеної інтенсивності зносу. На рис. 11 крива 1 характеризує знос деталі для випадку, коли за період роботи до вичерпання свого ресурсу в момент часу t_p , тобто до досягнення граничного значення зносу P_{np} , деталь працювала в сполученні, яке не розбиралася. Якщо через певний час після початку експлуатації, наприклад, в момент часу t_1 , пару було розібрано, то залежність зносу цієї деталі від напрацювання, починаючи з моменту часу t_1 , буде відображати крива 2, так як в точці K знов почнеться період приробітки деталі після збирання сполучення. З рисунку також видно, що знос деталі після розбирання та складання сполучення досягає свого граничного значення P_{np} в момент часу t_p , тобто ресурс роботи деталі зменшиться.

3.4.2. Старіння, дефекти та пошкодження ізоляції обмоток електричних машин і апаратів

Обмотки є найбільш важливою і складною за умовами праці частиною електричних машин і апаратів. Вихід обмоток з ладу в більшості випадків обумовлений пошкодженнями ізоляції. Аналізом причин виходу з ладу обмоток електричних машин і апаратів в різних галузях народного господарства займалися багато дослідників. На підставі збору і статистичної обробки даних про експлуатацію близько 5,5 тис. асинхронних двигунів на промислових підприємствах встановлено, що понад 84% всіх відмов відбувається через різні пошкодження обмоток. Згідно з даними у електродвигунів, які працюють в сільському господарстві, 80% відмов виникають в результаті пошкодження ізоляції.

На обмотки й особливо на їх ізоляцію в процесі експлуатації діють електромагнітні сили, вібрація, температура, навколишнє середовище та інші фактори. Спільна дія перерахованих вище факторів призводить до незворотних процесів зміни структури та

хімічного складу ізоляції, тобто до старіння ізоляції. Крім того, в ізоляції можуть матися дефекти, що виникають як у процесі виготовлення матеріалів, з яких складається ізоляційна конструкція електричної машини або апарата (наприклад, шпилькові отвори або сторонні включення в шарі ізоляційного покриття обмотувальних проводів), так і при виготовленні самої ізоляційної конструкції. Особливо часто при укладанні обмоток пошкоджується виткова ізоляція, що значно скорочує термін їх служби. Використання при укладанні обмоток металевго інструменту часто призводить до продавлювання і прорізування ізоляційного шару проводів. Різкі перегини обмотувального дроту під час намотування також сприяють утворенню в ізоляції значних механічних напружень, внаслідок чого виникають тріщини.

Кількість дефектів у витковій ізоляції знижується при зменшенні коефіцієнта заповнення паза. Зменшення коефіцієнта заповнення паза на 2,5% і застосування «м'якого» інструменту при укладанні обмоток дозволяє підвищити надійність ізоляції електродвигунів на 5,5% [13, 14].

Розвиток місцевих дефектів зазвичай призводить до пошкоджень ізоляційних конструкцій у 1-й період роботи після введення електричних машин в експлуатацію. Як правило, такі uszkodження виникають у вигляді пробою межвиткової ізоляції. На надійність роботи обмоток також негативно впливає розтягнення проводів при намотуванні котушкових груп на намотувальних верстатах. Це розтягнення може досягати 5-7% довжини дроту.

У процесі роботи на обмотки електричних машин впливають електродинамічні і механічні зусилля, що досягають більших значень при пуску і реверсуванні. Так, пускові струми короткозамкнених електродвигунів перевищують номінальні в 5-7 разів, у зв'язку з чим на обмотки діють значні електродинамічні сили, значення яких пропорційні квадрату струмів. Під дією цих зусиль в ізоляції виникають тріщини, а також механічні пошкодження.

Особливо небезпечною для ізоляції обмоток електричних машин є вібрація, яка виникає у зв'язку з неврівноваженістю обертових частин, вигином валу, при зносі підшипників, при обриві стрижнів короткозамкнених обмоток роторів і з інших причин. Вібрація може також передаватися на електричні машини з боку механізмів, приводом яких вони є. Викликані вібрацією сили діють протягом усього

періоду роботи електричних машин і призводять до втрати механічної та електричної міцності ізоляції обмотувальних проводів і компаунда, яким просочують обмотку для її цементації. Все це може також призвести до пошкодження ізоляції. Вібрація може скоротити термін служби ізоляції в кілька разів.

До зносу виткової ізоляції може приводити тертя між витками і витків об корпусну ізоляцію, що виникає в електричних машинах із-за різних коефіцієнтів теплового розширення міді обмоток і активної сталі сердечників. Зазвичай таке тертя відбувається при нагріванні електричних машин під час пуску і роботи, а також при охолодженні після її вимикання з мережі.

Певний вплив на технічний стан ізоляції електричних машин надає теплове та електричне старіння. Важливими характеристиками ізоляційних конструкцій електричних машин і апаратів є теплостійкість і нагрівостійкість. Теплостійкість характеризує здатність ізоляційних матеріалів зберігати свої властивості при короткочасному нагріву, а нагрівостійкість – зберігати властивості без істотного погіршення протягом тривалого періоду, якщо температура не перевищує допустимих значень, встановлених для даного температурного індексу ізоляції. Нагрівостійкість в основному визначається швидкістю старіння ізоляції.

Найважливішим показником, що використовується при експлуатації, діагностуванні та прогнозуванні працездатності ізоляції є термін її служби. Особливу увагу з боку дослідників було приділено встановленню залежності терміну служби ізоляції від температури, при якій вона працює. У результаті було сформульовано «правило восьми градусів». Згідно з цим правилом, підвищення температури на кожні вісім градусів призводить до скорочення терміну служби ізоляції вдвічі. Аналітично «правило восьми градусів» записується таким виразом:

$$T = T_0 2^{\frac{\Theta}{\Delta\Theta}} = T_0 e^{-0,0866\Theta}, \quad (98)$$

де Θ – температура нагріву ізоляції;

T – термін служби ізоляції, років;

T_0 – строк служби ізоляції при температурі $\Theta = 0$, років;

$\Delta\Theta$ – підвищення температури, при якій термін служби скорочується в два рази.

Надалі було уточнено, що для ізоляційних матеріалів з температурним індексом (ТІ) 105 °С $\Delta\Theta$ рівно 8 °С, для матеріалів з ТІ °С – 10 °С, а для ТІ більше 180 °С – 12 °С.

Незважаючи на те, що вираз (98) встановлено на підставі великого обсягу експериментального матеріалу, його використання при прогнозуванні ресурсу роботи електрообладнання у багатьох випадках не призводить до отримання достатньо достовірних результатів.

Іншим шляхом визначення терміну служби ізоляції з урахуванням впливу температури є використання загальних законів кінетики хімічних реакцій, встановлених Вант Гоффом і Арреніусом.

Якщо відомий термін служби ізоляції T_1 при температурі θ_1 , то термін служби T_2 при температурі θ_2 можна визначити за формулою:

$$T_2 = T_1 e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} \right)} \quad (99)$$

Електричне старіння під впливом електричних полів схильна ізоляція високовольтних машин, причому практичний вплив полів виявляється в ізоляції обмоток електричних машин напругою 6 кВ і вище. Особливу загрозу для електричних машин, що пропрацювали певний час, ізоляція яких має певний ступінь старіння, мають комутаційні перенапруги, так як електрична міцність їх ізоляції знижена. Комутаційні перенапруги можуть перевищувати амплітудне значення напруги живлення в 7 разів.

Великий вплив на прискорення процесу старіння ізоляції робить волога. В основному проникнення вологи в ізоляцію обмоток електричних машин відбувається в неробочі періоди, особливо при охолодженні машин, коли тиск в порах і капілярах ізоляції нижче атмосферного. Проникнення вологи викликає гідролітичні руйнування ізоляційних матеріалів, особливо тих, що мають волокнисту структуру. Періодичне проникнення вологи в ізоляцію та її видалення підсушуванням під час роботи електричних машин сприяє розвитку пір в ізоляції. При цьому просочування обмоток компаундіруючими лаками тільки сповільнює процес зволоження і підсушування ізоляції, а не виключає його. Зволоження є однією з головних причин пробою ізоляції обмоток електричних машин, осо-

бливо намотаних проводами з бавовняною опліткою, що має високу гігроскопічність. Проникаюча в пори і тріщини волога значно знижує електричну міцність ізоляції. Небезпечним є також зволоження забруднених обмоток. При зволоженні різко знижується напруга пробою в місцях дефектів і тим самим створюються умови для виникнення дугових розрядів при порівняно низьких значеннях перенапруг. Експериментальні дослідження показали, що при зволоженні обмоток з дефектами в ізоляції опір ізоляції знижується в кілька десятків разів і при цьому різко збільшуються струми витoku через ізоляцію. У цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходить струм, що руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток або замикання обмоток на землю. Електричні машини, що мають такі дефекти ізоляції, потребують заміни обмоток, тобто капітального ремонту.

Процес розвитку дефектів у міжвиткової ізоляції всипних обмоток електричних машин можна представити таким чином. Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища та інших факторів протягом якогось часу відбувається поступове старіння ізоляції, що виражається в її усиханні, випаровуванні летких компонентів, втрати еластичності, виникненні пір і тріщин. У найбільш "слабких" місцях ізоляції виникають місцеві дефекти, що мають низьке значення напруги пробою. У моменти перенапруг (атмосферних або комутаційних) в місці дефекту виникають іскрові розряди, які повторюються при кожному наступному перенапруженні, значення якого перевищує напруга пробою місця дефекту. Внаслідок дії розрядів пробивна напруга поступово зменшується до тих пір, поки в місці дефекту починає виникати дуговий розряд від робочої напруги між витками. У цьому випадку відбувається повне міжвиткове замикання і обмотка електродвигуна виходить з ладу.

У заглибних електродвигунів, що застосовуються для приводу електронасосів водопідійомних свердловин, обмотки статорів намотують проводом ПЕВВП, що має двошарову ізоляцію. Зовнішній шар ізоляції, товщиною від 0,4 до 0,8 мм в залежності від розміру дроту, виготовляють з полівінілхлоридного пластикату ПХВ – 489, а внутрішній – товщиною 0,05 мм – з емальлаку «вініфлекс». Застосовуючи двошарову ізоляцію, розробники намагалися підвищити працездатність дроту, так як обмотки заглибних електродвигунів працюють у воді.

Результати аналізу пошкоджень ізоляції що надходять у капітальний ремонт заглиблених електродвигунів показують, що 72,6% ушкоджень ізоляції відноситься до пробів в пазах і в лобових частинах. Слід зазначити, що знос радіальних підшипників заглиблених електродвигунів також приводить до зачіпання активної сталі ротора за статор і, як наслідок, до пошкодження ізоляції в місці зачіпання. Тому можна припускати, що 24,16% випадків відмов ізоляції обмоток викликано надмірним зносом підшипників електродвигунів.

Дослідження працездатності 80 макетів обмоток протягом 21 тис. годин роботи в умовах, що імітують умови роботи обмоток заглиблених електродвигунів, дозволило встановити основну причину пробую ізоляції обмоток - розвиток місцевих дефектів, що є в ізоляції [5, 13]. Цей висновок підтверджується тим, що пробивна напруга ізоляції пошкоджених макетів (при виключенні місця пошкодження) перевищувала 5 кВ, а ізоляція проводів більшості непошкоджених макетів обмоток після напрацювання 12 тис. год. витримувала без пробую випробувальну напругу 10 кВ.

Було встановлено, що пробій ізоляції обмоток статорів, як правило, викликаний не загальним старінням, а розвитком місцевих дефектів в ізоляції, які виникають при виготовленні дроту (сторонні вклучення) і механічними пошкодженнями під час намотування обмоток. Внаслідок розвитку місцевих дефектів у полівінілхлоридному шарі ізоляції виникають канали і тріщини, через які надходить вода до 2-го шару ізоляції з емальлаку. У зв'язку з тим, що емальлак не пристосований до роботи у воді, через певний час спільний вплив води, напруги і температури руйнує і цей ізоляційний шар.

Також слід зазначити, що у заглиблених електродвигунах дефекти ізоляції місць з'єднань, що зустрічаються в умовах експлуатації, в переважній більшості випадків виникають внаслідок неякісного намотування ізоляційної стрічки та перегрівання ізоляції під час проходження через місце з'єднання великих струмів при перевантаженні електродвигунів і при короткому замиканні. Так, при підвищенні температури ізоляції від 15 до 50 °С струми витокую збільшуються в 10-15 разів.

Аналіз пошкоджень електричних машин показує, що ізоляція обмоток є одним з найважливіших елементів конструкції, що обмежують працездатність машин. Технічний стан ізоляції необхідно контролювати в процесі експлуатації.

3.4.3. Пошкодження і дефекти обмоток роторів і якорів електричних машин

Характер старіння і пошкоджень ізоляції всипних обмоток роторів і якорів електричних машин змінного і постійного струмів аналогічний зносу і пошкодженню ізоляції обмоток статорів, у зв'язку з чим у подальшому викладі матеріали про старіння і пошкодження ізоляції не наводяться.

У колекторних машинах найчастіше спостерігаються порушення контактів у місцях пайки виводів обмоток до колектору. У асинхронних електродвигунів з фазним ротором також спостерігаються порушення контактів у місці приєднання виводів обмоток роторів до контактних кілець. У короткозамкнених обмотках роторів асинхронних електродвигунів найбільш часто виникають обриви і ослаблення перерізу стрижнів обмотки. Обстеження електродвигунів показало, що 3,8% електродвигунів серій АІР та АІУ мають обриви стрижнів короткозамкненої обмотки. З них 1,05% електродвигунів мають обрив одного стрижня, 0,55 – двох і 2,2% – трьох і більше стрижнів. Обриви стрижнів призводять до виникнення вібрації електродвигунів і виходу їх з ладу.

Порівняно велика кількість асинхронних електродвигунів має ослаблений перетин стрижнів короткозамкненої обмотки. Так, за даними обстеження 6,8% електродвигунів мають ослаблені перетини одного стрижня, 10,5% – двох і 26,3% – трьох і більше стрижнів. Обриви і ослаблення перерізу стрижнів виникають тому, що з точки зору ливарного виробництва клітина ротора є нетехнологічною конструкцією. Внаслідок наявності різких переходів від порівняно тонких стрижнів до масивних кілець і невеликої маси алюмінієвого сплаву в порівнянні з масою пакету ротора, сплав дуже швидко охолоджується. Тому в стрижнях часто виникають ослаблення та несплавління. Обриви стрижнів виникають також внаслідок усадки алюмінієвого сплаву при швидкому охолодженні. Тріщини в короткозамикаючих кільцях виникають при заливці перегрітого або окисленого металу.

Слід зазначити, що більшість обривів стрижнів не виявляються під час контрольних випробувань після виготовлення електродвигунів.

З наведених вище даних випливає, що стан обмоток роторів і якорів необхідно контролювати в процесі експлуатації електричних машин через певні періоди часу.

3.4.4. Знос і пошкодження підшипників електричних машин

Статистичні дані і аналіз пошкоджень обертових електричних машин свідчать, що знос і вихід з ладу підшипників, поряд з виходом з ладу ізоляції обмоток, є найбільш частими причинами відмов електричних машин. У переважній більшості випадків при зносі підшипників ротор (якір) починає зачіпати за активну сталь статора (індуктора), в місці зачіпання різко збільшується температура або відбувається зсув аркушів в зубцях, що призводить до пошкодження ізоляції обмоток.

Внаслідок ушкоджень підшипників виникає 20-25% відмов електродвигунів серії АІР та 10-40% серії АІУ.

Конструкція підшипникових вузлів електричних машин потужністю до 125 кВт порівняно проста. В електричних машинах використовують кулькові і роликові підшипники кочення та підшипники ковзання. У переважній більшості електричних машин застосовують підшипники кочення. У електродвигунах єдиної серії АІР з висотою осей обертання 56-132 мм встановлюють кулькові підшипники.

У електродвигунах з більшою висотою обертання з боку приводу встановлюють роликові, а з протилежного боку - кулькові підшипники. Найбільш поширеною причиною виходу з ладу підшипників кочення є знос поверхні бігових доріжок і тіл кочення, внаслідок чого збільшується радіальний зазор в підшипниках.

Під час роботи електричних машин змащення в підшипниках старіє і забруднюється пилом і абразивними частинками, які потрапляють у підшипник з навколишнього середовища або з електричної машини (металевий пил, продукти корозії і зносу щіток та ін.). При інтенсивному повертанні зовнішнього кільця підшипника внаслідок ослаблення посадки в підшипниковому щиті частинки матеріалу щита також потрапляють у підшипник. Дуже часто це явище спостерігається у електродвигунах з підшипниковими щитами, виготовленими з алюмінієвого сплаву [15].

Однією з причин виходу з ладу підшипників також є неправильна їх посадка на вал. При напресуванні підшипників на вал з великим натягом виникає защемлення тіл кочення, підвищене нагрівання і вигоряння мастила. У цих випадках підшипники швидко зношуються. При слабкій посадці підшипників їх внутрішні кільця обертаються на валу, нагріваються і розширюються, внаслідок чого затискаються тіла кочення і підшипник також виходить з ладу.

В електродвигунах найбільш часто виходять з ладу підшипники з боку кінця валу із шпоночною канавкою, що пояснюється більшим навантаженням підшипників, встановлених з боку механізмів, що приводяться в рух електродвигунами. У машинах постійного струму відмови підшипників з боку колектору становлять 60-90% всіх відмов підшипників. Таке явище пов'язане з інтенсивним попаданням у підшипники пилу, що виникає при терті щіток об поверхню колектору.

Великий вплив на термін служби підшипників, поряд з іншими факторами, надає вібрація електричних машин в результаті нерівноваженості обертових частин, передачі вібрації від механізму електричної машини та ін.

Довговічність підшипників розраховується виходячи з умов втомної міцності, на яку основний вплив при нормальній експлуатації надають навантаження і швидкість обертання.

3.4.5. Знос і пошкодження активної сталі електричних машин

У процесі роботи активна сталь електричних машин схильна до зносу, особливо інтенсивний знос спостерігається на внутрішній поверхні розточки сердечника статора. Причинами зносу активної сталі є корозія поверхні і наявність у повітряному зазорі пилу, піску та інших абразивних частинок.

Для визначення значення зносу активної сталі короткозамкнених асинхронних електродвигунів в процесі експлуатації були виміряні внутрішні діаметри статорів і діаметри роторів 142 асинхронних електродвигунів єдиних серій 1-5-го габаритів. Вимірювання пока-

зали, що 68% електродвигунів мають повітряний зазор, що перевищує своє номінальне значення.

Крім зносу, в умовах експлуатації зустрічаються вм'ятини, сліди оплавлення дугою поверхні і розпушення зубців крайніх листів активної сталі.

Слід відзначити порівняно велику швидкість зношування активної сталі заглибних електродвигунів у порівнянні з електродвигунами єдиних серій. Найбільш часто у заглибних електродвигунах зустрічаються знос внутрішній поверхні розточки сердечника статора, зсув окремих листів активної сталі в зубчатій зоні і розпушення зубців. Знос поверхні розточки статора, як правило, виникає у зв'язку з корозією і зачіпанні ротора за статор. Посилена корозія активної сталі викликана тим, що внутрішня порожнина електродвигунів заповнюється водою. Особливо піддається корозії зубчата зона активної сталі статора. Великий знос активної сталі статора і ротора спостерігається при зачіпанні ротора за статор при зносі радіальних підшипників (вище допустимого значення) або при вигині валу електродвигунів. Знос поверхні по довжині розточення статора неоднаковий. Зазвичай по краях статора знос найбільший, а при наближенні до середини його значення зменшується. Овальність розточки статора, як правило, не спостерігається.

3.4.6. Знос і пошкодження колекторів, контактних кілець і щіткового механізму електричних машин

Колектори відносяться до так званих «слабких» вузлів електричних машин. Проаналізовано, що у 85% обстежених пошкоджених якорів спостерігався знос колектору і лише у 10% – пошкодження обмотки. Під час роботи колектори електричних машин зношуються, на їх пластинах виникають ризики і канавки і спостерігається биття робочої поверхні. Биття поверхні колектору, крім зносу, може викликатися рухливістю окремих пластин при значному зносі колектору та при ослабленні його пресування.

Великий вплив на знос колекторів надають умови роботи (ступінь іскріння, нагрів в контакті та ін.), швидкість ковзання і ве-

личина тиску щіток на поверхню, щільність струму в щітках. При надмірному натисканні щіток різко збільшується сила тертя між щітками і колектором, що призводить до підвищеного нагріву і зносу його поверхні (механічний знос). У випадку слабого натискання щіток між щітками і колекторними пластинами виникає інтенсивне іскріння, що призводить до швидкого зносу колекторних пластин (електричний знос). При правильній установці на нейтраль іскріння щіток в процесі експлуатації виникає через їх вібрацію при взаємодії зі зношеною поверхнею колектору, при виступі пластин колектору та при появі овальності поверхні колектору.

У процесі експлуатації також спостерігається замикання пластин на корпус і між собою, підгорання і виступання міканітової ізоляції між пластинами. Замикання пластин колектору на корпус найбільш часто спостерігається в електричних машинах старих конструкцій при пробі ізоляційних конусів, а замикання між пластинами - при забрудненні колектору мідновугільним пилом, а також при пробі ізоляції між пластинами і при механічному пошкодженні поверхні пластин. Крім того, в процесі експлуатації спостерігається відпайка проводів обмотки якоря від колектору. В основному, це буває при неякісній пайці проводів під час виготовлення електричної машини.

У контактних кільцях електричних машин найбільш часто зношується робоча поверхня, виникають подряпини, шорсткості або плями від підгорання. Внаслідок зносу також виникає биття поверхні контактних кілець.

Порівняно часто в електричних машинах старих конструкцій спостерігається порушення контакту між вивідною шпилькою та контактними кільцями або пошкодження ізоляції шпильок контактних кілець. Досить часто спостерігаються випадки забруднення поверхні між контактними кільцями, що викликає перекриття ізоляції між ними електричною дугою.

Основними несправностями щіткового механізму є обгорання або механічне пошкодження обойм, втрата пружинами своїх властивостей, ослаблення затягування в контактних з'єднаннях, наявність тріщин в траверсі і пошкодження ізоляції пальців щікотримачів. З усіх деталей щіткового вузла найбільш схильні до зносу щітки.

Особливо швидко зношуються щітки при великих навантаженнях струмових, що зустрічаються у обертових зварювальних перетворювачах і зварювальних генераторах. У результаті зносу щіток по висоті зменшується натискання на них пружин, тобто натискання в контакті між щіткою і колектором або контактним кільцем, в результаті чого між щіткою і колектором або кільцем виникає інтенсивне іскріння, яке призводить до прискорення процесу зносу як щіток, так і колектору.

3.4.7. Знос і пошкодження апаратів управління і захисту електричних машин і установок

Від технічного стану низьковольтних апаратів (магнітних пускачів, автоматичних вимикачів, реле, перемикачів тощо) в значній мірі залежить довговічність і надійність роботи електроприводів і електричних установок. Відмови низьковольтних апаратів можна розділити на два види: раптові і поступові. Раптові відмови настають, як правило, при стрибкоподібній зміні одного або декількох параметрів функціональних вузлів апаратів. Поступові відмови настають внаслідок зносу і старіння функціональних вузлів і деталей. Найбільше число відмов низьковольтних апаратів спостерігається в контактах, обмотках котушок і механічної частини.

Відмови контактів електричних апаратів (магнітних пускачів, автоматичних вимикачів, реле, перемикачів, рубильників тощо) у більшості випадків пояснюються важкими умовами праці. На знос контактів впливають такі фактори, як струм і напруга, рід струму, частота включення і виключення, характер навантаження, зовнішнє середовище (температура, вологість і запиленість повітря, наявність парів або газів), вібрація та ін. У зв'язку з цим спостерігається частий вихід контактів з ладу. Особливо це стосується контактів апаратів, що працюють у важких режимах.

У електромагнітних реле 60% відмов припадає на контакти, а інші 40% відмов приблизно порівну розподіляються між обмотками і механічною частиною. Найбільш часто в умовах експлуатації відмови контактів відбуваються через безпосередній знос контактів.

Одним з найбільш важливих факторів, що впливають на знос контактів, є виробництво електричної дуги, що виникає при їх розмиканні.

Дуговий розряд при розмиканні контактів викликає розплавлення і випаровування матеріалу, з якого виготовлені контакти. Ступінь зносу контактів залежить від струму дуги, часу її горіння, матеріалу контактів і їх форми. При великих струмах і нечастих включеннях й виключеннях знос контактів можна вважати пропорційним числу вимкнень. При відносно невеликих струмах і частих включеннях знос контактів в значній мірі залежить від частоти включення, яка багато в чому визначає температуру контактів і активність процесів окислення їх поверхонь.

Електричний знос контактів, зазвичай перевищує механічний знос, відбувається при включенні і відключенні контактів під напругою. При виключенні між контактами виникає місток розплавленого металу, який випаровується і розбризкується тим інтенсивніше, чим більша сила струму в момент розмикання контактів. Електричний знос контактів виникає також при вискакуванні рухомих контактів від нерухомих при ударі в момент їхнього зіткнення.

У апаратів постійного струму відбувається електрична ерозія контактів, при якій частина металу переноситься з одного контакту на інший, внаслідок чого на одних контактах виникають поглиблення, а на інших - підвищення з перенесеного металу. Механічний знос виникає при ударах, що відбуваються при замиканні контактів, а також при терті поверхонь контактів. В електричних колах з малим значенням струму досить часто виникають відмови незамикання, викликані утворенням окисних плівок на поверхні контактів.

Відмови обмоток котушок найбільш часто виникають через обриви і міжвиткових замикань. Провід котушок зазвичай обривається в місцях з низькою якістю пайки при механічних впливах на дроти і при їх вібрації. Міжвиткове замикання обмоток котушок низьковольтних апаратів виникає при пошкодженні ізоляції проводів, з яких намотані котушки і при довготривалому проходженні струму, значення якого перевищує номінальне.

Струм в котушці найбільш часто збільшується при заклинюванні в проміжних положеннях або при нещільному приляганні робочих поверхонь магнітопроводів апаратів. Крім того, ізоляція

пошкоджується від перенапруги під час включення і виключення живлення обмотки котушки, а також з інших причин.

Для визначення струму, що проходить через короткозамкнені витки обмотки, в котушках магнітних пускачів ПМЕ – 200, намотаних проводом ПЕТВ діаметром 0,18 мм, закорочувалися 50 і 100 витків. Результати вимірювання показали, що при повному металевому замиканні 50 витків струм у них перевищує номінальний струм котушки приблизно в 30 разів. За наявності 100 короткозамкнених витків струм у витках перевищує номінальний приблизно в 25 разів [8]. Якщо між витками є неповне коротке замикання, тобто місце дефекту ізоляції має певний опір, то струм в короткозамкнених витках різко зменшується і при опорі 90 Ом дорівнює номінальному струму котушки.

Отже, при опорі в місці дефекту міжвиткової ізоляції менше 90 Ом у витках проходить струм більше номінального в декілька разів, що призводить до перегрівання котушки, прискореного розвитку наявного і виникненню нових дефектів в ізоляції і до виходу обмотки котушки пускача з ладу.

Таким чином, в умовах експлуатації необхідно не тільки виявляти короткозамкнені витки з повним металевим замиканням, але й ослаблені ділянки ізоляції, які можуть привести до виходу котушки з ладу. У зв'язку з цим, для виявлення ослаблених місць в ізоляції рекомендується прикладати до виткової ізоляції напругу, яка в 10-15 разів перевищує номінальну. Це дає можливість виявляти дефекти в початковій стадії їх розвитку та вживати необхідних заходів.

Пробій ізоляції котушок на корпус спостерігається тільки в безкаркасних конструкціях котушок.

Відмови механічних систем низьковольтної апаратури найбільш часто виникають у зв'язку зі зносом і поломками деталей, а також через перекоси, зачіпання і заклинювання рухомої системи. До відмов механічних систем належить близько 20% всіх відмов низьковольтних апаратів.

Дослідження показали, що відмови механічних систем у більшості випадків є поступові відмови, що виникають внаслідок зношення деталей та вузлів.

Контрольні запитання до розділу

1. Як здійснюється визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностуванню?
2. Проаналізуйте закономірності процесів зносу деталей і вузлів.
3. Які процеси впливають на зниження надійності ізоляції обмоток електричних машин і апаратів?
4. Наведить співвідношення для визначення терміну служби ізоляції з урахуванням впливу температури.
5. Перерахуйте пошкодження і дефекти обмоток ротора і якоря електричних машин, що найчастіше зустрічаються.
6. Що впливає на знос і пошкодження активної сталі електричних машин?
7. Які процеси впливають на знос і пошкодження колекторів, контактних кілець і щіткового механізму електричних машин?

4. МЕТОДИ, ПРИЛАДИ І СХЕМИ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

4.1. Діагностування обмоток електричних машин

Пошкодження чи вихід обмоток з ладу призводять до відмов, усунення яких у більшості випадків вимагає проведення капітального ремонту електричних машин. Основною причиною виходу обмоток з ладу є пробій ізоляції між витками або на корпус.

У процесі експлуатації в ізоляції відбуваються зміни хімічного і фізичного характеру, в результаті чого параметри ізоляції всієї електричної машини чи окремих її частин змінюються. Якщо пошкодження поширюється практично на всю ізоляцію або на її складову частину (розтріскування внаслідок перегріву обмотки тощо), такий дефект називається розподіленим. Якщо зміна властивостей відбулася в певному місці ізоляції, то дефект називають місцевим (локальним). Найбільш загрозливими формами місцевих дефектів в ізоляції є розриви, тріщини, отвори або канали [15, 37].

Параметри, що визначають технічний стан ізоляції електричних машин, звичайно залежать від багатьох факторів (температури, напруги, вологості та ін.). Тому для отримання порівняльних результатів аналізовані параметри необхідно вимірювати в однакових умовах. Якщо цього досягти неможливо, то отримані значення параметрів перераховують для порівняння, наприклад, опір ізоляції призводять до певної температури.

Поряд з визначенням працездатності обмоток шляхом вимірювання параметрів приладами, велике значення для розібраних електричних машин має ретельний зовнішній огляд обмоток. Зазвичай під час зовнішнього огляду визначають технічний стан всіх пазових клинів, бандажів кріплення лобових частин обмоток і якорів, ізоляції з'єднань між котушковими групами обмоток, між проводами обмоток і вивідними кінцями; ступінь забруднення обмоток. При зо-

внiшньому оглядi необхідно визначити, чи перегрiвалися обмотки пiд час перевантажень, заклинювання привiдних механiзмiв i машин i з iнших причин. В обмотках проводiв з емалевою iзоляцiєю ознакою перегрiву є потемнiння iзоляцiї виткiв або катушок, по яких проходив великий струм.

4.1.1. Вимiрювання опору обмоток постiйного струму

Вимiрювання опору обмоток електричних машин постiйного струму дозволяє виявляти обриви в обмотках, дефекти у з'єднаннях та iншi ушкодження. Значення опорiв, якi вимiрюють при експлуатацiї електричних машин, знаходяться в широкому дiапазонi - вiд сотих часток до сотень i тисяч Ом.

На практицi застосовують кiлька методiв вимiрювання опору обмоток постiйному струму: омметром, за допомогою вольтметра i амперметра, одинарними або подвiйними мостами. Найменш точним є вимiрювання опору омметром, тому його застосовують у бiльшостi випадкiв для попередньої оцiнки значення опору. Омметри зазвичай розрахованi на вимiр опорiв вiд 1 Ом до 100 кОм.

Метод вольтметра-амперметра заснований на вимiрюванні струму, що проходить через обмотку i втрат напруги в нiй. При застосуванні цього методу використовують два варiанти схеми включення вольтметра. Амперметр завжди включають послiдовно з вимiрюваною обмоткою i повнiстю зарядженою батареєю. Якщо опiр обмотки невеликий, вольтметр приєднують згiдно з 1-м варiантом на затискачi обмотки. У цьому випадку збiльшення струму, що вимiрюється амперметром (викликане включенням вольтметра), незначне, тому що вольтметр має великий опiр. Опiр обмотки для цього випадку визначають за формулою:

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_g}}, \quad (100)$$

де U – напруга, яка показує вольтметр, В;

I – струм, що вимiрюється амперметром, А;

R_g – опiр вольтметра, Ом.

При вимірюванні великих опорів застосовують 2-й варіант, при якому вольтметр приєднують до затискачів джерела живлення. При цьому опір обмотки визначають з виразу:

$$R = \frac{U - IR_a}{I}, \quad (101)$$

де R_a – опір амперметра, Ом.

Для виключення нагрівання обмотки під час вимірювань струм в обмотці встановлюють не більше 15-20% номінального. Метод вольтметра-амперметра забезпечує порівняно високу точність вимірювання опорів (0,3-0,5%), якщо при вимірах використовують вольтметри і амперметри класу 0,5 або 0,2.

Для одержання порівняльних результатів найбільш зручно вимірювати опір обмоток постійного струму в практично холодному стані електричних машин і апаратів, коли температура обмоток відрізняється від температури навколишнього повітря не більше ніж на 3°C. Якщо опір обмотки при даній температурі необхідно привести до іншої температури, то зручно користуватися формулою:

$$R_0 = \frac{R_1}{1 + \alpha(\theta_1 - \theta_0)}, \quad (102)$$

де R_0 – опір при температурі, до якої потрібно привести опір обмотки, Ом;

R_1 – виміряний опір обмотки, Ом;

θ_1 – середня температура обмотки при вимірюванні, °С (К);

θ_0 – температура, до якої необхідно привести опір, °С (К);

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу проводів обмотки, град⁻¹ (0,004 для міді і 0,00385 для алюмінію).

4.1.2. Вимірювання опору ізоляції

Опір ізоляції є відношенням доданої до ізоляції напруги до струму витоку. Зазвичай опір ізоляції складається з поверхневого R_n і внутрішнього (об'ємного) $R_{вн}$ опорів. З огляду на сказане вище, опір ізоляції записується виразом:

$$R_{из} = \frac{R_n \cdot R_{вн}}{R_n + R_{вн}}. \quad (103)$$

Значення опору ізоляції залежить від стану ізоляції. Якщо ізоляція суха, вимірюванням опору виявити дефекти майже неможливо. Ймовірність виявлення дефектів ізоляції в таких випадках підвищується зі збільшенням напруги, при якому проводять виміри. За результатами, отриманими при вимірюванні опору ізоляції, можна визначати стан сильно пошкодженої, зволоженої або забрудненої ізоляції.

У нашій країні опір ізоляції електричних машин в процесі експлуатації, як правило, не нормується. У закордонній технічній літературі наведено кілька формул для визначення допустимого значення опору ізоляції статорів електричних машин змінного струму, але вони придатні тільки для ізоляційних матеріалів, що застосовуються в закордонному електромашинобудуванні.

Для електричних машин вітчизняного виробництва нижня межа допустимого значення опору ізоляції при контрольних випробуваннях після виготовлення машини розраховують за формулою:

$$R_{из} = \frac{U}{1000 + P/100}, \quad (104)$$

де U – номінальна напруга обмотки машини, В;

P – номінальна потужність машини, кВА (для машин постійного струму кВт).

Слід мати на увазі, що розраховане за цією формулою значення опору ізоляції відповідає опору при робочій температурі обмоток.

У технічній літературі [13] приводять допустимі значення опору ізоляції електричних машин, що ґрунтуються на досвіді експлуатації. В умовах експлуатації опір ізоляції зазвичай вимірюють при різних температурах. Температура ізоляції залежить від багатьох факторів (температури навколишнього повітря, температури обмоток машини, проміжку часу між відключенням машини з електричної мережі і вимірами та ін.) Для порівняння результатів, отриманих при вимірюванні, дані опору ізоляції необхідно перерахувати, при цьому привести їх до однієї температури.

4.1.3. Діагностування міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин

Пошкодження міжвиткової ізоляції обмоток є однією з найбільш широко поширених причин виходу з ладу асинхронних електродвигунів. Для деяких типів електродвигунів в 1-й період роботи (до 1000 год.) міжвиткові замикання складають до 60% всіх відмов.

Статори електричних машин, які широко застосовуються в народному господарстві, як правило, мають всипну обмотку, намотану проводами круглого перерізу. Максимальний діаметр проводів для виготовлення всипних обмоток електричних машин потужністю до 100 кВт дорівнює 1,62 мм.

Для намотування обмоток асинхронних електродвигунів зазвичай застосовують проводи марки ПЕТВ.

Ізоляція між витками всипних обмоток електричних машин в більшості випадків складається з двох шарів емалі, якою покриті два розташованих поряд провідника. Крім того, в місцях обмотки, де витки обмотувального дроту не щільно прилягають один до одного, між витками є просочувальний шар лаку, що заповнює порожнечі між проводами. Як приведено в довідкових таблицях, товщина ізоляційного шару проводів ПЕВ і ПЕТВ, якими найчастіше намотують обмотки електричних машин, становить від 0,04 до 0,12 мм.

Напряга між двома поруч розташованими витками обмоток електричних машин визначається з виразу:

$$U_{мв} = U_{\phi} / \omega_{\phi}, \quad (105)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга обмотки. В;

ω_{ϕ} – кількість послідовно включених витків обмотки в фазі.

Зазвичай міжвиткова напруга в найбільш поширених в народному господарстві асинхронних електродвигунах з короткозамкненим ротором не перевищує 10-15 В. Неушкоджена емалева ізоляція проводів, з яких намотуються обмотки електричних машин, має досить високу електричну міцність (4-6 кВ), однак навіть у нових проводах зустрічаються точкові пошкодження шару ізоляційної емалі. Ці ушкодження в умовах експлуатації розвиваються і на їх місці можуть виникнути місцеві осередки ушкоджень міжвиткової ізоляції, тобто місцеві дефекти. Крім того, в процесі роботи електричних

машин під дією тривалої теплових та механічних навантажень в шарі ізоляції проводів виникають мікроскопічні тріщини і пори, які також збільшуються і призводять до виходу обмоток з ладу.

Розтріскуванню шару ізоляції проводів також сприяє різниця між коефіцієнтами теплового розширення міді і емалевою плівкою, внаслідок чого за різких змін температури в емалевій ізоляції виникають додаткові механічні напруги.

У зв'язку з малою товщиною ізоляційне покриття проводів досить часто пошкоджується при укладанні обмотки в пази електричних машин, особливо при використанні металевого інструменту. У процесі роботи ці ушкодження також розвиваються, і на їх місці виникає дефект ізоляції.

Основним параметром, що визначає технічний стан ізоляції, є її електрична міцність, що оцінюється значенням пробивної напруги. Як було зазначено раніше, пробивна напруга непошкоджених проводів з емалевою ізоляцією складає 4-6 кВ. Створити таку напругу на міжвитковій ізоляції електричних машин з виспними обмотками практично неможливо, тому що в цьому випадку до ізоляції обмоток відносно корпусу прикладалася б напруга, що перевищує десятки кіловольт, що призвело б до пробою корпусної ізоляції обмотки. Для виключення імовірності пробою корпусних ізоляцій при діагностуванні міжвиткової ізоляції до обмоток електричних машин напругою 380 В можна прикладати напругу не вище 2,5-3 кВ, у зв'язку з чим при діагностуванні реально можна виявити дефекти в міжвитковій ізоляції на певній стадії її розвитку.

Для вивчення процесів розвитку дефектів у міжвитковій ізоляції були отримані залежності пробивної напруги місця дефекту (електричного пробою) ізоляції між двома витками від часу горіння дуги. Для цього високою напругою пробивалася ізоляція між витками проводів ПЕТВ, потім визначалася напруга, яка виникла, в місці пробою дуги, і під цією напругою витки витримувалися протягом 10 с. Після відключення напруга знову піднімалась до моменту виникнення дуги і витримувалася протягом 20 с.

Збільшуючи тривалість горіння дуги при кожному наступному підйомі напруги на 10 с, досліди проводилися до тих пір, поки не відбувалося повне коротке замикання між витками. Так, після 1-го

пробою для досліджених ушкоджень міжвиткової ізоляції зниження напруги з 400-1500 В до нульового значення відбулося за 36-270 с горіння дуги. При цьому швидкість зниження напруги пробою в основному залежить від відстані між провідниками з пошкодженою ізоляцією, площі пошкодження і сили стиснення провідників у місці пошкодження. Чим менша відстань між провідниками в місці пошкодження, більша площа дефекту і більша сила стиснення, тим швидше знижується пробивна напруга місця дефекту.

У зв'язку з тим, що пробивна напруга місця дефекту досить висока (400 В і більше), а перенапруги в витках обмоток електричних машин короткочасні і не завжди досягають пробою, з моменту виникнення дефекту в ізоляції і до повного виткового замикання проходить тривалий час. Це свідчить про те, що за умови застосування надійних методів діагностування виткової ізоляції можливе прогнозування залишкового ресурсу роботи виткової ізоляції.

4.1.4. Визначення температурного режиму обмоток електричних машин

Одним з критеріїв оцінки технічного стану обмоток і деталей електричних машин є температурний режим їх роботи. Порушення температурного режиму зазвичай призводить до різкого зниження терміну служби або до виходу з ладу електрообладнання.

Перегрів окремих місць станини електричних машин змінного струму свідчить про наявність міжвиткового замикання обмоток, а в електричних машинах постійного струму - про замикання обмоток на корпус в двох місцях.

Перегрів обмоток електричних машин може свідчити про перевантаження, неправильне їх з'єднання, про виткові замикання, несправності вентиляційних систем (пошкодження вентиляторів, забруднення вентиляційних каналів) та ін.

Середню температуру обмоток електричних машин визначають за опором постійному струму. Опір вимірюють в холодному стані обмоток і після його нагрівання. При цьому приймається, що температура холодної обмотки дорівнює температурі повітря навколо електричної машини.

Середню температуру нагрітих мідних обмоток електричних машин і апаратів підраховують за формулою:

$$\theta = \frac{R_w - R_x}{R_x} (235 + \theta_x) + \theta_x, \quad (106)$$

де R_w , R_x – опір обмотки відповідно в нагрітому і холодному стані, Ом;

θ_x – температура обмотки в холодному стані, °С.

Якщо обмотка електричної машини або апарата виготовлена з алюмінію, у формулі число 235 замінюється на 245. Опір обмоток в нагрітому стані вимірюють як можна швидше після відключення електричної машини з мережі, так як постійна нагріву обмотки низька.

Перегрів окремих місць станини електричних машин часто свідчить про наявність дефектів в ізоляції обмоток, найпростіше визначається вимірюванням температури поверхні станини термометром. При вимірах кульку термометра обертають фольгою і щільно притискають до поверхні станини електричної машини, температура якої вимірюється. Для ізоляції кульки термометра від навколишнього повітря кульку з фольгою накривають теплоізоляційним матеріалом, наприклад, шаром вати, азбесту, вовни. При вимірах бажано користуватися спиртовими термометрами, так як у ртутних термометрах під дією електромагнітних полів крупних електричних машин може виникати додатковий нагрів ртуті вихровими струмами.

4.1.5. Моніторинг стану ізоляції обмотки сучасними методами

Для контролю стану ізоляції електрообладнання в процесі експлуатації застосовуються сучасні системи MDR-3/UHF і MDR-M.

MDR-3/UHF (Motor and Generator Diagnostics Relay) – система моніторингу стану ізоляції високовольтних генераторів і електродвигунів по частковим розрядам.

Оцінка технічного стану ізоляції обмотки статора електричної машини і оперативна діагностика дефектів у системі «MDR-3/UHF» проводиться на підставі реєстрації та аналізу розподілу часткових

розрядів в НВЧ (UHF – Ultra High Frequency) діапазоні частот. В даний час це найбільш чутливий метод діагностики, що дозволяє виявляти практично будь-які дефекти в високовольтній ізоляції на ранніх стадіях їх виникнення та розвитку [39]. Прилад «MDR-3/UHF» призначений для постійного моніторингу технічного стану ізоляції електричної машини під робочою напругою. Визначення технічного стану ізоляції здійснюється на основі реєстрації та аналізу інтенсивності і розподілу імпульсів часткових розрядів. Вимірювання проводиться за допомогою спеціальних датчиків. В якості датчиків можуть використовуватися датчики-антени, встановлені для цих цілей виробником ЕМ або при ремонті ЕМ. Також в якості датчиків можуть використовуватися високочастотні трансформатори струму (датчики марок RFCT) або конденсатори зв'язки (ємнісні опорні ізолятори). У приладі «MDR-3/UHF» реалізований набір самих сучасних засобів і методів відбудови від зовнішніх перешкод. Завдяки вбудованій в прилад експертній системі «PD-Expert», автоматично проводиться оцінка не тільки рівня часткових розрядів, але і визначається тип дефекту. По всіх каналах реєстрації ЧР вимірювання проводиться одночасно, за рахунок аналізу схеми установки датчиків і різночасності реєстрації імпульсів у різних каналах приладу можна встановити місце дефекту.

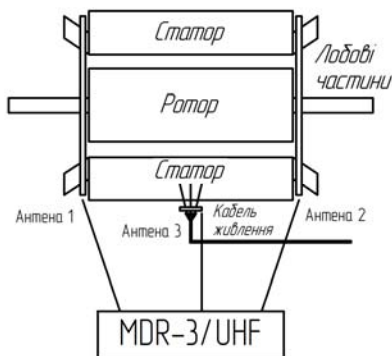


Рис.14. Схема підключення системи MDR-3/UHF до електродвигуна

Два датчика-антени встановлюються при виготовленні або ремонті ЕМ в лобових частинах (рис. 14). Третя антена встановлюється

ся на ввіді в ЕМ. При використанні такої схеми вимірювання канали приладу повинні працювати в НВЧ (UHF) діапазоні частот. Частковий розряд – це іскровий розряд дуже малої потужності, який утворюється всередині ізоляції, або на її поверхні, в обладнанні середнього і високого класів напруги. З плином часу, періодично повторювані часткові розряди, руйнують ізоляцію, приводячи в кінцевому підсумку до її пробою. Зазвичай руйнування ізоляції під дією часткових розрядів відбуваються протягом багатьох років. Таким чином, реєстрація часткових розрядів, оцінка їх потужності і повторюваності, а також локалізація місця їх виникнення, дає змогу своєчасно виявити розвиваються пошкодження ізоляції і прийняти необхідні заходи для їх усунення.

Система моніторингу марки «MDR-M» (Motor and Generator Diagnostics Relay) призначена для контролю технічного стану ізоляції обмоток статорів високовольтних турбо- та гідрогенераторів, а також потужних високовольтних електродвигунів так само по частковим розрядам.

Визначення технічного стану ізоляції обмотки статора в системі «MDR-M» проводиться на підставі реєстрації та аналізу розподілу часткових розрядів в ізоляції. В даний час це найбільш чутливий метод діагностики, що дозволяє виявляти дефекти в ізоляції на ранніх стадіях їх виникнення та розвитку. Крім того, система «MDR-M» має набір вбудованих експертних алгоритмів (система «PD-Expert»), що дозволяють проводити максимально повну обробку первинної інформації, в результаті чого персоналу видаються вже готові висновки про стан контрольованої електричної машини з переліком дефектів.

Таким чином, описані вище сучасні методи моніторингу стану дозволяють проводити оперативну діагностику і відповідно прогнозування основних вузлів електричних машин, знижуючи ймовірність раптових відмов.

4.1.6. Діагностування короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів

У зв'язку з виникненням у стрижнях короткозамкнених обмоток роторів асинхронних електродвигунів дефектів, в умовах експлуатації необхідно періодично перевіряти їх технічний стан.

При обривах стрижнів обмоток роторів збільшуються час розгону і додаткові втрати електродвигунів, зменшуються ККД і коефіцієнт потужності, збільшуються споживаний струм та ковзання.

Найбільш шкідливий вплив на роботу електродвигунів надає вібрація, яка виникає внаслідок обриву стрижнів короткозамкненої обмотки. У результаті вібрація приводить до виходу електродвигунів з ладу.

У технічній літературі [20] введено поняття коефіцієнта несиметрії, який для випадку обриву одного стрижня:

$$k_n = 1/(z_2 / p - 2), \quad (107)$$

де z_2 – число пазів ротора;

p – число пар полюсів електродвигуна.

Проведені дослідження впливу обривів стрижнів на характеристики і вібрацію асинхронних електродвигунів показали, що для електродвигунів єдиних серій допускається обрив не більше одного стрижня.

Діагностування короткозамкнених обмоток роторів без розбирання електродвигунів. Зовнішніми ознаками наявності обривів стрижнів електродвигунів є підвищена вібрація і шум при роботі, що збільшуються із зростанням навантаження.

Характерним є те, що вібрація і шум періодично змінюються з частотою, що дорівнює подвоєній частоті ковзання.

Стрілки амперметрів, включених в ланцюг живлення електродвигунів з обривами стрижнів короткозамкнених обмоток роторів, також періодично коливаються через періодичні зміни ефективних значень струмів у фазах.

На практиці застосовують кілька способів визначення технічного стану короткозамкнених обмоток роторів.

Спосіб вимірювання струмів в обмотках статора при провертанні ротора вручну дозволяє встановити наявність обривів стрижнів

нів в короткозамкнених обмотках асинхронних електродвигунів [28, 29]. Відповідно до цього способу одну або дві фази обмотки статора електродвигуна включають на напругу змінного струму, що дорівнює 10-15% номінального, і при повільному провертанні ротора вручну вимірюють струм в ланцюзі живлення (рис. 15).

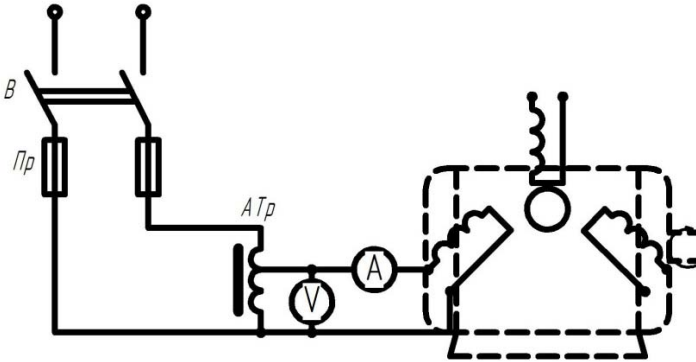


Рис. 15. Схема для визначення обривів стрижнів короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів

Для визначення зміни струму зручно використовувати самописний амперметр. Слід зазначити, що вказаний спосіб більш чутливий до обривів стрижнів при подачі напруги на одну фазу обмотки, ніж при подачі напруги на дві фази. Якщо при обертанні ротора струм в обмотці статора не змінюється, обриви в стрижнях обмотки ротора відсутні. Зміна струму при провертанні ротора вказує на наявність обриву стрижнів. У зв'язку з тим, що зміна струму залежить від кількості пошкоджених стрижнів і їх взаємного розташування, визначити число обірваних стрижнів за відхиленням стрілки амперметра важко. Після виявлення факту наявності обриву стрижнів електродвигун підлягає розбиранню та точному встановленню числа обірваних стрижнів.

Спосіб контролю стрижнів короткозамкнених обмоток роторів заснований на використанні залежності ковзання електродвигунів від числа обірваних стрижнів. При визначенні їх числа у відповідності з цим способом вимірюють ковзання електродвигуна при заданому навантаженні і температурі й отриману величину по-

рівнюють з контрольною, яка вимірюється на електродвигуні з ротором, що не має обривів. Для використання цього способу необхідно мати еталонні криві залежностей ковзання від навантаження для конкретних типів електродвигунів, що обмежує застосування способу при експлуатації електрообладнання.

Для спеціальних електродвигунів, наприклад, заглибних, визначення технічного стану короткозамкнених обмоток традиційними способами є досить трудомісткою операцією. У зв'язку з цим було розроблено два способи визначення технічного стану короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів, доступ до яких неможливий або утруднений.

Спосіб визначення ступеня пошкодження короткозамкнених обмоток роторів заглибних асинхронних електродвигунів заснований на положенні, що при нерухомому роторі, що має пошкодження короткозамкненої обмотки, струм у фазах залежить від положення ротора відносно статора. У електродвигунів заглибних насосів полюсний поділ становить 180° , у зв'язку з чим при обертанні ротора, що має дефекти обмоток, період зміни ефективного значення струму фази відповідає половині обороту ротора. Зміна ефективного значення струму пов'язана зі зміною магнітного опору фази електродвигуна при зміні розташування дефектів обмотки ротора щодо обмотки статора, в якій вимірюють струм. У заглибних електродвигунах ця зміна порівняно велика. Так, при обриві чотирьох розташованих поруч стрижнів при повороті ротора на один оберт ефективне значення струму змінюється на 42% середньої величини.

Розроблений спосіб дозволяє визначити ступінь пошкодження короткозамкнених обмоток роторів без підйому заглибних електродвигунів зі свердловини. Спосіб придатний і для контролю інших типів асинхронних електродвигунів, доступ до валів яких важкий або взагалі неможливий. Для визначення технічного стану стрижнів з допомогою порушення фаз обмотки статора ротор електродвигуна повертають на певні кути (кроків обертання). Після кожного повороту обмотку статора підключають до стабілізованої напруги змінного струму і самопишучим амперметром записують струм. Крокові обертання продовжують до тих пір, поки ротор не зробить один оберт.

При відсутності ушкоджень у короткозамкненій обмотці ротора струм буде однаковим при всіх положеннях ротора. Якщо короткозамкнена обмотка ротора має обриви стрижнів, струм буде залежати від положення ротора щодо обмоток статора, при цьому зміна струму буде тим більше, чим більше число стрижнів мають пошкодження. За зміною струмів при різних положеннях ротора в межах одного обороту оцінюють технічний стан короткозамкненої обмотки.

Ступінь пошкодження обмотки ротора при локальному (місцевому) розміщенні дефектів визначають за формулою:

$$\gamma = k_k \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} 100, \quad (108)$$

де γ – ступінь пошкодження обмотки, %;

k_k – коефіцієнт конструктивних особливостей електродвигуна;

I_{\max} , I_{\min} – найбільше і найменше значення вимірюваних струмів, А.

Діагностування короткозамкнених обмоток роторів розібраних електродвигунів. Для визначення технічного стану короткозамкнених обмоток роторів розібраних електродвигунів розроблені різні способи і прилади. Найбільше їх число призначене для виявлення обривів стрижнів обмотки після виготовлення роторів або в процесі виготовлення. У залежності від принципу роботи та схеми ці прилади можна розділити на наступні групи [15, 16]:

1. Прилади трансформаторного типу, що мають кілька обмоток. Звичайно одна з обмоток наводить електрорушійну силу в стрижнях ротора, а інші є вимірювальними. У цих приладах обмотки, як правило, розміщені на магнітопроводі II або III – подібного типу.

2. Прилади, що використовують поля розсіювання. Датчики, що входять в комплект приладів, перетворюють поля розсіювання в електричні сигнали і по них визначають технічний стан обмотки ротора.

3. Прилади, в основу яких покладено схеми мостів (індуктивних, індуктивно-активних і індуктивно-ємнісних). Прилади цього типу мають, як правило, збудник у вигляді статора або частини статора з обмотками.

4. Прилади, що використовують принцип зміни магнітного опору в зазорі датчик – ротор. Датчики таких приладів виготовляють у вигляді котушок з великим числом витків.

5. Прилади, що використовують принцип порошково – магнітної дефектоскопії. По стрижнях ротора пропускають струм 300-500 А, який створює сильне магнітне поле. По конфігурації поля орієнтується металевий магнітний порошок, розташований тонким шаром на аркуші паперу або іншого немагнітного матеріалу. Уздовж цілих стрижнів порошок розміщується суцільною смугою, а в місцях обривів стрижнів у смузі порошку є розриви.

6. Прилади, засновані на використанні теплових явищ. Перед випробуванням ротор обертають папером, на який нанесений легкоплавкий склад. Через обмотку ротора пропускають струм, що нагріває стрижні, і легкоплавкий склад над стрижнями без обривів розплавляється. Через стрижні з обривами струм не проходить, і склад не розплавляється.

В останні роки при визначенні технічного стану короткозамкнених обмоток роторів після розбирання електродвигунів широко застосовують способи і прилади, робота яких заснована на принципі трансформації струмів. Такі прилади дозволяють виявляти не тільки обриви і тріщини в стрижнях, але й ослаблення їх перетину більш ніж на 25%.

4.2. Діагностування підшипників електричних машин

Поряд з ізоляцією обмоток, від технічного стану підшипників залежить працездатність електричних машин. Пошкодження або надмірний знос підшипників найбільш часто призводить до зачіпання ротора за активну сталь статора і до виходу електричної машини з ладу. Так, дані обстеження технічного стану, що надходять у капітальний ремонт заглиблених електродвигунів свідчать про те, що до 16% електродвигунів доводиться вибраковувати через пошкодження зубців активної стали внаслідок зносу радіальних підшипників.

Знос підшипників також негативно впливає на робочі та енергетичні характеристики електричних машин. У міру зношення підшипників збільшується нерівномірність повітряного зазору, що призводить до збільшення вібрації, часу розгону електродвигунів;

збільшення ковзання електродвигунів; втрат у сталі і додаткових втрат; збільшення нагрівання в зоні найменшого зазору, а головне – до збільшення одностороннього магнітного притягання, яке, в свою чергу, призводить до додаткового навантаження і прискорення процесу зношування підшипників.

Досвід експлуатації свідчить, що продіагностувавши і своєчасно замінивши підшипники, можна значно зменшити кількість відмов і продовжити доремонтний і міжремонтний терміни служби електричних машин.

Таким чином, ненормальна робота підшипників, супроводжується у першу чергу надмірним збільшенням температури, шумом, витокami мастила, підвищеним опором при обертанні і збільшенні моменту рушіння механізму. Причини тому можуть бути різноманітними, але понад 80% підшипників кочення виходить з ладу внаслідок руйнувань втомного характеру.

Основним завданням проведення своєчасного діагностичного обстеження устаткування є виключно запобігання аварій та їх наслідків, навіть якщо діагностична інформація про наявність дефекту буде отримана на досить пізньому етапі.

Зупинки обладнання для заміни підшипника можуть бути виконані в будь-який час, без якого-небудь збитку для роботи контрольованої установки та технологічного циклу всього підприємства, без порушення загального процесу.

Якщо циклічність проведення ремонтних робіт на контрольованому обладнанні така, що залишився термін служби підшипника з діагностованим дефектом, нехай навіть мінімальний, завжди перевищує час роботи до його виводу в ремонт з інших причин.

Діагностування підшипників без розбирання електричних машин. Для оцінки технічного стану та діагностики дефектів підшипників кочення різними підприємствами і компаніями розроблено досить багато сучасних методів та приладів. Всі ці методи різні за своїм теоретичним передумовам, мають різну трудомісткість, вимагають різного приладового забезпечення і можуть застосовуватися для різних цілей [30].

Акустичний контроль технічного стану підшипників широко застосовується для масової їх перевірки. Так, розроблено ряд стендів, заснованих на вимірюванні акустичних характеристик підшип-

ників. Аналогічні стенди створені і за кордоном. Ці стенди використовують для контролю підшипників на заводах-виробниках. Слід також відзначити, що спектр шуму підшипників у значній мірі залежить від конструкції підшипникового вузла, чистоти і кількості мастила в підшипнику.

За величиною середньоквадратичного значення (СКЗ) віброшвидкості. Даний метод дозволяє виявляти дефекти підшипників на останніх стадіях розвитку дефекту, коли загальний рівень вібрації значно зростає. Даний метод діагностики простий, має нормативну базу, потребує мінімальних технічних витрат і не вимагає спеціального навчання персоналу, застосовується при діагностиці «масового» і порівняно недорогого обертового обладнання.

Діагностика дефектів підшипників кочення за спектрами вібраційних сигналів. Даний метод застосовується на практиці досить часто, хоча і не володіє високою чутливістю, але він дозволяє виявляти, поряд з діагностикою підшипників, велику кількість інших дефектів обертового обладнання. Цей метод дозволяє починати діагностику дефектів підшипників на більш ранніх етапах, коли енергія резонансних коливань зростає настільки, що буде помітна в загальній картині частотного розподілу всієї потужності вібросигналу.

Діагностика дефектів по співвідношенню пік /фон вібросигналу. Цей метод розроблявся декількома компаніями і має багато різних, приблизно однакових по ефективності, практичних модифікацій. Це метод HFD (High Frequency Detection – метод виявлення високочастотного сигналу), метод SPM (Shock Pulse Measurement – метод вимірювання ударних імпульсів), метод SE (Spike Energy – метод вимірювання енергії імпульсу), а також ще кілька інших, але менш відомих методів. Кращі різновиди цього методу дозволяють виявляти дефекти підшипників кочення на досить ранніх стадіях.

Діагностика дефектів підшипників кочення по спектру обвідної вібраційного сигналу. Даний метод дозволяє виявляти дефекти підшипників на самих ранніх стадіях. Теоретично даний метод діагностики дефектів підшипників кочення може базуватися і на аналізі акустичних сигналів і аналізу вібраційних сигналів. У першому випадку метод називається SEE (Spectral Energy Emitted – аналіз ви-

проміньованої спектральної енергії) і для своєї роботи використовує спеціальний датчик акустичного випромінювання. Найчастіше для такої діагностики використовують акустичні детектори витоків різних модифікацій, що працюють в діапазоні частот до 100 кГц. В цьому випадку вимірювання акустичних параметрів проводиться дистанційно, з деякого віддалення від контролюваного підшипника.

Пристрій для контролю стану підшипників, якій контролює наявність мастила в підшипниках. Принцип контролю заснований на вимірюванні електричного опору шару мастила в підшипниках. Пристрій складається з електричного кола, в якій послідовно включені омметр, джерело живлення і перевіряється підшипник. При недостатній кількості мастила в підшипниках зменшується опір між тілами кочення та кільцями і омметр вказує на порушення режиму змащення підшипників. Недоліком цього методу є необхідність від'єднувати електродвигун від робочої машини, щоб виключити з вимірювального ланцюга підшипники й інші частини робочої машини або механізму. У зв'язку з тим, що на валу електричної машини встановлено два підшипника, цей метод не дозволяє проводити індивідуальний контроль кожного підшипника окремо.

Спосіб визначення радіальних зазорів в підшипниках без розбирання електродвигунів забезпечує точне вимірювання зазорів в кожному підшипнику без знімання електродвигуна з робочої машини або механізму. Слід зазначити, що радіальний зазор в підшипниках є основним параметром, що характеризує їх технічний стан. Спосіб, заснований на використанні ділянок статора з обмоткою як електромагніту, що притягує ротор в певних радіальних напрямках і вимірі переміщення валу ротора в безпосередній близькості від підшипників. Вимірювати величину переміщення валу ротора можна за допомогою датчиків лінійного переміщення або індикаторів годинникового типу. Датчики або індикатори вимірювальними стрижнями встановлюють на валу електродвигуна і кріплять на корпусі за допомогою електромагнітного або механічного швидкоз'ємного пристосування. При цьому вимірювальні стрижні датчиків повинні бути перпендикулярні до поверхні валу.

Експериментальні дані свідчать, що при пропущенні через котушки обмоток асинхронних електродвигунів постійного струму, рівного номінальному, зусилля притягання ротора до статора

перевищує масу ротора від 8 до 35 разів в залежності від його положення щодо статора й розташування котушок обмоток. У зв'язку з вищевикладеним при діагностуванні підшипників застосовують постійний струм, який становить 25-30% номінального струму електродвигуна.

Радіальні зазори підшипників електродвигунів не повинні перевищувати допустимих значень, наведених в довідкових таблицях для кожного типу та розміру підшипників. В таблицях приведені номінальні і граничні значення радіальних зазорів в підшипниках, що необхідні для визначення залишкового ресурсу роботи підшипників.

Для діагностування стану підшипників по вібрації існує достатня кількість сучасних приладів, заснованих на вимірі та обробці параметрів вібраційних сигналів [39]. Головною перевагою такого найпростішого та досить інформативного методу діагностики дефектів підшипників кочення електрообладнання по загальному рівню вібрації є те, що для його застосування не потрібно, практично, ніякого додаткового навчання обслуговуючого, а часто і експлуатаційного, персоналу. Крім того, вартість технічного обладнання, необхідного для даного методу діагностики, мінімальна.

Нижче наведено більш детальні характеристики деяких моделей таких приладів: «Виброметр-К1», «Vibro Vision», «ViAna-1», «ДПК-Вибро» та інші.

«ДПК-Вибро» – компактний віброметр, реєстратор вібраційних сигналів (віброметр) – прилад для оцінки технічного стану підшипників кочення безпосередньо на місці їх експлуатації.

Прилад вимірює інтегральні параметри вібрації обладнання за допомогою вбудованого вібросенсору. Такі вимірювання можуть проводитися в розмірності віброприскорення A (m/s^2), віброшвидкості V (мм/с) і довжини S (мкм). Такі вимірювання вібрації зазвичай виробляються в стандартному діапазоні частот від 10 до 1000 Гц.

Оцінка технічного стану підшипників проводиться на основі двох методів:

– розрахунку та порівняння загального рівня вібраційного сигналу (СКЗ вібросигналу), виміряного на підшипнику, з нормативними значеннями;

– аналізу параметрів ударних імпульсів, які завжди виникають при «обкачуванні» різних дефектів на поверхні кочення підшипників.

На підставі математичної обробки ударних імпульсів в приладі дається оперативний висновок про технічний стан робочих поверхонь контрольованого підшипника.

Для оперативної оцінки параметрів вібрації використовується *ViPen* – віброметр-ручка, який має дуже компактний розмір, що дозволяє вимірювати середньоквадратичне значення СКЗ віброшвидкості і температуру підшипника. Оцінка технічного стану провадиться на підставі трьох вимірюваних приладом параметрів:

- СКЗ віброшвидкості в діапазоні $10 \div 1000$ Гц,
- амплітуда віброприскорення,
- температура.

Для прогнозування стану по вібрації використовуються норми на вимірювані параметри, прийняті для даного обладнання стандартами підприємства (заводу-виробника).

«*ViAna-1*» (*Vibro Analyzer, 1 канал*) – одноканальний прилад реєстрації та аналізу вібраційних сигналів для оперативної діагностики підшипників кочення і «безрозбірного» балансування роторів та іншого обертового обладнання. У приладі «*ViAna-1*» реалізований стандартний набір математичних функцій, що дозволяють проводити різні перетворення із зареєстрованою інформацією для оцінки стану підшипників:

- отримання класичних спектрів вібраційних сигналів;
- отримання спектрів в смузі частот;
- аналіз амплітудних і фазових співвідношень між різними гармоніками.

Для проведення балансування роторів та інших спеціалізованих робіт з віброналагоджування обертового обладнання і механізмів, що знаходяться на власних опорах, прилад дозволяє реєструвати вібросигнали з різними параметрами за допомогою вбудованого та зовнішнього датчиків. Такі вимірювання можуть проводитися в розмірності віброприскорення (A , m/c^2), віброшвидкості (V , mm/c) і довжини (S , mkm). Вимірювання вібрації за допомогою вбудованого в прилад датчика відбувається в стандартному діапазоні частот – від 10 до 1000 Гц. При використанні зовнішнього датчика вібрації мар-

ки «ВК-310А» можуть бути зареєстровані вібраційні сигнали в діапазоні частот від 5 Гц до 5 кГц.

Крім того, у пристрої реалізована функція віброметра, яка дає швидко оцінку стану обертового обладнання. На кожну точку вимірювання виходить тільки одне число СКЗ віброшвидкості.

Визначення технічного стану підшипників без знімання з валів електричних машин. При поточних ремонтах електричних машин для визначення доцільності подальшої експлуатації або заміни підшипників в обов'язковому порядку вимірюють значення їх радіальних зазорів. При вимірюванні зазорів підшипники не знімають з валів електричних машин, так як зняття і напресування порушують посадку підшипників на вали. Крім того, при зніманні досить часто пошкоджуються тіла кочення підшипників.

Перед визначенням технічного стану підшипники ретельно промивають бензином з додаванням 6-8% за обсягом веретенного або трансформаторного масла і оглядають. Придатні до подальшої експлуатації підшипники не повинні мати на кільцях та тілах кочення викривлення металу і тріщин, лунок, вибоїн, кольорів мінливості, що свідчать про перегрів, глибоку корозію, відшарування металу, рисок та забоїн на бігових доріжках. Сепаратори підшипників не повинні мати наскрізних тріщин, відламів, ослаблених заклепок, забоїн і вм'ятин, що перешкоджають вільному і плавному обертанню кілець підшипників.

Справні підшипники повинні легко обертатися, при цьому не повинно спостерігатися пригальмовування і заїдання. Обертання підшипників повинне супроводжуватися глухим шиплячим звуком, різке металеве деренчання не допускається. Простір між обоймами з кульками набивають мастилом по всьому колу.

Основним діагностичним параметром, за яким вибраковують підшипники, є радіальний зазор. Для вимірювання радіального зазору в підшипниках електродвигунів без знімання з валів розроблено пристосування КІ-6178 (рис. 16, а, б). Його також можна застосовувати для вимірювання зазорів в підшипниках синхронних генераторів, зварювальних генераторів, що обертаються, перетворювачів та інших електричних машин.

До вимірювання зазорів в підшипниках короткозамкнених роторів пристосування кріплять на краю бочки ротора попередньо

знявши призму 7 з затиском 8, а перед виміром зазорів в підшипниках фазних роторів електродвигунів, якорів синхронних і зварювальних генераторів, перетворювачів та інших електричних машин - на їх валах. При вимірі рукою переміщують зовнішнє кільце підшипника вгору і вниз і по різниці показань індикатора визначають радіальний зазор в підшипнику. На встановлення пристосування і вимірювання зазорів в підшипниках йде не більше 3-4 хв.

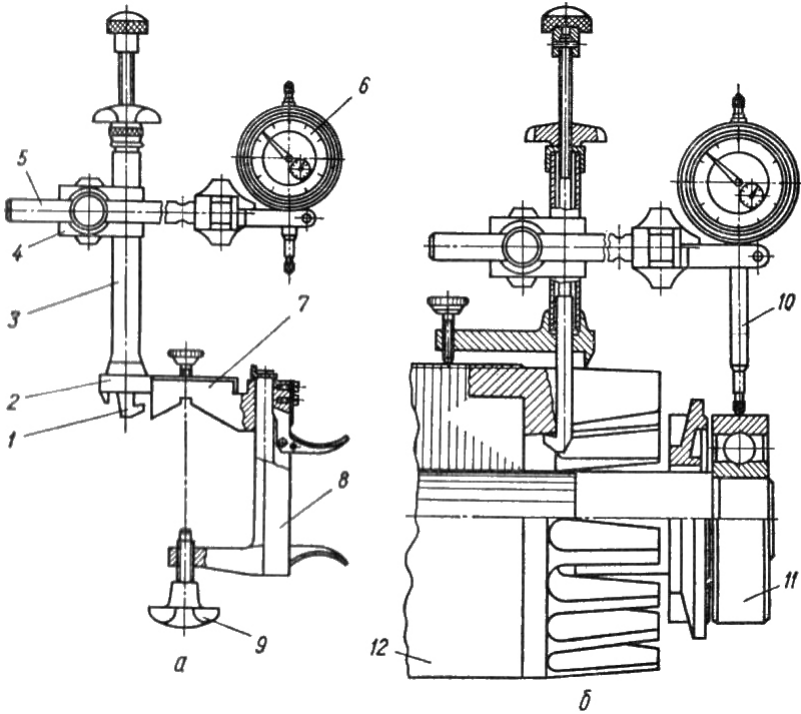


Рис. 16. Пристосування КІ-6178 для вимірювання радіального зазору підшипників електродвигунів без знімання з валу (а) і його кріплення на роторі електродвигуна (б):

- 1 – захоплення; 2 – основа; 3 – вертикальна стійка; 4 – повзун;
 5 – горизонтальна стійка; 6 – індикатор; 7 – призма; 8 – затиск;
 9 – гвинт; 10 – ніжка індикатора; 11 – підшипник; 12 – ротор

4.3. Визначення технічного стану магнітопроводів електричних машин

Технічний стан активної сталі зазвичай визначають при поточних або капітальних ремонтах електричних машин у випадках, коли зовнішнім оглядом виявлені місця перегріву або пошкодження ділянок сталі. Основними критеріями для оцінки технічного стану активної сталі є температура при нагріванні сталі індукційним методом і питомі втрати в сталі.

Для оцінки стану сталі з електричної машини виймають ротор або якір, заземляють обмотку статора, а на станину намотують робочу і контрольну обмотки, як це показано на рис. 17.

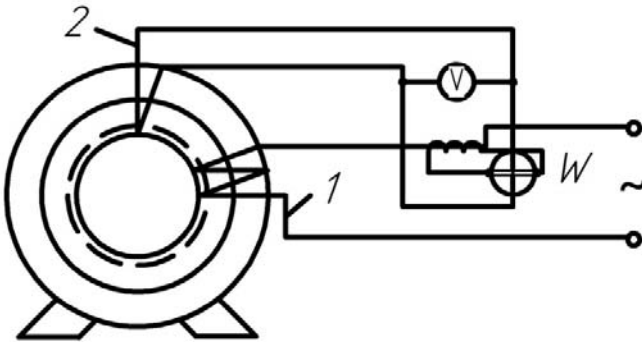


Рис. 17. Схема для визначення технічного стану магнітопроводів електричних машин:

1 – робоча обмотка для намагнічування; 2 – контрольна обмотка

За допомогою робочої обмотки в активній сталі статора наводиться індукція, що дорівнює 1 Тл. Наведену індукцію вимірюють за допомогою контрольної обмотки. За показаннями вольтметра, включеного на затискачі контрольної обмотки, визначають індукцію з виразу:

$$B_c = \frac{10^4 U}{4,44 w f q}, \quad (109)$$

де U – напруга на контрольній обмотці, В;

q – перетин активної сталі статора, см²;
 f – частота напруги живлення робочої обмотки, Гц;
 w – число витків контрольної обмотки.

За ватметром визначають втрати P_c в сталі статора електричної машини, приведені до індукції 1 Тл за формулою:

$$P_c = P_1(1/B_c)^2, \quad (110)$$

де P_1 – втрати, виміряні ватметром, Вт.

Знаючи втрати і масу сталі, обчислюють питомі втрати у сталі за виразом:

$$\rho = P_c / G_c, \quad (111)$$

де G_c – маса активної сталі статора, кг.

Технічний стан магнітопроводу вважається задовільним, якщо питомі втрати в сталі не перевищують 2,5 Вт / кг.

Для визначення місць пошкоджень ізоляції між листами сталі (замикання аркушів) магнітопровід нагрівають індукційними втратами при індукції 1 Тл протягом 1 год. Якщо після закінчення години нагрівання температура поверхні магнітопроводу в розточенні рівномірна, а питомі втрати не перевищують 2,5 Вт/кг, технічний стан сталі вважається задовільним. Нерівномірне нагрівання поверхні розточення статора свідчить про наявність місцевих порушень ізоляції між листами активної сталі. У потужних електричних машинах технічний стан сталі вважається задовільним, якщо при індукції 1Тл максимальний перегрів зубців не перевищує 45°С, а найбільша різниця температур в найбільш холодних і гарячих місцях не перевищує 30° С.

Для зібраних електродвигунів втрати в активній сталі можна визначити в режимі х.х. При х.х. потужність P_0 , споживана електричним двигуном з мережі живлення, витрачається на покриття втрат у сталі P_c і механічних втрат P_m . Оскільки при х.х. електродвигунів потужність, споживана ними з мережі живлення, лінійно залежить від квадрата напруги, вимірявши і побудувавши графік цієї залежності, можна легко визначити механічні втрати, а потім і втрати в сталі. Для цього ватметром вимірюють потужність, яку споживає електродвигун в режимі х.х. при різних значеннях напруги, що під-

водиться (наприклад, при $0,75U_n$, $0,5U_n$, $0,25U_n$). Потім за отриманими даними будують графік (рис. 18) залежності споживаної потужності від квадрата напруги $P_0 = P_c + P_m = f(U_0)^2$.

Подовживши лінію залежно $P_c + P_m = f(U_0)^2$ до перетину з віссю ординат (точка n) визначають механічні втрати (відрізок $0-n$), тому що при нарузі, що дорівнює нулю, втрати в сталі також дорівнюють нулю. Якщо через точку n провести пряму, паралельну осі абсцис, то на графіку ця пряма являє собою механічні втрати, які при х.х. асинхронних електродвигунів можна прийняти незмінними, так як частота обертання електродвигунів практично не залежить від напруги.

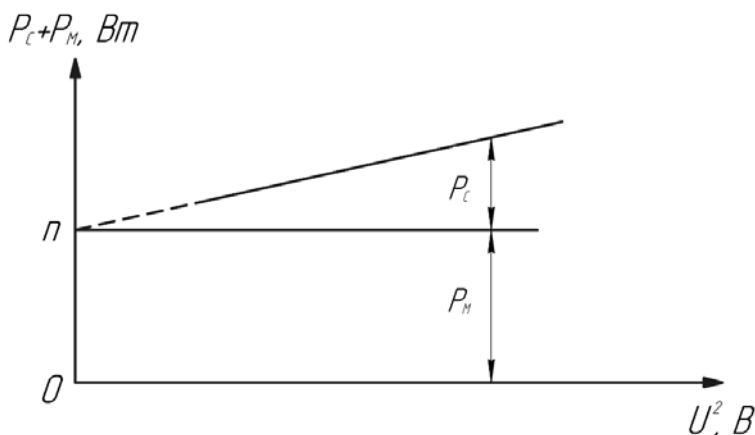


Рис. 18. Поділ втрат при х.х. електродвигунів:
 P_c – втрати в сталі; P_m – механічні втрати

Втрати в активній сталі обчислюють як різницю втрат х.х. при номінальній нарузі і механічних втрат:

$$P_c = P_0 - P_m. \quad (112)$$

Визначивши втрати у сталі і знаючи з технічної документації масу сталі, за формулою (109) обчислимо питомі втрати, які не повинні перевищувати 2,5 Вт/кг.

Приблизно технічний стан активної сталі електродвигунів можна визначити за значенням струму х.х. при номінальній напрузі, який для різних серій не повинен перевищувати значень, наведених в довідкових таблицях.

4.4. Визначення технічного стану колекторів, контактних кілець і щіткового механізму

4.4.1. Контроль стану колектора і контактних кілець

Колектор є одним з найбільш складних вузлів електричних машин як за кількістю деталей, так і за технологією його виготовлення. Під час роботи на колектор діють відцентрові сили, вібрація, нагрів. У процесі роботи геометрія і стан колектору повинні відповідати вимогам забезпечення надійного контакту з щітками.

Контактні кільця електричних машин (асинхронних електродвигунів з фазним ротором, синхронних генераторів та ін.) працюють в порівнянні з колектором в менш напружених умовах, але і до них пред'являються високі вимоги. Слід зазначити, що знос колектору та контактних кілець в значній мірі залежить від роботи щіткового механізму. При технічному обслуговуванні стан колекторів та контактних кілець звичайно визначається оглядом, і тільки в необхідних випадках проводять вимірювання (наприклад, при потемнінні поверхні колекторних пластин в місцях припаювання висновків обмотки вимірюють падіння напруги в місці пайки).

Велику інформативність містить в собі політура, що покриває поверхню колекторних пластин. Політура нормально працюючого колектору має однаковий колір по всьому колектору. Пробій шару політури у вигляді світлих плям з точками-поглибленнями свідчить про перевантаження струмом колектору. Якщо на поверхні колектору спостерігаються світлі й темні смуги, що чергуються, то можна стверджувати про нерівномірність розподілу струмового навантаження між паралельно включеними щітками, тобто про несправність щіткового вузла. Потемніння півників колекторних пластин свідчить про порушення пайки між колекторним пластинами і висновками обмотки якоря.

Зазвичай при діагностуванні колекторів та контактних кілець контролюють діаметр і биття поверхні колектору та контактних кілець, профіль колектору та стан контактів в поєднанні колекторних пластин з обмоткою.

Вимірювання діаметра колектору та контактних кілець проводять, щоб визначити, чи не перевищив знос колекторних пластин допустимої величини. Мінімальне значення діаметра колектору визначають, виходячи з допустимої висоти колекторних пластин. Їх висота не повинна бути меншою, ніж це зазначено в табл. 5 [15]. Діаметр контактних кілець асинхронних електродвигунів з фазним ротором не повинен бути менше допустимого значення, наведеного також у відповідній довідковій таблиці.

Контроль биття поверхні колекторів та контактних кілець можна проводити як при зібраній електричній машині, так і після її розбирання. Биття зазвичай вимірюють індикатором годинникового типу, закріпленим на штативі.

Таблиця 5

Висота колекторних пластин електричних машин

Висота колекторних пластин, мм	
номінальна	допустима
16 – 19	11 – 12
20 – 29	13 – 19
30 – 39	20 – 27
40 – 49	28 – 35
50 – 80	36 – 60

При визначенні биття колектору або контактних кілець у зібраної електричної машини якір або ротор повільно повертають вручну і стежать за показаннями індикатора. Якщо електрична машина розібрана, то для виміру биття колектору або кілець якір або ротор встановлюють у центрах і також повертають навколо осі. При вимірах ніжка індикатора повинна бути перпендикулярною до поверхні колектору або кільця. Значення биття визначають по різниці між найбільшим і найменшим показниками індикатора. Як правило, биття колектору не повинно перевищувати 0,05-0,06 мм, а биття контактних кілець – 0,3 мм. Для визначення допустимого значення биття

колектору в залежності від його діаметру і номінальної частоти обертання можна скористатися формулою:

$$\delta = 0,047 \frac{D^{0,16}}{n_n}, \quad (113)$$

де D – діаметр колектору, мм;

n_n – номінальна частота обертання, хв^{-1} .

Биття колекторів та контактних кілець усувають проточуванням їх поверхні на токарних верстатах.

Контроль профілю є важливим елементом у процесі діагностування колектору. Необхідність такого контролю обумовлена тим, що при експлуатації зустрічаються випадки ослаблення кріплення колекторних пластин, внаслідок чого деякі з них виступають над поверхнею і порушують нормальне контактування між щітками і колектором. Це призводить до вібрації щіток під час роботи і, як наслідок, до їх прискореного зношування.

Перед контролем профілю колектор ретельно оглядають, звертаючи увагу на глибину залягання міканітових прокладок між колекторними пластинами. Внаслідок швидшого зносу мідних пластин колектору в порівнянні з міканітовими прокладками, між пластинами часто спостерігається виступання прокладок над поверхнею колектору. При цьому виникає вібрація щіток, збільшується тертя і порушується контакт між щітками і пластинами колектору. У разі виступання прокладок їх продорожують, добиваючись глибини залягання щодо поверхні колекторних пластин 0,5-0,7 мм.

Найбільш простим способом контролю профілю колектору, який широко застосовується практиками, є нагрівання його поверхні. При контролі, колодку, виготовлену з твердих порід дерева (бук, дуб тощо), за допомогою важеля притискають на кілька секунд до поверхні колектору, який швидко обертається. Після появи слабого диму колодку відводять від колектору, зупиняють електричну машину і оглядають поверхню колекторних пластин. Виступаючі над поверхнею колектору пластини мають більш темний колір в порівнянні з іншими у зв'язку з більш сильним нагріванням, оскільки натискання на них дерев'яної колодки було великим.

Важливе значення при діагностуванні електричних машин має контроль контактів в місцях з'єднання колекторних пластин з обмот-

кою якоря. При порушеннях пайки на гребінцях колекторних пластин спостерігаються сліди потемніння. Порушення пайки або обриви зазвичай визначають виміром падінь напруги в місцях з'єднання колекторних пластин з обмоткою якоря. При погіршенні контакту свідчення мілівольтметра будуть максимальними.

З'єднання проводів обмотки з колекторними пластинами вважається задовільним, якщо відхилення показань мілівольтметра становлять не більше $\pm 10\%$ середнього значення.

4.4.2. Визначення технічного стану щіткового механізму

Від роботи щіткового механізму значною мірою залежить надійність роботи електричної машини. Щітки є одним з найбільш схильних до інтенсивного зносу деталей щітково-колекторного вузла. У результаті зносу щіток зменшується натискання на них пружин щіткового механізму, а між щітками і колектором виникає інтенсивне іскріння, яке, у свою чергу, призводить до прискорення зносу щіток і колектору (електричний знос).

Стан щіток електричних машин визначається оглядом (повинні мати чисту блискучу робочу поверхню без рисок та тріщин) і виміром висоти штангенциркулем. Висота щіток, наприклад, асинхронних електродвигунів з фазним ротором не повинна бути меншою допустимих значень, наведених у довідковій таблиці, де в середньому вони становлять 50% від номінальних.

Якщо щітка в поперечних напрямках має порівняно велике переміщення щодо обойми щіткотримача, то вимірюють зазор між щіткою і обоймою. Виміряні за допомогою шупів зазори між щітками і обоймами повинні знаходитися також у межах, зазначених у відповідній довідковій технічній літературі.

У зв'язку з тим, що на знос колектору і щіток великий вплив робить натискання пружин, при діагностуванні щітково-колекторного вузла обов'язковою операцією є вимір натискання. Як недостатнє, так і надмірне натискання пружин призводить до прискореного зносу колектору і щіток. При надмірному натисканні спостерігається в основному механічне зношення колектору і щіток.

Натискання пружин щіткового механізму електричних машин вимірюють динамометром. Перед вимірами між щіткою і колекто-

ром або контактним кільцем закладають стрічку тонкого паперу. Гачок динамометра чіпляють за пружину щіткотримача таким чином, щоб поздовжня вісь динамометра збігалася або була паралельною поздовжній осі щітки і, одночасно докладаючи відповідних зусиль до динамометру і до смужки паперу, зчитують свідчення на шкалі динамометра в момент початку звільнення паперу.

Натискання пружин щіткотримачів асинхронних електродвигунів з фазним ротором приведено в довідковій таблиці. Зазвичай в електричних машинах пружини повинні забезпечувати рівномірний тиск на щітки в межах $0,12-0,2$ кгс /см².

4.4.3. Перевірка і регулювання комутації МПС

На знос колектору і щіток, а також на надійність роботи машин постійного струму (збудників синхронних генераторів, зварювальних генераторів, перетворювачів і ін.) значний вплив робить комутація, яка оцінюється згідно ДСТУ за ступенем іскріння щіток при номінальній напрузі і силі струму електричних машин.

Ступінь іскріння щіток класифікується за класами комутації. Клас комутації встановлюється згідно з даними табл. 6 по іскрінню під збігаючим краєм щіток.

Ступінь іскріння щіток перевіряється після того, як встановиться температура обмоток машини (зазвичай через 1-2 години після початку роботи). Якщо ступінь іскріння щіток при доброму стані поверхні колектору перевищує $1\frac{1}{2}$, щітки повинні бути встановлені на нейтраль одним із таких способів.

Спосіб імпульсів. До обмотки збудження машини постійного струму через переривник або перемикач під'єднують батарею з напругою 2-4 В, а до щіток – мілівольтметр. Переривником або перемикачем періодично вмикають і вимикають батарею. При цьому стрілка мілівольтметри відхиляється на певний кут. Повертаючи траверсу з щітками, знаходять такий стан щіток щодо колектору, при якому замикання і розмикання ланцюга збудження не буде викликати відхилення стрілки мілівольтметри. Якщо внаслідок невеликої несиметрії розташування щіток і колекторних пластин при різних положеннях якоря нейтраль зміщуватиметься, вибирається таке розташування щіток, при якому максимальні відхилення стріл-

ки мілівольтметра в одну або в іншу сторону при різних положеннях якоря рівні між собою. Потім траверса закріплюється і перевірка повторюється.

Спосіб максимальної напруги. До щіток машини постійного струму приєднують вольтметр, встановлюють номінальні обороти машини і збуджують збудник. Перемішуючи траверсу разом із щітками, знаходять положення траверси, при якому напруга буде найбільшою.

Таблиця 6

Дані іскріння щіток

Ступінь іскріння (клас комутації)	Характеристика ступеня іскріння	Стан колектору і щіток
1	Відсутність іскріння (темна комутація)	Відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках
1 ¼	Слабке точкове іскріння під невеликою частиною щітки	Відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках
1 ½	Слабке іскріння під більшою частиною щітки	Поява слідів почорніння на колекторі, які легко видаляються протиранням поверхні колектору бензином, а також поява нагару на щітках
2	Іскріння під усім краєм щітки (допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженнях)	Поява слідів почорніння на колекторі, які не можна усунути протиранням поверхні бензином, а також слідів нагару на щітках
3	Значне іскріння під усім краєм щітки з наявністю великих і вилітаючих іскор. Допускається тільки для моментів прямого (без реостатних ступенів) включення або реверсування машин, якщо при цьому колектор та щітки залишаються в стан, придатному для подальших робіт	Значне почорніння на колекторі, не усуває протирання поверхні колектору бензином, а також підгар і руйнування щіток

4.5. Діагностування електричних апаратів

4.5.1. Діагностування ізоляції котушок низьковольтних апаратів

Більшість низьковольтних апаратів (магнітні пускачі, реле та ін.) мають котушки, що намотані на пластмасових каркасах. Така конструкція котушок забезпечує надійну їх ізоляцію щодо магнітопроводів і значно скорочує механічні пошкодження котушок. У зв'язку з цим при визначенні технічного стану ізоляції котушок щодо магнітопроводів та інших заземлених частин низьковольтних апаратів звичайно обмежуються вимірюванням опору ізоляції котушок щодо магнітопроводу або заземлених частин апаратів. Значно складніше при діагностуванні котушок низьковольтних апаратів визначити, чи є в міжвитковій ізоляції ушкодження, які можуть призвести до міжвиткового замикання.

Наявні замикання між витками котушок на практиці виявляються порівняно простими пристосуваннями. Один з таких пристроїв [16, 25] показано на рис. 19.

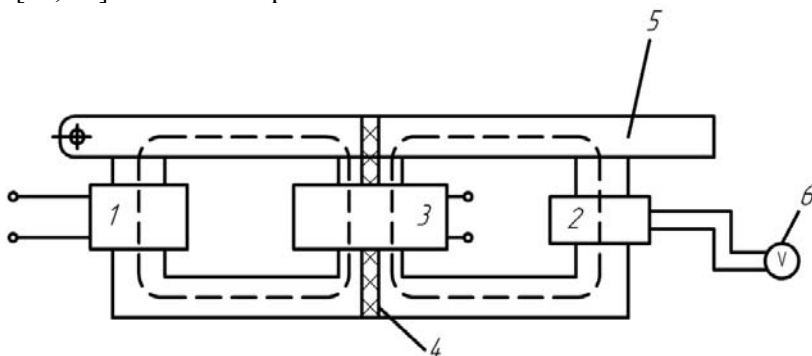


Рис. 19. Пристрій для визначення короткозамкнених витків в обмотках котушок

Пристосування являє собою магнітну систему у вигляді трансформатора з двома роз'ємними магнітопроводами, які не мають між собою магнітної зв'язки і розділені немагнітною прокладкою. На одному магнітопроводі пристосування розміщена намагнічуюча обмотка.

тка – 1, а на другому вимірювальна обмотка – 2, до затискачів якої приєднані електровимірювальні прилади – 6 (див. рис.16). Котушка – 3, перевіряється на відсутність короткозамкнених витків, надягається на суміжні стрижні магнітопроводів, розділених прокладкою – 4.

Після замикання відкидного якоря – 5 на намагнічувальну обмотку – 1 подається змінний струм. Якщо в обмотці котушки – 3 є коротко-замкнені витки, то в них під дією електромагнітного потоку, створеного намагнічувальною обмоткою – 1, індукуються струм. У свою чергу, цей струм створює в магнітопроводі з вимірювальною котушкою – 2 електромагнітний потік, в котушці – 2 наводиться електрорушійна сила і стрілка приладу відхиляється на певний кут. Якщо в контрольованій котушці короткозамкнені витки відсутні, у вимірювальній котушці напруга не індукуює і стрілка приладу не відхиляється.

4.5.2. Діагностування контактних систем низьковольтних апаратів

До контактних систем відноситься до 60% всіх відмов низьковольтних апаратів. В основному відмови виникають унаслідок механічного та електричного зносів робочих поверхонь контактів, виникнення на них плівок, забруднення, а також через втрату пружних властивостей контактних пружин, пошкодження або старіння ізоляційних матеріалів між контактами.

Важливим параметром контактних з'єднань є перехідний опір. Перехідний опір контактів апаратів залежить від струму, характеру навантаження, сили стискання контактів, матеріалу контактів, середовища, що оточує апарат, і ін. Залежність опору контактів відповідно до теорії Хольма та його послідовників можна записати таким виразом:

$$R_{\kappa} = \frac{\varepsilon}{P_{\kappa}^m}, \quad (114)$$

а у відповідності з теорією Чельчліна:

$$R_{\kappa} = \frac{\varepsilon}{P_{\kappa}^m} + k_0, \quad (115)$$

де ε – коефіцієнт, що враховує фізичні властивості матеріалу контактів і стан контактної поверхні;

P_k – статичне натискання контактів;

m – коефіцієнт форми контактів (0,3 – 1);

k_0 – коефіцієнт, що враховує опір тіла контактів або додатковий опір, що створюється плівками на поверхні контактів.

Від струму і опору залежить робоча температура контактів. На практиці для контролю контактних з'єднань вимірюють падіння напруги при проходженні через контакти постійного струму від джерела живлення з напругою 2-5 В. При вимірі опору випробувальний струм повинен бути рівним номінальному.

Втрати напруги на контактах не повинні перевищувати наступних значень: у магнітних пускачів і автоматичних вимикачів при номінальному струмі вище 50 А – 70 мВ, у автоматичних вимикачів з номінальним струмом менше 50 А – 110 мВ, у апаратів з ковзаючими контактами (рубильники, пакетні вимикачі) – 10 – 20 мВ. Падіння напруги на контактах магнітних пускачів 5 і 6 габаритів і автоматичних вимикачів з номінальними струмами, що не перевищують 200 А, зазвичай вимірюють при пропущенні через контакти струму, що становить не менше 20% номінального.

Для порівняння з допустимими значеннями виміряні втрати напруги необхідно перерахувати для приведення їх до номінального значення струму апарата за формулою:

$$\Delta U_n = \frac{\Delta U_e \cdot I_n}{I_e}, \quad (116)$$

де ΔU_n – втрати напруги, наведені до номінального струму апарата, мВ;

ΔU_e – виміряні втрати напруги, мВ;

I_n – номінальний струм апарата, А;

I_e – струм, при якому вимірювалися втрати напруги, А.

Результати спостережень за станом низьковольтних апаратів показують, що однією з основних причин відмов є знос контактів, який призводить до зменшення товщини контакту або контактної напайки і до втрати форми поверхні контактування. Зменшення товщини контактів викликає ослаблення сили стискання контактів, у зв'язку з чим погіршуються умови контактування і підвищується температура контактів.

Найбільш важливим параметром, що характеризує знос контактів низьковольтних апаратів, є провал контактів. Він дорівнює ходу рухомої системи апарата з моменту замикання контактів до моменту замикання магнітної системи. У процесі експлуатації апаратів при зносі контактів провали зменшуються. Дослідження та досвід експлуатації показують, що між значенням провалу контактів і напрацюванням є кореляційний зв'язок. Так, наприклад, при напрацюванні 700 тис. циклів провал контактів зменшується в середньому на 35%.

Провал контактів з певним ступенем точності в заданий момент часу можна обчислити за виразом

$$P_k = P_0 - vt, \quad (117)$$

де P_0 – початкове значення провалу, мм;

v – швидкість зміни провалу, мм / тис. год. або мм / тис. циклів;

t – напрацювання, тис. год. або тис. циклів.

У магнітних пускачів провали контактів визначають в замкнутому положенні з переміщення повідця, на якому закріплений контактний місток, від початку до повного замикання контактів. Раніше провали перевірялися щупами, товщина яких дорівнювала припустимим значенням провалів;

Момент початку замикання контактів зазвичай визначають за загорянням лампочки, включеної послідовно з батареєю і контактами.

Провали магнітних пускачів повинні відповідати даним, наведеним в довідковій таблиці для відповідного типу.

Провали контактів автоматичних вимикачів перевіряють штан-генциркулем і набором щупів. Контакти автоматичних вимикачів вибраковують, якщо провали контактів складають менше 0,5 мм. При необхідності провали автоматичних вимикачів регулюють згідно табличних даних.

Важливим параметром для оцінки технічного стану контактної системи низьковольтних апаратів є натискання контактів. Зменшення величини натискання контактів у процесі експлуатації свідчить як про знос контактів, так і про стан контактних пружин.

Вимірювання показують, що зменшення провалу контактів, що характеризує величину їх зносу, обов'язково супроводжує зменшення кінцевого натиснення, що також сприяє збільшенню швидко-

сті зносу контактів. Зменшення провалу контактів на невелику величину при значному зменшенні кінцевого натиснення вказує на втрату пружних властивостей контактних пружин.

Працездатність контактів магнітних пускачів, автоматичних вимикачів і реле залежить і від зусилля натискання контактів. Тому в процесі експлуатації періодично визначають і при необхідності регулюють зусилля початкового та кінцевого натиснення контактів. Зусилля натискання контактів вимірюють таким чином. Послідовно з контактами включають лампочку з батарейкою для точного визначення моменту розмикання контактів. Рухомий контакт за допомогою спеціальної підвіски, закріпленої на гаку динамометра, повільно відтягують до моменту, коли згасне лампочка, яка вказує на розмикання контактів. В момент розмикання за шкалою динамометра визначають зусилля натискання, яке повинно відповідати даним довідкових таблиць.

При вимірі лінія дії зусилля повинна бути перпендикулярною до площин контактів. Початкове натискання регулюють підкладанням шайб під контактну пружину. Якщо таким чином натискання відрегулювати не можна, пружину замінюють новою. При визначенні кінцевого натиснення контактів на котушку магнітного пускача подають номінальну напругу і відтягують рухливий контакт за допомогою підвіски і динамометра. В момент розмикання контактів за шкалою динамометра визначають зусилля кінцевого натиснення контактів, яке також повинно відповідати даним, наведеним у відповідних довідкових таблицях. Зусилля кінцевого натиснення регулюється так само, як і початкового.

4.5.3. Контроль напруги втягування і відпуску якорів магнітних пускачів

Перед контролем напруги втягування і відпускання якоря перевіряють роботу рухомої частини пускача включенням від руки, а потім при подачі на котушку номінальної напруги. При включенні від руки рухома система пускача повинна вільно переміщатися, а при подачі напруги на котушку негайно включатися без затримок в проміжних положеннях. Для визначення напруги втягування і відпускання якорів магнітних пускачів спочатку на їх котушки подають напругу, рівну 80% номінальної. Магнітний пускач повинен чітко

включатися без зупинок або помітних затримок рухомої системи. При напрузі, що дорівнює 80% номінальної, допускається помірний шум магнітної системи, який не повинен переходити в деренчання. Збільшення напруги втягування вище 85% зазвичай свідчить про збільшення повітряного зазору між якорем і серцевиною (при кількості витків в котушці згідно з паспортними даними).

Для перевірки напруги відпускання якоря на зажими котушки подають номінальну напругу, а потім плавно його знижують і вимірюють в момент відпускання якоря. Напруга відпускання має складати не більше 70% номінальної. Крім того, перевіряють включення пускача при зниженій напрузі, що дорівнює 60% номінальної. Котушка не повинна включати пускач при цій і меншій напрузі.

Вимірювання напруги втягування, відпускання і перевірку включення пускача при зниженій напрузі можна проводити за допомогою автотрансформатора типу ЛАТР чи РНО, підвищувального трансформатора і вольтметра типу Е-59/1 з межами виміру 75-150-300-600 В. Для регулювання напруги при вимірах можна також використовувати високоомний реостат, включений за схемою дільника напруги.

4.5.4. Перевірка роботи елементів електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів

Перевірка роботи елементів електромагнітних розчіплювачів зазвичай зводиться до визначення струму, при якому спрацьовує розчіплювач, однак порядок перевірки розчіплювачем різних серій автоматичних вимикачів має свої особливості. Елементи електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів серії А3100 перевіряють наступним чином. За допомогою схеми або приладу встановлюють струм, що проходить через полюси автоматичних вимикачів на 30% менше від номінального значення струму уставки електромагнітного розчіплювача, наведеного в довідковій таблиці. При цьому вимикач не повинен відключатися. Потім плавно збільшують струм до значення, при якому спрацьовує розчіплювач. Струм спрацьовування вимикача А3110 (А3113/5, А3114/5) не повинен перевищувати струм уставки електромагнітного розчіплювача більш ніж на 30%, а вимикачів типа А3120 (А3123, А3124), А3130 (А3133, А3134), А3140 А3143, А3144) - на 15%. Вимикач повинен

відключатися при спрацьовуванні кожного електромагнітного елемента.

Для перевірки елементів електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів серії АП50 спочатку встановлюють значення випробувального струму на 15% менше струму уставки електромагнітного розчіплювача. При цьому вимикач не повинен відключатися. Поволі збільшуючи, відраховують струм, при якому автоматичний вимикач відключиться. Струм спрацьовування електромагнітного розчіплювача автоматичних вимикачів серії АП50 не повинен перевищувати значень, більш ніж на 15%.

При перевірці електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів з тепловими та електромагнітними елементами може трапитися, що тепловий елемент відключить вимикач раніше, ніж спрацює електромагнітний розчіплювач. Щоб переконатися, що вимикач виключився від електромагнітного елемента, необхідно відразу ж включити його. Нормальне включення свідчить, що вимикач був відключений електромагнітним елементом. При спрацьованні теплового елемента вимикач не можна включити до тих пір, поки не остигнеться елемент.

При перевірці розчіплювача мінімальної напруги автоматичних вимикачів серії АП50 на затискачі котушки розчіплювача подають напругу, рівну 80% номінальної, і включають вимикач. Вимикач повинен чітко включитися. Після цього плавно зменшують напругу на котушці і вимірюють напругу, при якій вимикач відключиться. Це напруга повинна бути не менше 50% номінальної напруги.

4.5.5. Визначення технічного стану і налаштування елементів теплового захисту

Від надійності роботи теплових реле і розчіплювачів автоматичних вимикачів, які є основним захистом електрообладнання від перевантаження, в значній мірі залежить термін служби електропроводів і електроустановок.

Для захисту електрообладнання широко застосовують теплові реле ТРН, ТРП, ТРА і ТРВ. Діапазон номінальних струмів реле ТРН становить від 0,5 до 40А, ТРП – від 25 до 150А, ТРА – від 7 до 200А, ТРВ – від 7 до 200 А. Для визначення технічного стану теплові реле уважно оглядають і вимірюють товщину контактів. Контакти підля-

гають заміні, якщо їх товщина складає менше 0,5 мм. Слід зазначити, що при товщині контактів менше 0,5 мм реле ТРА та ТРВ підлягають вибракуванню.

Нагрівачі теплових реле вибраковуються при замиканні витків, розкритті скріпок (реле ТРН), вигині нагрівача та його зближенні з біметалічною пластиною, а також при вигоранні металу. Біметалеві пластини вибраковуються при деформації і обгоранні. При наявності такого дефекту реле ТРН вибраковується в зібраному вигляді. Контактний тиск перевіряють натисканням голівкою грамометра на рухому систему реле, як це показано на рис. 20. Розчин контактів вимірюють щупами. Вимірні значення контактного тиску і розчинів контактів теплових реле порівнюють зі значеннями для відповідного типу реле в довідкових таблицях і роблять висновок про вибракування у разі перевищення встановленого діапазону зазначених параметрів.

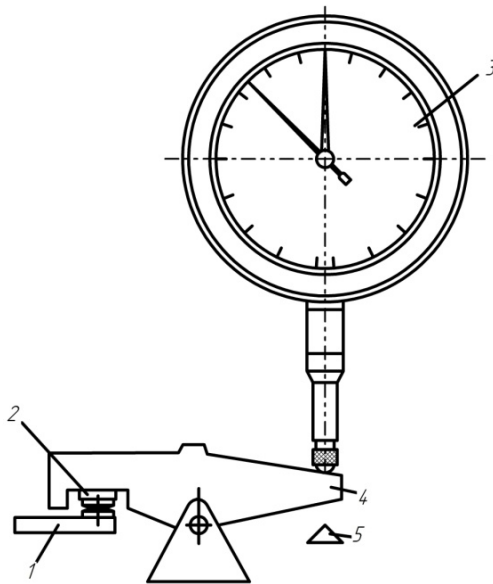


Рис. 20. Положення стрижня грамометра при перевірці контактного тиску реле ТРП-25:

1 – нерухомий контакт; 2 – рухомий контакт; 3 – грамометр;
4 – контактна колодка; 5 – упор

Після визначення тиску і розчину контактів визначають запрограмований час і повернення реле. Для цього реле підключають до затискачів приладу, що дозволяє плавно регулювати струм в широких межах.

Для визначення часу спрацьовування через реле пропускають випробувальний струм, що дорівнює $1,05 I_n$. При температурі 20°C (293 K) реле не має спрацьовувати протягом години.

Потім струм збільшують до $1,2 I_n$ і переконуються в тому, що реле спрацьовує протягом 20 хв. Якщо запрограмований час не відповідає зазначеним значенням, реле регулюють за допомогою важеля плавного регулювання або регулювальними гайками. Якщо відрегулювати реле не вдається, його замінюють.

Налаштування реле вважається задовільним, якщо час спрацьовування реле, що перевіряється або настраюється, відрізняється від часу спрацьовування еталонного реле не більше ніж на $\pm 10\%$.

Під час перевірки чи налаштування параметрів теплових реле переконуються, що час повернення контактів реле в початкове положення не перевищує 3 хв.

Важливою вимогою щодо забезпечення надійності захисту електроприводів і електроустановок є періодична перевірка роботи елементів теплових розчіплювачів автоматичних вимикачів. При перевірці елементів теплових розчіплювачів затискачі автоматичного вимикача приєднують до приладу або до відповідної випробувальної схеми. Через включений автоматичний вимикач пропускають струм навантаження, що дорівнює номінальному струму розчіплювача. При цьому автоматичний вимикач не повинен відключатися. Потім у автоматичних вимикачів перевіряють час спрацьовування теплових розчіплювачів при одночасному навантаженні всіх полюсів випробувальним струмом. Значення випробувального струму для автоматичних вимикачів різних серій і час спрацьовування розчіплювача повинен також відповідати даним, наведеним у технічній довідковій літературі.

Контрольні запитання до розділу

1. Перерахуйте засоби та методи діагностування обмоток ЕМ.
2. Наведить вираз за яким розраховується середня температура нагрітих обмоток електричних машин і апаратів.
3. Які існують сучасні прилади для контролю стану ізоляції електрообладнання в процесі експлуатації?
4. Перерахуйте групи приладів діагностичного обладнання короткозамкнених роторів АД за принципами їх роботи.
5. Які зовнішні ознаки наявності обривів стрижнів короткозамкнених роторів?
6. Які існують методи та засоби для оцінки технічного стану та діагностики дефектів підшипників?
7. За якими параметрами відбувається діагностування стану підшипників в сучасних приладах?
8. За якими критеріями робиться оцінка технічного стану активної сталі АД?
9. По яким ознакам робиться визначення технічного стану колектора?
10. Як і для чого проводиться перевірка і регулювання комутації МПС?
11. Який принцип дії приладу для визначення короткозамкнених витків в обмотках котушок низьковольтних ЕА?
12. Як проводиться діагностування та оцінюється працездатність контактів низьковольтних апаратів?

5. УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

5.1. Управління технічним станом електрообладнання

Останнім часом у всіх областях техніки велика увага приділяється питанню діагностики технічного стану різних машин, механізмів, виробів. Широке поширення методи діагностики знайшли в автомобілебудуванні, літакобудуванні і космічній техніці.

При діагностуванні визначають, яким впливам необхідно піддати електрообладнання для запобігання відмов і відновлення рівня його працездатності. До таких дій відносять регулювання, ремонт або заміну деталей та вузлів, просочення обмоток, сушіння ізоляції, забарвлення поверхонь, обкатку, тобто операції, спрямовані на підвищення або відновлення ресурсу окремих деталей і вузлів та електрообладнання в цілому. Крім того, для управління технічним станом електрообладнання необхідно знати динаміку зміни параметрів стану елементів, зв'язок між показниками швидкості зміни параметрів та ймовірністю відмов, середнім ресурсом елемента по контрольованому параметру та інші показники.

При управлінні технічним станом за допомогою діагностування отримують інформацію про технічний стан електрообладнання, проводять обробку і аналіз інформації та готують рішення. Основна інформація про технічний стан електрообладнання надходить при вимірюванні діагностичних параметрів. Обробку і аналіз інформації проводять перетворенням отриманих при діагностуванні сигналів і величин, а також їх порівнянням з допустимими та номінальними значеннями. Прийняття рішення про впливи на електрообладнання проводять на підставі порівняння результатів вимірювання діагностичних сигналів з їх допустимими значеннями. За цими даними визначають, яким конкретним ремонтним чи іншим діям необхідно піддати електрообладнання і в які терміни.

Таким чином, питання діагностики тісно пов'язані з критеріями працездатності вузлів електричних машин. На підставі виміру цих критеріїв формується діагноз про технічний стан машини. Для процесу діагностики електрообладнання необхідно виявити найбільш інформативні параметри з ряду критеріїв працездатності таких величин, як напруга, струми, моменти і інші електромагнітні та електромеханічні параметри електричних машин. Для кожного класу електричних машин, а також залежно від напруги і потужностей інформативність тих або інших параметрів міняється і повинна визначатися у кожному конкретному випадку спеціально.

Для підвищення ефективності як тестового, так і функціонального діагностування, доводиться пристосовувати електрообладнання до діагностування, роблячи додаткові висновки. На практиці до таких додаткових висновків відносяться зроблені спеціально для цілей діагностування електричні висновки з певних точок електричної схеми електрообладнання. Крім того, застосовують додаткові спеціально встановлені пристрої (датчики вібрації, лінійного переміщення, температури та ін.).

Виходячи з вимог до діагностування і досвіду його впровадження, основними етапами розробок з діагностування електрообладнання є: визначення вузлів і деталей, що обмежують ресурс роботи електроустаткування і підлягають діагностуванню; вибір параметрів і розробка методів діагностування електрообладнання; вибір і розробка засобів для діагностування електрообладнання; розробка технологій діагностування електрообладнання; пошук несправностей електрообладнання.

Також слід враховувати, що деталі й вузли електрообладнання при експлуатації зношуються і старіють, причому інтенсивність зношування і старіння залежить від багатьох факторів. Так, інтенсивність зносу і старіння ізоляційних конструкцій електричних машин залежать не тільки від тривалості роботи і властивостей застосовуваних матеріалів, але і від механічних впливів, температури, впливів зовнішнього середовища та ін.

Знос та старіння – це процеси, що характеризують зміну технічного стану електрообладнання в часі. Вони відображають зміни, що відбуваються в електрообладнанні і призводять до погіршення його властивостей. Таке погіршення властивостей при експлуатації

обумовлює наявність детермінованої (визначальної) складової у процесах зносу і старіння деталей та вузлів. Вплив великої кількості різних чинників призводить до прискорення або до уповільнення процесів зносу або старіння в часі, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зносу і старіння деталей і вузлів в основному містять детерміновану і випадкову складові. Вплив кожної з них для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відбивається на характері процесу зносу або старіння.

Незважаючи на те, що на кожен окрему електричну машину або апарат впливає певне, притаманне тільки даній машині або апарату поєднання факторів, що обумовлюють ту чи іншу швидкість втрати експлуатаційних властивостей, результати впливу кожного фактору на втрату властивостей підкоряються певним законам.

Механічні напруги, яким піддаються матеріали ізоляційної конструкції електрообладнання як у процесі виготовлення, так і при експлуатації, також приводять до старіння ізоляції. Зменшення терміну служби ізоляції під дією механічних напруг і при зміні структури матеріалу підпорядковується певному закону. Слід зазначити, що термін служби ізоляції може значно змінюватися не тільки під впливом механічних напруг і температури, але і під впливом інших факторів. Таким чином, фізичні та хімічні процеси, що відбуваються в ізоляції електроустаткування, підпорядковані певним законам, що обумовлює можливість з певним ступенем точності заздалегідь передбачати (прогнозувати) на підставі даних відповідних вимірів технічний стан ізоляції в майбутньому.

У роботах багатьох дослідників [14, 15, 30, 37] показано, що знос деталей в сполученнях машин і механізмів пропорційний роботі сил тертя, тобто добуток сил нормального тиску на коефіцієнт тертя і шлях дії сил тертя. У свою чергу, кожен з множників залежить від ряду чинників. Сила нормального тиску залежить в основному від навантаження машини або від режиму її роботи, коефіцієнт тертя – від стану поверхонь тертя і якості мастила, шлях дії сил тертя – в основному від тривалості роботи при заданих режимах. Це положення поширюється і на деталі механічної частини електроустаткування.

Таким чином, можна зробити висновок, що фізико-хімічні процеси зміни властивостей і розмірів деталей і вузлів механічної частини електричних машин і апаратів також підкоряються певним законам і їх технічний стан з певним ступенем точності можна прогнозувати.

Прогнозування технічного стану електрообладнання, тобто процес передбачення зміни параметрів в майбутньому, є порівняно важким технічним завданням. Це пов'язано з тим, що на технічний стан навіть однотипних деталей та вузлів електрообладнання впливає поєднання великого числа факторів, частину з яких важко врахувати.

За умовами технології виробництва деталі і вузли електричних машин і апаратів, як і інших технічних пристроїв, виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному та структурному складовими матеріалів. Це також впливає на інтенсивність зносу або старіння деталей та вузлів.

Крім того, на інтенсивність зносу деталей та вузлів електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування та ремонти проводять нерегулярно або взагалі не проводять, швидкість зносу вузлів і деталей значно збільшується і знос швидко досягає своїх граничних значень.

В результаті всі перераховані вище фактори впливають на достовірність прогнозування роботи електроустаткування.

Прогнозування технічного стану виробу може здійснюватися як у процесі його розробки, так і в період експлуатації. В останньому випадку метою прогнозування є своєчасне виявлення несприятливого стану виробу та розробка рекомендацій щодо підвищення його надійності.

Слід зазначити, що розроблені до цього часу методи прогнозування не дають можливості передбачити раптові відмови, тобто відмови, що характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану деталі або вузла електрообладнання до граничного значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, що характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану і обумовлені зносом або старінням матеріалу деталей або вузлів електрообладнання.

Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів електричних машин і апаратів. Завданнями прогнозування в процесі експлуатації електрообладнання є: скорочення трудомісткості і вартості робіт, які виконуються при поточних ремонтах, тому що вони проводяться лише за необхідності, тобто за повного вичерпання ресурсу деталей та вузлів [28, 35, 37].

Слід також мати на увазі, що вивчення питань прогнозування і оцінки працездатності технічного стану електричних машин вказує на існування взаємозв'язків між якістю перетворення енергії, станом ізоляції, підшипників і довговічністю електричної машини в цілому [40-42]. Особливо це актуально для електромеханічних систем, що використовують електричну енергію змінного струму, яка визначається якістю електричної енергії в мережах живлення. Якість використовуваної електроенергії регламентується існуючим міждержавним стандартом ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» [43]. Як показує аналіз, якість електроенергії впливає на нагрів струмоведучих частин і ізоляції електрообладнання, тому результати розрахунків по класичним співвідношенням будуть завжди надмірно завищеними. Зниження якості електроенергії в порівнянні з діючими нормативами на станції є причиною появи в струмоведучих частинах і ізоляції електрообладнання додаткових втрат активної потужності, які є джерелом додаткового нагрівання як ізоляції так і машини в цілому. Тому реальний строк служби ізоляції електрообладнання буде зменшеним.

У зв'язку з тим, що діагностування є складовою частиною системи ППР (планово-попереджувальних робіт) електрообладнання, при розробці методів та засобів для діагностування потрібно послідовно вирішувати технічні та організаційні питання, що забезпечують не тільки отримання достовірних результатів і створюють можливість прогнозування технічного стану, але й високу ефективність застосування діагностування.

Система ППР передбачає регламентний режим експлуатації, коли проводиться періодичне технічне обслуговування, встановлення видів ремонту, їх послідовності та періодів між ремонтами.

Основним недоліком системи ППР є велика трудомісткість робіт, пов'язана з тим, що розбирання електрообладнання є регламе-

нтною операцією, що виконується найчастіше для визначення технічного стану вузлів і деталей, тому що після розбирання нерідко виявляється, що електрообладнання знаходиться в задовільному стані і проводити ремонт немає необхідності. Крім того, відповідно до системи ППР трудомісткість ремонту пропорційна кількості обслуговуваного електроустаткування, що вимагає при збільшенні кількості електрообладнання пропорційного зростання чисельності ремонтного персоналу [35, 44].

В даний час із збільшенням кількості, удосконалюванням конструкції електрообладнання, а також з урахуванням останніх досягнень виміральної техніки настав час переходу від регламентної форми системи ППР за періодичністю до нової форми – *за технічним станом*. Це дозволить більш повно використовувати технічний ресурс в цілому і забезпечити надійну роботу електрообладнання при мінімальних витратах.

5.2. Принципи та напрями прогнозування відмов основних елементів електричних машин

Можливість рішення задачі прогнозування стану виробів обумовлюється тією обставиною, що в більшості випадків їх відмови є наслідком поступового накопичення пошкоджень, поступового старіння і зношування. Вказане відноситься як до поступових відмов, так і до раптових. Поняття «раптова відмова» відносно, так як стрибкоподібної зміни параметрів технічних пристроїв передують поступова зміна будь-яких фізичних величин, про які відсутня інформація.

Обчисленню прогнозованої характеристики завжди повинні передувати досвід, експеримент, дані якого використовуються спільно з інформацією. Саме ця особливість відрізняє прогноз від розрахунку.

У теорії надійності є два напрями кількісної оцінки надійності виробів на основі результатів їх випробувань і експлуатації: констатація рівня надійності і проектування надійності. Констатація рівня надійності ґрунтується на результатах досвіду (визначальні і контрольні випробування на надійність, дані експлуатації). Для групи однотипних виробів може бути оцінена «вірогідність безвідмовної роботи», «середній час напрацювання повністю» і так далі.

Оцінка надійності стає такою, що прогнозує, коли на основі аналізу фізичних процесів, вивчення закономірностей, яким підпорядковується процес формування показників надійності, робиться припущення про майбутній стан надійності виробу.

Зазвичай розрізняють процедури прогнозування надійності і технічного стану. Завданням прогнозування технічного стану є передбачення технічних параметрів або віднесення цих параметрів до якогось класу, а також визначення вірогідності виходу цих параметрів за межі допуску, тобто прогнозування відмов. Завданням прогнозування надійності є прогноз кількісних показників надійності виробу на основі прогнозування поступових і раптових відмов.

Прогнозування може бути груповим і індивідуальним. При груповому прогнозуванні вивчається сукупність виробів. При індивідуальному – у якомусь інтервалі часу спостерігається зміна параметра одного конкретного виробу з даної сукупності. Використовуючи отримані дані, визначають вірогідність безвідмовної роботи до якогось моменту часу в майбутньому. До методів групового прогнозування можна віднести статистичну оцінку терміну служби однотипних виробів на основі результатів випробувань. В цьому випадку шляхом обробки результатів випробувань на термін служби деякого числа виробів обчислюється кількісна середньоквадратична оцінка терміну служби всієї партії в цілому. Перевагою методу індивідуального прогнозування є можливість оцінки надійності (технічного стану) кожного конкретного виробу [44].

В електричних машинах найбільш детально досліджені і мають ряд практичних співвідношень для прогнозування відмов наступні важливі питання - розрахунок довговічності ізоляції обмотки і стану підшипників.

Далі розглянемо послідовно деякі сучасні дослідження з питань розрахунку ресурсу та прогнозування відмов цих основних та відповідальних за працездатність електричної машини елементів.

За умовами технології виробництва ізоляційні конструкції електрообладнання виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному і структурному складу матеріалів ізоляції. Це впливає на інтенсивність зносу або старіння ізоляції електрообладнання. Крім того, на інтенсивність зносу ізоляції електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та

поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування і ремонти проводять нерегулярно або взагалі не проводять, швидкість зносу ізоляції вузлів значно збільшується і зноси швидко досягають своїх граничних значень. Тому всі переховані вище фактори впливають на достовірність прогнозування роботи електрообладнання.

Слід відзначити, що розроблені до теперішнього часу методи прогнозування не дають можливості передбачати раптові відмови, тобто відмови, які характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану ізоляції електрообладнання до межового значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, які характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану і обумовлені зносом або старінням матеріалу ізоляції електрообладнання. Вплив багатьох різних факторів призводить до прискорення або уповільнення процесів зносу та старіння ізоляції у часі, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зносу та старіння ізоляції в основному містять детерміновану і випадкову складові. Вплив кожної з цих складових для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відображається на характері і процесу зносу.

Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання, що дає можливість скоротити трудомісткість й вартість робіт, які виконуються при поточних ремонтах, встановлених лише за необхідністю, встановити терміни (періодичність) проведення діагностування. Визначення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання дозволяє об'єктивно визначити момент необхідності ремонтного впливу, який відповідає найповнішому використанню її ресурсу. При цьому можна користуватися поняттям коефіцієнту технічного ресурсу [40]. За допомогою цього коефіцієнта оцінюють залишковий ресурс ізоляції електрообладнання. Для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються в процесі експлуатації електрообладнання, коефіцієнт технічного ресурсу підраховується за формулою:

$$k_{\text{зал}} = (P_{\text{зр}} - P_{\text{г}}) / (P_{\text{зр}} - P_{\text{н}}), \quad (118)$$

де $P_{\text{зр}}$ – граничне значення параметра;

$P_{\text{н}}$ – номінальне значення параметра;

$P_{\text{г}}$ – вимірне значення параметра.

Якщо у процесі експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу визначається виразом:

$$k_{зал} = (P_в - P_{зр}) / (P_n - P_{зр}). \quad (119)$$

Для нової ізоляції електрообладнання $k_{зал} = 1$, а для тої, що повністю вичерпала свій ресурс $k_{зал} = 0$.

Згідно з аналізом даних з [1 – 7], доцільно виділити три методи прогнозування: аналітичного прогнозування, імовірнісного прогнозування та статистичної класифікації, які повністю охоплюють означені вище підходи щодо прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання.

Метод аналітичного прогнозування доцільно використовувати для завдань, коли зміна параметра, який контролюється, інерційна у часі і всі зміни поступово накопичуються. Таку зміну параметру P , який контролюється, можна представити функцією $P(t)$. При цьому потрібно використовувати вимірювання деяких значень функцій $P(t_0)$, $P(t_1)$ і $P(t_2)$ відповідно в моменти часу t_0 , t_1 і t_2 . Завданням прогнозування є визначення за відомими значеннями функції $P(t)$ у минулому і у теперішньому часі величини функції у майбутньому, тобто в моменти часу t_i , а також визначення моменту часу, коли параметр досягне свого припустимого значення $P_{пр}$.

Метод імовірнісного прогнозування застосовують для завдань, де необхідно визначити ймовірність виходу або невиходу діагностичного параметру P , який діагностується, за встановлені межі. Задача формулюється наступним чином. Є значення параметра P у моменти часу t_0 , t_1 , t_2 , у яких стани елемента, який прогнозується, характеризуються відповідними функціями розподілу $F_i(P)$. За цими відомими значеннями необхідно визначити ймовірність збереження ізоляції працездатності у майбутньому, тобто що функція $P(t)$ не вийде за своє припустиме значення $P_{пр}$.

При вирішенні завдань прогнозуванням *методами статистичної класифікації* відомі значення параметру в певні моменти часу відносять до одного із класів, тобто до свого роду еталону, а потім, виходячи із закономірності зміни параметрів даного класу, вирішують, як буде змінюватися даний параметр у майбутньому. При цьому поділ значень параметрів на класи може бути тимчасовим (за часом або напруженням) або параметричним (за величинами па-

раметрів, які контролюються). Число і діапазон зміни параметрів у кожному класі залежить від особливостей конструкції та умов роботи елемента електрообладнання, який діагностується.

Нижче наведений опис найпростіших методів прогнозування, які достатньо легко пристосовувати для прогнозування ресурсу роботи електрообладнання і не вимагають використання складного математичного апарату.

Метод лінійного прогнозування. В його основу покладено припущення, що у процесі експлуатації зовнішні впливи на ізоляцію електрообладнання, яка діагностується, є незмінними, а залежність зміни величини діагностичного параметру від часу – лінійна. Для застосування методу необхідно мати дані про напрацювання об'єкта з початку експлуатації до моменту діагностування, а також про межеве і номінальне значення параметра. Напрацювання об'єкта діагностування до настання граничного стану $t_{зал}$ визначають за формулою

$$t_{зал} = t \frac{k_{зал}}{1 - k_{зал}}, \quad (120)$$

де t – напрацювання від початку експлуатації до моменту діагностування, год.;

$k_{зал}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу, який визначається із формул (118) або (119).

Метод доцільно використовувати для орієнтовного визначення залишкового ресурсу вузлів електрообладнання (в першу чергу електричних машин).

Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування. Метод базується на даних вимірювань, які проводяться при систематичних діагностуваннях через будь-які проміжки часу [40]. Визначення терміну безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання, яка діагностується, за цим методом проводиться до наступного діагностування. Метод багатоступеневого лінійного прогнозування враховує дійсну закономірність зношування або старіння об'єкта діагностування у даних конкретних умовах експлуатації. Крім того, при прогнозуванні на період до наступного діагностування приймається, що об'єкт діагностування буде працювати у більш несприятливих умовах, у зв'язку з чим ресурс безвідмовної роботи визначається за максимально можливою середньою інтенсивністю зміни параметра за

період між двома останніми діагностуваннями. Після наступного діагностування знову встановлюють гарантований ресурс безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання.

Діагностування проводять таким чином до повного вичерпання ресурсу об'єкта. Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування не потребує даних про напрацювання і зміну величини параметрів з початку експлуатації електричної машини або апарату. В результаті лінійної апроксимації і екстраполяції зміни параметрів на деякий проміжок часу отримують величину періоду безвідмовної роботи завжди меншу дійсного, тобто завжди резервується певний запас надійності результатів прогнозу.

Гарантований ресурс безвідмовної роботи деталей, вузлів і сполучень, технічний стан яких характеризується параметрами, що мають лінійні або криволінійні залежності від часу роботи, визначається із виразу:

$$t_{zap} = (P_{cp} - P_{\theta}) / (P_{\theta} - P_{\theta-1}) t_0 k_0, \quad (121)$$

де t_{zap} – гарантований ресурс безвідмовної роботи,

P_{cp} – граничне значення параметра;

$P_{\theta}, P_{\theta-1}$ – виміряна величина параметра відповідно при даному і попередньому діагностуванні;

t_0 – період між даними і попередніми діагностуванням, од. напрацювання;

k_0 – коригувальний коефіцієнт.

Якщо, наприклад, діагностування проводилося у моменти часу t_1, t_2, t_3 і при цьому отримані значення параметра відповідно P_1, P_2, P_3 , то середня інтенсивність зміни параметру за відрізок часу між 1-м і 2-м, 2-м і 3-м діагностуваннями складає:

$$t_{cp1-2} = (P_2 - P_1) / (t_2 - t_1); \quad (121)$$

$$t_{cp2-3} = (P_3 - P_2) / (t_3 - t_2). \quad (122)$$

Після кожного діагностування коректують результат прогнозування з урахуванням середньої інтенсивності зміни параметру за час між останнім і попереднім діагностуванням. При цьому припускається, що за період часу, який прогнозується, до наступного діагностування інтенсивність зміни параметра не може перевищити інтенсивність, яка була у попередньому періоді. У іншому випадку

закономірність зміни параметра повинна змінитися, тобто спадна інтенсивність повинна змінитися на зростаючу. Якщо діагностичний параметр змінюється за зростаючою криволінійною залежністю зі зростаючою інтенсивністю, то коригувальний коефіцієнт визначається як відношення значень параметра при попередньому і даному діагностуванні, тобто:

$$k_0 = P_{e-1} / P_e. \quad (123)$$

У випадках зменшення параметра при роботі об'єкта діагностування зі зростаючою інтенсивністю, коригуючий коефіцієнт визначають за формулою:

$$k_0 = (P_{поч} + P_{сп} - P_{e-1}) / P_{поч}, \quad (124)$$

де $P_{поч}$ – початкове значення параметру.

Таким чином, для підвищення достовірності даних при прогнозуванні ресурсу ізоляції електрообладнання за допомогою багату-ступінчатого лінійного методу прогнозування необхідно попередньо знати загальну закономірність зміни діагностичних параметрів. Якщо загальна закономірність параметрів невідома, то розрахунок гарантованого ресурсу безвідмовної роботи проводиться з урахуванням коригувального коефіцієнта, обчисленого за формулою, яка відповідає закономірності зі зростаючою інтенсивністю зміни параметра. При цьому гарантований ресурс роботи до наступного діагностування буде скоригований у бік зменшення.

Розглядаючи питання ресурсу ізоляції, необхідно відмітити, що також досить часто відбуваються пошкодження ізоляції не пов'язані зі зносом та старінням, а має місце бути продавлювання, прорізання її гострими крайками сердечника статора, біля виходу провідника з паза, утворення тріщин внаслідок напруг при розтягуванні ізоляції внаслідок вигину і т. п. Такі місцеві дефекти часто розвиваються порівняно швидко і призводять до пробоя ізоляції задовго до істотного погіршення її властивостей внаслідок процесів перегріву та природного старіння. Ізоляція пазової частини обмотки випробовує стиснення під дією електродинамічних зусиль, при наявності зазорів у пазу вона також схильна до ударів і стирання об стінки паза. Якщо свобода переміщення відсутня, то в ізоляції крім розтягування і стиснення можлива поява деформації зсуву.

При вигині лобових частин обмотки найбільші напруги виникають у місцях виходу стержнів або катушок з пазів, де ізоляція випробує напруги стиснення і розтягування. Крім того, вона мнеться на прокладках і місцях зіткнення з бандажами. В більшості випадків перелічені зусилля мають циклічний характер, причому характерною є вібрація з частотою 100 Гц [37].

Дія вібрації – вібраційне старіння на всипні обмотки виражається в поступовому руйнуванні просочувального лаку, в результаті чого порушується цементация обмотки і окремі провідники набувають деяку свободу переміщення. Це веде до руйнування виткової ізоляції в точках дотику сусідніх провідників, в результаті чого збільшується ймовірність віткових замикань. Помічено, що старіння ізоляції низьковольтних машин, що працюють при помірних температурах обмоток, взагалі не може бути пояснено з позицій електричних або теплових явищ [39]. У цих випадках найбільш суттєвими причинами, що викликають поступове руйнування ізоляції, є механічні навантаження. З рівняння Ходвинка для швидкості продавлювання плівки (71), розглянутого раніше, та виразу (72) для розрахунку часу повного продавлювання або довговічності (τ , год.) може бути отриманий коефіцієнт зниження довговічності:

$$k_{\tau} = k_m^n, \quad (125)$$

З урахуванням цього може бути отримане розрахункове значення k_m , при якому термін служби ізоляції знижується вдвічі [37]. :

$$k_m = \sqrt[n]{2}. \quad (126)$$

Тоді контроль за вібраційним старінням ізоляції може здійснюватися на основі значень індексу:

$$C_i = \frac{k_m}{\sqrt[n]{2}}, \quad (127)$$

При $C_i \geq 1$, варіація моменту перевищує допустиму і подальша експлуатація двигуна не бажана;

При $C_i < 1$, процес старіння ізоляції вимагає уваги, так як може відбутися вихід двигуна з ладу.

Таким чином, отримані коефіцієнти дають можливість спрогнозувати час роботи ізоляції.

Для більшості електричних машин друге за значенням (після обмотки) джерелом відмов уявляють собою підшипники.

Підшипники кочення також досить чутливі до вібрації, но поперед всього до перевантажень. Відомо [4], що при збільшенні навантаження на підшипник удвічі його довговічність зменшується приблизно в 10 разів.

При розрахунку підшипників кочення визначають їх типорозміри при заданих термінах служби, навантаженні і частоті обертання.

Найбільше – радіальне навантаження на підшипник.

Довговічність підшипника за наявності змінної складової навантаження може бути розрахована за виразом [4]:

$$n \cdot T_{pm} = \left(\frac{C}{Q'}\right)^k \quad (128)$$

де n – швидкість обертання, об/хв;

C – коефіцієнт працездатності;

$k=3,33$;

$Q' = k_m f (Mn)$ динамічне навантаження на підшипник при наявності змінної складової.

З урахуванням розрахункового терміну служби $T_{pm.n}$ (зазвичай приймають 12000 год.) коефіцієнт зниження довговічності підшипника:

$$k_t = \frac{1}{n \cdot T_{pm.n}} \cdot \left(\frac{C}{Q'}\right)^k \quad (129)$$

Отриманий коефіцієнт дає можливість спрогнозувати час роботи підшипникових вузлів під навантаженням, але точніше можна отримати за даними ІБР з урахуванням різних умов експлуатації [37].

Для розрахунку підшипників на заданий ресурс [30] застосовують ідею зниження контактних напружень σ_H зі зростанням числа циклів N контактного навантаження, що має математичний вираз у вигляді:

$$\sigma_H^m \cdot N = const \quad (130)$$

Оскільки величина N пропорційна числу обертів n підшипника, а його довговічність L вимірюється мільйонами обертів ($L = 10^6 \cdot n$), то вираз (130) може бути поданий як:

$$\sigma_H^m \cdot L = const \quad (131)$$

Переходячи від напружень у контакті σ_H до радіальної сили F_r , що викликала ці напруження, одержимо вираз наступного вигляду:

$$F_r^p \cdot L = const \quad (132)$$

Спеціальні залежності дозволяють для кожного, наприклад, радіального підшипника, визначити постійне радіальне навантаження при $L = 1$. Це навантаження при нерухомому зовнішньому кільці називається *динамічною радіальною вантажністю*, позначається « C_r » і наводиться в довідниках. *Динамічна радіальна вантажність* підшипника – умовно нерухома постійна радіальна сила, яку може сприймати підшипник без появи ознак втоми на поверхнях контакту кілець і тіл кочення протягом одного мільйона обертів внутрішнього кільця при імовірності безвідмовної роботи 90 %.

З урахуванням поняття динамічної радіальної вантажності вираз (132) має вигляд:

$$F_r^p \cdot L = C_r^p \cdot 1 = const \quad (133)$$

звідки вираз для *базового розрахункового ресурсу* підшипника в мільйонах обертів при його 90 %-вій безвідмовній роботі з деталями зі сталі ШХ-15 звичайної технології отримання (без очищення металу від різних сторонніх включень) і при звичайних умовах експлуатації визначається виразом:

$$L_0 = \left(\frac{C_r}{F_r}\right)^p, \quad (134)$$

де p – показник ступеня: для кулькових підшипників $p = 3$, для ролікопідшипників $p = 10/3$.

Якщо на підшипник діють спільно радіальна й осьова сили, вводять поняття *еквівалентного радіального динамічного навантаження* P_r . Це таке умовне постійне радіальне навантаження, наприклад, для радіальних і радіально-упорних підшипників, під дією якого підшипник з рухомим внутрішнім кільцем і нерухомим зовнішнім буде мати той же ресурс, що й в умовах дійсного навантаження і обертання. Тоді замість виразу (134) варто використовувати:

$$L_{\sigma} = \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^p, \quad (135)$$

У загальному випадку, якщо умови експлуатації підшипників відрізняються, наприклад, розподілом навантажень на тіла кочення, застосуванням нових матеріалів для деталей чи присадок та домішок до мастильних матеріалів у ГОСТ 18855-94 (аналог ДСТУ на цей час не встановлений) передбачен так званий *відкорегований ресурс* $L_{в.р.}$:

$$L_{в.р.} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{\sigma} \quad (136)$$

де a_1 – коефіцієнт, що корегує ресурс залежно від рівня надійності підшипника ($a_1=1$ при $L_{\sigma}=90\%$);

a_2 – коефіцієнт, що корегує ресурс залежно від спеціальних властивостей підшипника;

a_3 – коефіцієнт, що корегує ресурс залежно від спеціальних умов експлуатації.

Конкретні значення коефіцієнтів a_2 і a_3 потрібно вибирати шляхом експлуатаційних випробувань.

На практиці ресурс підшипників визначають не в мільйонах циклів навантаження, а в годинах роботи:

$$L_{p.n.} = \frac{10^6 \cdot L_{\sigma}}{60 \cdot n}, \quad (137)$$

тоді перевіірочний розрахунок підшипників зводиться до порівняння розрахункового ресурсу $L_{p.n.}$ з потрібним (заданим) ресурсом L за умовою:

$$L_{p.n.} > L .$$

Перевагами розрахунку на заданий ресурс підшипників кочення за ГОСТ 18855-94 є відносна простота, комплексність та осередненість в урахуванні багатьох технологічних та експлуатаційних факторів, що пов'язані з розсіюванням фізико-механічних властивостей матеріалів, параметрів технології виготовлення деталей, супутніми деградаційними процесами (зміна властивостей контактних поверхонь, забруднення та втрата несучої здатності мастильного матеріалу). Вдосконалення технологічних процесів виготовлення та контролю підшипників і, особливо, підвищення якості сталі (зменшення числа домішок, підвищення структурної однорідності) останнім часом дозволили збільшити фактичний ресурс підшипників і, навіть, перевищити розрахунковий ресурс.

Таким чином, розглянуті вище питання показують деякі напрями та можливості розрахунку та прогнозування відмов елементів електричних машин. Подальше проведення досліджень і розробок з розвитку питань прогнозування дозволить підвищити надійність електроустаткування і звести до мінімуму раптові відмови, а отже і збиток в господарствах країни, викликаний раптовими зупинками аварійного характеру.

Контрольні запитання до розділу

1. У чому полягає принцип прогнозування ЕТУ?
2. Яке призначення, недоліки та переваги системи ППР?
3. За допомогою чого оцінюють залишковий ресурс ізоляції електрообладнання?
4. Наведить та проаналізуйте співвідношення для розрахунку підшипників на заданий ресурс.

Завдання для розрахунку надійності електрообладнання

*Довідкові таблиці для розв'язання деяких завдань
приведені в додатку I*

1. Імовірність безвідмовної роботи трансформатора $p_T = 0,98$. Яке число паралельно сполучених трансформаторів забезпечать імовірність безвідмовної роботи $P = 0,999$?
2. Імовірність безвідмовної роботи розподілена по показовому закону. Знайти імовірність відмови в період $t = [0; 1000]$ при $\lambda = 0,005$.
3. Середній час напрацювання на відмову підкоряється нормальному закону з $T_{cp} = 1000$ год., середньоквадратичним відхиленням (СКВ) $\sigma = 100$ год. Який максимальний термін роботи з імовірністю $P = 0,95$?
4. Проводяться випробування електричних машин. Загальне їх число $N_0 = 50$. Число відмов:

$t = 2000$ год.	$n(2000) = 10$
$t = 2100$ год.	$n(2100) = 30$

Визначити:

а) імовірність безвідмовної роботи $P(2000)$	– ?
б) частоту відмов $a(2100)$	– ?
в) інтенсивність відмов $\lambda(2100)$	– ?
5. Імовірність безвідмовної роботи пристрою розподілена по показовому закону з $\lambda = 0,001$. Протягом якого часу $P > 0,99$?
6. З якою імовірністю можна гарантувати, що величина повітряного зазору з математичним очікуванням $D = 0,5$ мм і СКВ $\sigma = 0,05$ мм відхилиться від заданої не більше ніж на $\delta = 0,1$ мм? Закон розподілу – нормальний.

7. Побудувати криві імовірності безвідмовної роботи для одного реле $P_p(t)$ і системи паралельно сполучених реле, що незалежно живляться $P_c(t)$, якщо задано середньостатистичне значення часу відмов $T = 1000$ год., СКВ $\sigma_t = 300$ год, число реле $N = 4$, допустиме число відмов реле $n_1 = 3$.
8. Час безвідмовної роботи батареї акумуляторів підкоряється закону Гауса з параметрами $m_x = 100$ год. і СКВ $\sigma_x = 10$ год. Яка імовірність безвідмовної роботи протягом 120 год. і як забезпечити імовірність безвідмовної роботи $P_c = 0,5$?
9. Імовірність безвідмовної роботи пристрою розподілена по показовому закону з параметром $\lambda = 0,0005$. Знайти імовірність того, що пристрій вийде з ладу в проміжок часу $t = [1000; 2000]$.
10. Діаметр випущеної деталі – випадкова величина, підпорядкована нормальному закону з математичним очікуванням 0,05 м і СКВ $\sigma = 0,009$ м. Встановити, в яких кордонах слід чекати діаметр деталі, аби вірогідність виходу за ці межі була рівна $P = 0,75$.
11. Яка імовірність безвідмовної роботи машини постійного струму, структурна схема надійності якої складається з колекторно-щіткового ($p_k = 0,95$) і підшипникового ($p_n = 0,999$) вузлів, обмоток якоря ($p_a = 0,98$) і збудження ($p_z = 0,99$) для $t = 10000$ год?
12. Імовірність безвідмовної роботи трансформатора $p_r = 0,999$. Яке число паралельно сполучених трансформаторів забезпечать імовірність безвідмовної роботи $P = 0,999999$?
13. Імовірність безвідмовної роботи розподілена по показовому закону. Знайти імовірність відмови в період $t = [5000; 10000]$ при $\lambda = 0,0001$.
14. Середній час напрацювання на відмову підкоряється нормальному закону з $T_{cp} = 5000$ год., СКВ $\sigma = 500$ год. Який максимальний термін роботи з імовірністю $P = 0,9$?
15. Проводяться випробування електричних машин. Загальне їх число $N_0 = 20$. Число відмов:
- | | |
|-----------------|----------------|
| $t = 1000$ год. | $n(1000) = 5$ |
| $t = 1100$ год. | $n(1100) = 10$ |

Визначити:

- а) імовірність безвідмовної роботи $P(1000) - ?$
- б) частоту відмов $a(1050) - ?$
- в) інтенсивність відмов $\lambda(1050) - ?$

16. Імовірність безвідмовної роботи пристрою розподілена по показовому закону з $\lambda = 0,0001$. Протягом якого часу $P > 0,999$?
17. З якою імовірністю можна гарантувати, що величина повітряного зазору з математичним очікуванням $D = 1$ мм і СКВ $\sigma = 0,1$ мм відхилиться від заданої не більше ніж на $\delta = 0,2$ мм? Закон розподілу – нормальний.
18. Імовірність безвідмовної роботи пристрою розподілена по показовому закону з параметром $\lambda = 0,001$. Знайти імовірність того, що пристрій вийде з ладу в проміжок часу $t = [10; 200]$.
19. Час безвідмовної роботи батареї акумуляторів підкоряється закону Гауса з параметрами $m_x = 50$ і СКВ $\sigma_x = 4$. Яка імовірність безвідмовної роботи протягом 55 год. і як забезпечити імовірність безвідмовної роботи $P_c = 0,75$?
20. Імовірність безвідмовної роботи пристрою розподілена по показовому закону з параметром $\lambda = 0,0001$. Знайти імовірність того, що пристрій не вийде з ладу в проміжок часу $t = [200; 2000]$.
21. Діаметр випущеної деталі – випадкова величина, підпорядкована нормальному закону з математичним очікуванням 0,1 м і СКВ $\sigma = 0,01$ м. Встановити в яких межах слід чекати діаметр деталі, аби вірогідність виходу за ці кордони була рівна $P = 0,9$.
22. Яка імовірність безвідмовної роботи асинхронного двигуна, структурна схема надійності якого складається з обмотки статора ($p_{o.c.} = 0,91$), ротора ($p_p = 0,97$) та підшипникового вузла ($p_n = 0,93$) для $t = 3000$ год?

ДОДАТКИ

Додаток І

Значення математичних функцій для практичних розрахунків [26]

Таблиця ДІ

Значення функцій Лапласа $\Phi(x)$ та $\bar{\Phi}(x) = 0,5 \Phi(x/\sqrt{2})$

x	$\Phi(x)$	$\bar{\Phi}(x)$	x	$\Phi(x)$	$\bar{\Phi}(x)$	x	$\Phi(x)$	$\bar{\Phi}(x)$	x	$\Phi(x)$	$\bar{\Phi}(x)$
0,00	0,0000	0,0000	0,60	0,6039	0,2257	1,20	0,9103	0,3849	1,80	0,9891	0,4641
02	0226	0080	62	6194	2324	22	9155	3888	82	9899	4656
04	0451	0160	64	6346	2389	24	9205	3925	84	9907	4671
06	0676	0239	66	6494	2454	26	9252	3962	86	9915	4686
08	0901	0319	68	6638	2517	28	9297	3997	88	9922	4699
0,10	1125	0398	0,70	6778	2580	1,30	9340	4032	1,90	9928	4713
12	1348	0478	72	6914	2642	32	9381	4066	92	9934	4726
14	1569	0557	74	7047	2703	34	9419	4099	94	9939	4738
16	1790	0636	76	7175	2764	36	9456	4131	96	9944	4750
18	2009	0714	78	7300	2823	38	9490	4162	98	9949	4761
0,20	2227	0793	0,80	7421	2881	1,40	9523	4192	2,00	9953	4772
22	2443	0871	82	7538	2939	42	9554	4222	05	9963	4798
24	2657	0948	84	7651	2995	44	9583	4251	10	9970	4821
26	2869	1026	86	7761	3051	46	9610	4279	15	9976	4842
28	3079	1103	88	7867	3106	48	9636	4306	20	9981	4860
0,30	3286	1179	0,90	7969	3159	1,50	9661	4332	2,25	9985	4877
32	3491	1255	92	8068	3212	52	9684	4357	30	9988	4892
34	3694	1331	94	8163	3264	54	9706	4382	35	9991	4906
36	3893	1406	96	8254	3315	56	9726	4406	40	9993	4918
38	4090	1480	98	8342	3365	58	9745	4429	45	9995	4928
0,40	4284	1554	1,00	8427	3413	1,60	9763	4452	2,50	9996	4938
42	4475	1628	02	8508	3461	62	9780	4474	60	9998	4953
44	4662	1700	04	8586	3508	64	9796	4495	70	9999	4965
46	4847	1772	06	8661	3554	66	9811	4515	80	9999	4974
48	5027	1844	08	8733	3599	68	9825	4535	2,90	0,9999	4981
0,50	5205	1915	1,10	8802	3643	1,70	9838	4554	3,00	1,0000	4986
52	5379	1985	12	8868	3686	72	9850	4573	20	1,0000	4993
54	5549	2054	14	8931	3729	74	9861	4591	40	1,0000	4996
56	5716	2123	16	8991	3770	76	9872	4608	60	1,0000	4998
0,58	0,5879	0,2190	1,18	0,9048	0,3810	1,78	0,9882	0,4625	3,80	1,0000	0,4999

Значення функції e^{-x}

x	e^{-x}	x	e^{-x}	x	e^{-x}	x	e^{-x}	x	e^{-x}
0,00	1,0000	0,31	0,7334	0,61	0,5433	0,91	0,4025	1,21	0,2982
01	0,9900	32	7261	62	5379	92	3985	22	2952
02	9802	33	7189	63	5326	93	3946	23	2923
03	9704	34	7118	64	5273	94	3906	24	2894
04	9608	35	7047	65	5221	95	3867	25	2865
05	9512								
0,06	0,9418	0,36	0,6977	0,66	0,5166	0,96	0,3829	1,26	0,2836
07	9324	37	6907	67	5117	97	3791	27	2808
08	9231	38	6839	68	5066	98	3753	28	2780
09	9139	39	6777	69	5016	99	3716	29	2753
10	9048	40	6703	70	4966	1,00	3679	30	2725
0,11	0,8958	0,41	0,6636	0,71	0,4916	1,01	0,3642	1,31	0,2692
12	8860	42	6571	72	4868	02	3606	32	2671
13	8781	43	6505	73	4819	03	3570	33	2645
14	8694	44	6440	74	4771	04	3534	34	2618
15	8607	45	6376	75	4724	05	3499	35	2592
0,16	0,8521	0,46	0,6313	0,76	0,4677	1,06	0,3465	1,36	0,2567
17	8437	47	6250	77	4630	07	3430	37	2541
18	8353	48	6188	78	4584	08	3396	38	2516
19	8270	49	6126	79	4538	09	3362	39	2491
20	8187	50	6065	80	4493	10	3329	40	2466
0,21	0,8106	0,51	0,6005	0,81	0,4449	1,11	0,3296	1,41	0,2441
22	8025	52	5945	82	4404	12	3263	42	2417
23	7945	53	5886	83	4361	13	3230	43	2393
24	7866	54	5827	84	4317	14	3198	44	2369
25	7781	55	5769	85	4274	15	3166	45	2346
0,26	0,7711	0,56	0,5712	0,86	0,4232	1,16	0,3135	1,46	0,2322
27	7634	57	5655	87	4189	17	3104	47	2299
28	7558	58	5599	88	4148	18	3073	48	2276
29	7483	59	5543	89	4107	19	3042	49	2254
30	7408	60	5486	90	4066	20	3012	1,50	0,2231

**Основні положення державних нормативних документів
по контролю надійності, проведенню експериментальних досліджень
і випробувань електроустаткування (версії для ознайомлення)**

**1. ДСТУ 2864-94 «НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІКИ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ
ОЦІНЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ НАДІЙНОСТІ. ОСНОВНІ
ПОЛОЖЕННЯ»**

Чинний від 01.01. 97

Цей стандарт поширюється на всі види продукції, до яких належать технічні системи, технічні засоби та елементи вищезазначених засобів. Стандарт установлює основні положення щодо експериментального оцінювання і контролю (далі – експериментального дослідження) надійності техніки, визначає види експериментального дослідження надійності, показники якості результатів експериментального дослідження і порядок встановлення вимог до цих показників, організацію і порядок проведення робіт з експериментального дослідження надійності.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. В залежності від мети експериментального дослідження розрізняють експериментальне оцінювання (кількісне визначення) та контроль (якісне визначення) надійності продукції.

1.1.1. Оцінювання надійності продукції проводять з метою визначення показників надійності (ПН) з потрібною точністю та вірогідністю для внесення в технічну документацію, виявлення схемних та конструктивних недоліків і вироблення рекомендацій щодо їх усунення, в разі необхідності – для встановлення виду та параметрів закону розподілу терміну безвідмовної роботи, тривалості відновлення, терміну збережаності, терміну експлуатації до граничного стану.

Результати оцінювання надійності продукції можуть бути використані для визначення та корекції параметрів технічної експлуатації: частоти та обсягу технічного обслуговування, норм витрати ЗПП (запасних частин, інструментів, приладдя, матеріалів), складу експлуатаційного та ремонтного персоналу, а також під час обґрунтування гарантійних зобов'язань, розрахунку показників безпечності, ефективності, економічності продукції чи складних об'єктів, складовою частиною яких є досліджувана продукція.

1.1.2. Контроль надійності проводять з метою перевірки відповідності вперше розроблюваної, модернізованої продукції і продукції, що випускається серійно, вимогам нормативних документів (НД) з стандартизації, а

також технічних завдань з винесенням рішень про приймання чи забракування.

1.1.3. З техніко-економічних причин експериментально досліджують, як правило, частину партії продукції – вибірку, але прийняті за результатами експериментального дослідження рішення поширюють на всю партію.

Обсяг експериментального дослідження визначають в процесі його планування таким чином, щоб імовірність прийняття помилкових рішень була прийнятливою як для постачальника, так і для споживача продукції.

1.1.4. Імовірність прийняття помилкових рішень можна знизити за рахунок збільшення обсягу експериментального дослідження шляхом обґрунтованого об'єднання двох і більше вибірок з різними ознаками належності до них. Ознаками належності зразка продукції до тієї чи іншої вибірки може бути: завод-виробник, типорозміри, час вироблення, умови експлуатації, наявність дороблення чи модернізації тощо.

Рішення про можливість об'єднання декількох вибірок в єдину приймають, виходячи з рівня інформованості про фізику відмов і граничних станів, на підставі методів математичної статистики.

1.2. Експериментальне дослідження може бути проведено:

1) шляхом організації визначальних чи контрольних випробувань на надійність;

2) шляхом організації експлуатаційних спостережень – збиранням та обробленням статистичних даних про надійність продукції в умовах підконтрольної чи дослідної експлуатації (дослідного чи промислового функціонування, споживчого використання);

3) комбінованим методом, за якого використовують обидва вищезазначені напрямки разом.

Для експериментального дослідження надійності необов'язково знати структуру об'єкту досліджень (експлуатаційних спостережень).

1.3. Процес експериментального дослідження надійності складається з таких етапів:

1) встановлення вимог до якості результатів експерименту;

2) планування експерименту;

3) формування вибірки, включаючи ідентифікацію кожного причленованого в її склад зразка продукції;

4) проведення самого експерименту, тобто одержання його безпосередніх результатів;

5) оброблення безпосередніх результатів експерименту і прийняття рішень.

1.4. Встановлення вимог до якості результатів експерименту складається із:

- 1) вибирання номенклатури показників якості;
- 2) техніко-економічного обґрунтування значень (норм) вибраних показників;

3) уточнювання номенклатури та норм показників якості на підставі балансу інтересів як постачальника, так і споживача.

1.5. Експеримент планують, виходячи із установлених вимог до якості його результатів. Планування полягає у вибиранні плану, визначенні його параметрів і складанні програм дослідження. Партія продукції являє собою об'єкт експериментального дослідження, вибірка – об'єкт власне експерименту, обсяг експерименту – найважливіший з параметрів плану.

1.5.1. Зміст плану залежить від мети експериментального дослідження (кількісне оцінювання ПН чи якісний контроль рівня надійності продукції відповідно до альтернативної ознаки).

В загальному випадку план експерименту визначає:

- 1) обсяг експерименту – кількість дослідів (m) чи сумарний наробіток всіх зразків вибірки ($t\Sigma$);
- 2) зміст одиничного досліду та ознаку його закінчення;
- 3) порядок проведення експерименту (з відновленням та (або) заміною зразків, які відмовили; без відновлення та (або) їх заміни);
- 4) методи скорочення потрібного обсягу експерименту на підставі урахування апіорної інформації;
- 5) ознаки припинення експерименту;
- 6) вирішальне правило – сукупність вказівок для формулювання висновку відносно надійності продукції згідно з результатами експерименту.

1.5.2. Програма експериментального дослідження регламентує порядок його організації та проведення.

Програма повинна містити в собі:

- назву продукції;
- досліджуваний ПН;
- вимоги до якості одержаних статистичних висновків;
- план проведення експерименту та його параметри;
- кількість зразків продукції, яка повинна бути досліджена;
- перелік параметрів, за якими визначається стан зразка, та періодичність їх перевірки під час проведення експериментального дослідження;
- порядок контролю роботоздатності та відновлення зразків;
- перелік випробувального устаткування та засобів вимірювання і вимоги до них;
- обсяг та періодичність технічного обслуговування;
- умови проведення експерименту (величина, тривалість та послідовність чинників, що впливають, чи їх комплексів);

— методику експерименту чи посилання на неї, якщо цю методику оформлено як самостійний документ чи вміщено в НД на продукцію (стандартах, технічних умовах) ;

— порядок врахування та аналізу відмов зразків;

— порядок врахування часу, необхідного для знаходження відмови та ремонту зразків;

— режим (безперервний, періодичний, циклічний тощо) експерименту;

— спосіб та порядок оброблення безпосередніх результатів експерименту;

— правила прийняття рішень за результатами експерименту, в тому числі відносно порядку подальших дій, якщо рівень надійності продукції за результатами контролю виявився нижчим за потрібний.

Програма експериментального дослідження оформлюється у вигляді організаційно-методичного документу, обов'язкового до виконання.

1.5.3. Під час призначення кількості досліджуваних зразків продукції η виходять з потрібного обсягу експерименту з врахуванням таких чинників:

1) принципової можливості виконання на одному зразку продукції, який підлягає після відмови відновленню та, в разі необхідності, спеціальному технічному обслуговуванню, більше одного досліду;

2) правомірності використання одного зразка продукції для проведення декількох дослідів, якщо випадковий час безвідмовної роботи розподілено за експоненціальним законом чи після закінчення попереднього досліду буде проводитись спеціальне технічне обслуговування зразка, яке забезпечує повне відновлення його надійніших властивостей за рахунок усунення наслідків зношування та старіння;

3) зростання загальної (календарної) тривалості експерименту під час збільшення кількості дослідів на одному зразку;

4) збільшення у випадку значущості індивідуальних особливостей зразків партії продукції, послаблення в зв'язку з цим правомірності прилучення про рівнонадійність зразків і зростання з цієї причини ризиків постачальника і споживача.

1.5.4. Встановлені в методиці експериментального дослідження показники та норми точності засобів випробувань, відтворення умов експерименту, форми відображення даних, контрольні нормативи та вирішальні правила повинні бути гармонізовані з загальними вимогами стандартів до продукції окремого виду (групи), вимогами загальних технічних умов, типових програм та методик випробування, з частковими вимогами стандартів виду технічних умов, а також з міжнародними стандартами.

1.5.5. Програму експериментального дослідження розроблюють на підставі цього стандарту та чинних НД з урахуванням специфіки функціонування, призначення, умов експлуатації та конструктивних особливостей зразків продукції.

1.6. Формування вибірки для проведення експериментального дослідження полягає у відборі із складу досліджуваної партії продукції потрібної відповідно до програми кількості зразків η та подальшої їх ідентифікації.

Процедура ідентифікації складається з сукупності засобів щодо встановлення відповідності зразків вибірки вимогам конструкторської документації (КД), які впливають на оцінюваний ПН чи характер висновків про надійність партії продукції в цілому.

1.7. Проведення експериментального дослідження має за мету одержання відповідно до програми безпосередніх результатів експерименту, необхідних та достатніх для однозначного висновку про надійність продукції.

1.7.1. В залежності від плану обсяг експериментального дослідження має вигляд:

1) сумарного наробітку t_{Σ} зразків вибірки за час експериментального дослідження;

2) кількості m переходів n , зафіксованих на зразках продукції від початкового характеристичного стану в альтернативний, тобто сукупністю $m \geq n$ одиничних дослідів, кожний з яких дозволяє одержати одну реалізацію досліджуваної випадкової величини (часу безвідмовної роботи, терміну збережуваності, тривалості відновлення, часу експлуатації до граничного стану).

1.7.2. Однорідність статистичної інформації про надійність продукції забезпечується:

1) проведенням всієї сукупності m одиничних дослідів в одній і тій самій атестованій випробувальній (експлуатувальній) організації;

2) дослідженням тих самих зразків (в разі $t > n$) чи зразків, вилучених з однорідної партії продукції;

3) постійністю протягом всього експерименту методики та умов його проведення, складу та становища виконавців, засобів випробувань та вимірювання;

4) атестацією методик та засобів випробувань, перевіркою засобів вимірювання;

5) стабільністю надійнісних властивостей зразків продукції, яку випробують (спостерігають).

1.8. Обробка безпосередніх результатів експерименту полягає в одержанні на їх підставі статистичних висновків відносно значення ПН та (чи) його відповідності встановленим нормам.

1.8.1. Обробка даних експерименту проводиться з використанням, в разі необхідності, апарату теорії імовірностей та математичної статистики. До неї входять:

1) контроль повноти інформації, пошук та виключення невірних даних;

2) перевірка однорідності інформації (не допускаються об'єднання і обробка даних, одержаних в суттєво різних умовах) ;

3) копіювання початкової інформації (в разі необхідності) ;

4) переклад змісту інформації на машинні носії;

5) аналіз та класифікація даних про зміни характеристичного стану зразків продукції для зіставлення з установленим контрольним нормативом;

6) визначення параметричним чи непараметричним методом тачкових та інтервальних оцінок шуканих ПН;

7) класифікація причин змін характеристичних станів зразків продукції за видами, зв'язаними з виготовленням, ремонтом, експлуатацією, та їх аналіз;

8) систематизація відомостей для розроблення заходів, спрямованих на виявлення недоліків та підвищення надійності продукції;

9) додаткова математична обробка статистичних даних, якщо експеримент не був реалізований у запланованому обсязі (припинений достроково) чи, не зважаючи на реалізацію вибраного плану, не досяг очікуваного ефекту (наприклад, не дозволив прийняти рішення ні про приймання, ні про забракування продукції).

Примітка. Контрольним нормативом під час оцінювання ПН є вимоги до точності та вірогідності результатів випробувань (експлуатаційних спостережень), а в разі контролю надійності – деяке число, яке являє собою один з параметрів плану (граничне число відмов, граничне значення відношення сумарної тривалості всіх випробувань до приймального рівня ПН, який контролюється, тощо).

1.8.2. Переходи від початкового характеристичного стану до альтернативного (наприклад, від роботоздатного стану до нероботоздатного), причини яких (наприклад, відмови) встановлено точно та вірогідно, а прийняті технічно обгрунтовані заходи необхідні та достатні для виключення дії таких причин у майбутньому, не враховуються.

1.8.3. Точкові оцінки ПН продукції обчислюють відповідно до їх визначень. Інтервальні оцінки ПН обчислюють, використовуючи експериментальні дані про надійність об'єкта в цілому, чи якщо такі відсутні, за

експериментальними даними про надійність складових частин об'єкта та інформації про його структуру.

Математичну обробку даних для якісного висновку про рівень надійності контрольованої продукції (наприклад, про її відповідність чи невідповідність вимогам НД) проводять згідно з ГОСТ 27.410 (додатки 7,8).

1.8.4. В процесі статистичної обробки даних оцінку шуканого ПН може бути одержано одним із методів:

— непараметричним – без використання інформації про закон розподілу;

— параметричним – з використанням інформації про закон розподілу (часу безвідмовної роботи, терміну збережаності, тривалості відновлення, часу експлуатації до граничного стану).

Примітка. В разі необхідності закон розподілу може бути одержано за результатами експерименту.

1.8.5. Непараметричний метод статистичної обробки використовують, якщо:

1) D закон розподілу досліджуваної випадкової величини невідомий і неможливо висунути прийнятну гіпотезу про такий розподіл;

2) знання закону розподілу для оцінювання ПН відповідно до вибраного плану не потрібно.

В усіх інших випадках статистичну обробку інформації проводять параметричним методом, до якого входять:

1) висунення гіпотези про вид закону розподілу випадкової величини;

2) оцінювання параметрів розподілу;

3) перевірка погодженості емпіричного розподілу з обраним теоретичним (якщо перевірку з техніко-економічних причин може бути здійснено);

4) оцінювання ПН.

2. ВИДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ

2.1. Ознаками класифікації видів експериментального дослідження надійності можуть бути:

1) мета експерименту;

2) спосіб одержання вихідних статистичних даних;

3) досліджувана складова надійності;

4) витрати часу на реалізацію програми експериментального дослідження;

5) математичний метод обробки зазначених результатів;

6) математична модель досліджуваного показника надійності.

2.2. В залежності від мети експериментального дослідження розрізняють такі експериментальні методи:

- 1) оцінювання ПН;
- 2) контроль ПН.

Оцінювання ПН полягає у визначенні їх числових значень, контроль ПН – в якісній перевірці партій продукції на відповідність вимогам надійності.

2.3. За способами одержання вихідних статистичних даних відрізняють:

- 1) визначальні чи контрольні випробування на надійність;
- 2) експлуатаційні спостереження.

Визначальні чи контрольні випробування на надійність проводять у тих випадках, коли в процесі експериментального дослідження можуть бути забезпечені відповідний обсяг випробувань, а також підтримання та контроль потрібних режимів та умов функціонування випробуваних зразків.

Якщо організувати такі випробування технічно неможливо чи економічно недоцільно, вихідні дані про надійність продукції отримують експлуатаційними спостереженнями в процесі підконтрольної чи дослідної експлуатації (дослідного та промислового функціонування, споживчого використання).

В разі необхідності припускається сумісне використання результатів випробувань та експлуатаційних спостережень.

Для забезпечення безумовного визнання результатів контрольних випробувань на надійність як постачальником, так і споживачем експериментальні методи контролю ПН можуть бути реалізовані в складі сертифікаційних випробувань. Сертифікаційні випробування являють собою дії незалежної від постачальника і споживача третьої сторони (органа сертифікації), включаючи контрольні випробування на надійність, які доводять, що належним чином ідентифікована продукція відповідає вимогам стандарту чи іншого НД.

2.4. В залежності від досліджуваної складової (властивості) надійності розрізняють експериментальне дослідження на безвідмовність, ремонтпридатність, збережуваність та довговічність (ресурсні).

2.5. Відповідно до затрат часу на реалізацію програми експериментальне дослідження може бути нормальним чи прискореним.

2.5.1. Нормальне експериментальне дослідження характеризується методами та умовами проведення, які забезпечують одержання необхідного обсягу інформації про надійнісні властивості продукції за такий самий термін, як і в передбачених умовами експлуатації.

В обґрунтованих випадках (з технічних, організаційних чи економічних причин) припускається проведення, згідно з відповідними прог-

рамами, скороченого експериментального дослідження. Скорочення реалізується шляхом цензурування – припинення експерименту до досягнення запланованого значення критерійної характеристики.

2.5.2. Прискорене експериментальне дослідження характеризується методами та умовами проведення, які забезпечують одержання інформації про надійнісні властивості продукції за термін, менший ніж передбачено умовами експлуатації.

2.5.3. Відрізняють прискорене експериментальне дослідження надійності продукції в нормальному та форсованому режимах.

Прискорення експериментального дослідження надійності в нормальному режимі досягається ущільненням робочих циклів або екстраполяцією за робітником.

Прискорення експериментального дослідження у форсованому режимі досягається інтенсифікацією деградаційних процесів, які призводять до відмови (граничного стану). Чинниками інтенсифікації деградаційних процесів можуть бути підвищена чи занижена температура, вібрація, радіаційне випромінювання тощо.

2.5.4. Вибірання принципу чи поєднання принципів прискорення експериментального дослідження надійності повинні забезпечувати максимально можливе скорочення тривалості експерименту з відтворенням відмов (граничних станів) у послідовності та номенклатурі, відповідних до нормальної експлуатації.

2.5.5. Скорочення часу одержання безпосередніх результатів експерименту, як правило, полягає у використанні апріорних знань про надійність продукції, яка оцінюється (контролюється) шляхом проведення попередніх досліджень (випробувань). Згідно з даними цих досліджень (випробувань) розробляють моделі відмов (граничних станів) та визначають коефіцієнти (функції) перерахунку ПН, які оцінюються без прискорення та з прискоренням.

2.6. В залежності від використаного інструментарію математичну обробку безпосередніх результатів експерименту реалізують параметричними чи непараметричними методами.

2.7. Відповідно до математичної моделі досліджуваного ПН розрізняють:

1) експериментальні методи для оцінювання (контролю) ПН-типу «імовірність»;

2) експериментальні методи для оцінювання (контролю) ПН-типу «математичне очікування»;

3) експериментальні методи для оцінювання (контролю) ПН-типу «квантиля»;

4) експериментальні методи для оцінювання (контролю) ПН-типу «інтенсивність».

3. ВИМОГИ ДО ЯКОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ

3.1. Якість результатів експериментального дослідження надійності продукції оцінюють:

- у всіх випадках – показниками вірогідності і точності;
- у випадку необхідності – показниками повторюваності (збіжності), відтворюваності (зіставлюваності) та показниками усіх видів затрат на підготовку експерименту та його проведення.

3.2. Якість результатів експериментального дослідження характеризується:

- за ступенем відповідності оцінок та висновків фактичному рівню надійності – показниками вірогідності;
- за ступенем наближення результатів експерименту до дійсних значень характеристик продукції в певних умовах експлуатації – показниками точності;
- за ступенем наближення оцінок та висновків, які одержані тією самою випробувальною (експлуатувальною) організацією з використанням неспівпадальних вибірок з однієї і тієї самої партії продукції – показниками повторюваності (збіжності);
- за ступенем наближення оцінок та висновків, які одержані різними організаціями (наприклад, постачальника та споживача) з використанням неспівпадальних вибірок з однієї і тієї самої партії продукції – показниками відтворюваності (зіставлюваності).

3.3. Показником вірогідності результатів експериментального оцінювання ПН є одностороння чи двостороння довірча імовірність Q інтервальної оцінки ПН.

3.4. Під час контролю надійності висновок про відповідність продукції поставленим вимогам приймають за двома рівнями ПН: приймальним a_α та бракувальним a_β , які разом являють собою в цьому випадку показник точності.

Величинам a_α та a_β відповідає пара показників вірогідності: приймальному рівню a_α – ризик постачальника α , який має значення імовірності помилки першого роду, та бракувальному рівню a_β – ризик споживача β , який має значення імовірності помилки другого роду.

За наявності достатніх підстав припустимий контроль надійності продукції за одним, бракувальним рівнем a_β з використанням одного показника вірогідності – ризика споживача β .

Примітка. Показники точності та вірогідності результатів експерименту, які встановлені в п. 3.4 цього стандарту, однаково можуть бути використані за всіх способів одержання вихідних статистичних даних, в тому

числі під час контролю надійності продукції методом довірчих меж згідно з ГОСТ 27.410 (п. 1.11).

3.5. Повторюваність (збіжність) та відтворюваність (зіставлюваність) результатів експерименту, проведення якого виконується для оцінювання ПН, характеризують модулем різниці оцінок ПН, які одержані за даними первісних та повторних випробувань (експлуатаційних спостережень).

3.6. До показників повторюваності (збіжності) та відтворюваності (зіставлюваності) результатів експерименту з метою контролю належать:

1) імовірність забракування під час повторного експериментального дослідження продукції, яка визнана придатною на підставі первісного експериментального дослідження;

2) імовірність визнання придатною під час повторного експериментального дослідження продукції, яка була забракована на підставі первісного експериментального дослідження.

3.7. Показники повторюваності (збіжності) та відтворюваності (зіставлюваності) використовують для визначення:

1) припустимих розбіжностей між результатом первісного та повторного експериментального дослідження та визначення норм цих розбіжностей;

2) однорідності продукції за показниками надійності;

3) нестабільності надійнісних властивостей продукції;

4) змін умов експериментального дослідження надійності.

ДОДАТОК ДО ДСТУ 2864-94

Рекомендований

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ВИБИРАННЯ КРИТЕРІЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ПРОДУКЦІЇ НА НАДІЙНІСТЬ (ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ)

1. Задача оптимального планування може вирішуватись у «вузькому розумінні» та в «широкому розумінні». Під плануванням у «вузькому розумінні» мається на увазі вибір оптимальних параметрів в рамках одного плану. Планування в «широкому розумінні» припускає вибір оптимального плану серед припустимої множини планів з оптимальними параметрами.

2. Планування повинно здійснюватись таким чином, щоб за наявності обмежень на якість результатів експерименту мінімізувати всі види витрат на випробування (експлуатаційні спостереження), які в загальному випадку пропорційні сумарній тривалості дослідів t_{Σ} . Як правило, t_{Σ} є випадковою величиною, тому за критерійну береться одна з числових характеристик розподілу t_{Σ} .

Під час вибирання критерійної характеристики береться до уваги Доречність обмеження чи середніх, у випадку багаторазово повторюваних, випробувань (експлуатаційних спостережень) продукції масового виробництва, чи максимальних сумарних витрат під час проведення випробувань (експлуатаційних спостережень) високоякісної продукції, яка дорого коштує .

Якщо в якомусь плані випробувань випадкова величина t_{Σ} , яка розглядається, не має верхньої межі і мінімізувати її максимальне значення недоцільно, критерійною характеристикою може бути q -квантиля розподілу $t_{\Sigma}q$. Таким чином, як критерій оптимізації рекомендується одне із таких співвідношень:

$$M[t_{\Sigma}] \rightarrow \min ; \quad (1)$$

$$\max t_{\Sigma} \rightarrow \min ; \quad (2)$$

$$t_{\Sigma}q \rightarrow \min . \quad (3)$$

3. Цільова функція (обрана критерійна характеристика), як правило, виразиться через параметри конкретних планів випробувань (експлуатаційних спостережень), (кількість дослідів, їх тривалість і т. ін.), які виступають як змінні, та через апріорні дані відносно ПН, який оцінюється (контролюється). Обмеженнями в цій оптимізаційній задачі планування виступають вимоги до якості результатів.

4. Задача оптимального планування випробувань (експлуатаційних спостережень) вирішується таким чином:

4.1. Обирають критерій оптимізації.

4.2. Відповідно до обраного критерію та існуючих обмежень на проведення випробувань (експлуатаційних спостережень) складається перелік можливих планів випробувань (експлуатаційних спостережень).

4.3. Для кожного з обраних планів вирішується задача планування у «вузькому розумінні», тобто відповідно до обраного критерію оптимізації визначаються оптимальні параметри кожного плану (оптимальні перерізи планів).

4.4. Для кожного плану визначається критерійна характеристика.

4.5. Проводять порівняння оптимальних перерізів вибраних планів і серед них визначається найкращий (в розумінні обраного критерію).

Примітка. Якщо критерійна характеристика являє собою функцію від справжнього значення досліджуваного ПН, то задачу планування може бути вирішено в двох випадках:

1) значення критерійної характеристики для одного з планів не перевищує відповідних значень для інших планів ні за будь-якого значення ПН, який досліджується, за всією областю його існування;

2) апіорна інформація дозволяє конкретизувати область існування значень ПН, який досліджується, і розв'язати задачу планування для цієї конкретної області.

2. ДСТУ 2863-94 «НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІКИ. ПРОГРАМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ»

Чинний від 01.01.97

1. ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ

Цей стандарт поширюється на технічні системи, пристрої, машини, механізми, апаратуру, прилади чи будь-які їх частини (далі об'єкти), що розглядаються з погляду надійності як самостійні одиниці.

Стандарт встановлює загальні вимоги до програм забезпечення надійності та їх елементів, а також порядок їх розроблення.

На основі цього стандарту розробляються державні і галузеві стандарти, які конкретизують вимоги до програм забезпечення надійності, та їх елементів, до порядку їх розроблення залежно від виду та призначення об'єктів, вимог щодо їх надійності, стадій життєвого циклу об'єктів.

Стандарт придатний для цілей сертифікації. При цьому повнота й адекватність елементів і задач програм забезпечення надійності стають об'єктами сертифікаційного аналізу і визначають гарантії забезпечення рівня надійності об'єкта, що вимагається.

2. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цьому стандарті є посилання на такі стандарти:

ДСТУ 2860–94 Надійність техніки. Терміни та визначення.

ГОСТ 27.003–90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

ГОСТ 27.410–87 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

ГОСТ 26656–85 Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.

3. ВИЗНАЧЕННЯ

У цьому стандарті використовуються терміни з галузі надійності, визначення яких встановлені в ДСТУ 2860 і цьому розділі.

Програма забезпечення надійності (ПЗН) – документ, що встановлює комплекс взаємообумовлених організаційно-технічних вимог та заходів, які належить проводити на певних етапах життєвого циклу об'єкта і спрямованих на забезпечення заданих вимог щодо надійності та (або) на підвищення надійності.

Елемент ПЗН – завдання чи група завдань, що виконуються однією категорією експертів або персоналу, фахівцями у певній галузі знань.

Керування надійністю – цілеспрямована діяльність щодо обґрунтування, планування, забезпечення, підвищення та підтримки характеристик безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності та збережуваності об'єктів, що розглядаються.

Аналіз надійності – систематизоване дослідження з метою визначення впливу на надійність об'єкта особливостей конструкції, технологічних процесів виробництва, умов експлуатації, технічного обслуговування та ремонту, несправностей, а також визначення досягнутого рівня надійності при виконанні запланованих заходів щодо забезпечення і підвищення надійності та оцінка ефективності цих заходів.

Прогнозування надійності – окремий випадок розрахунку надійності на основі математичних моделей, які відображають тенденції зміни раніш оціненої надійності об'єктів-аналогів або їх складових частин з урахуванням зміни конструкції та умов експлуатації.

Просліджувальність – здатність простежити передісторію або стан об'єкта чи дії, або аналогічних об'єктів чи дій за допомогою ідентифікації, яка реєструється.

Життєвий цикл – інтервал часу з моменту виникнення об'єкта до його повного зняття з використання (утилізації).

Вартість життєвого циклу об'єкта – витрати на розроблення, виробництво, експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт (можливо і на списання).

Зростання безвідмовності – процес прогресуючого покращення показників безвідмовності об'єкта з часом.

Інженерне забезпечення – дії під час проектування, виготовлення та експлуатації, керівні вказівки, інструкції, методи та способи, процедури, підготовка обслуговуючого персоналу тощо, які націлені на досягнення рівня надійності, що вимагається.

Конфігурація-комплекс ідентифікованих конструкцій об'єкта, системи технічного обслуговування та ремонту, технічної документації.

4. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

4.1. ПЗН може бути індивідуальною (на один тип об'єктів), груповою (на групу або ряд об'єктів), а також на технологічний процес. ПЗН може розроблятися у вигляді єдиного документа чи у вигляді окремих документів на стадіях розробки (ПЗНр), виробництва (ПЗЧв) та експлуатації (ПЗНе). Залежно від специфіки об'єктів ПЗН може призначатися для галузі (підгалузі), підприємства (об'єднання), цеху, дільниці, для технологічного

процесу, складових частин об'єкта, для забезпечення окремих властивостей надійності (наприклад, ремонтпридатності).

4.2. Керування розробкою та використанням об'єкта за допомогою поставлення завдань щодо надійності вимагає розробки та виконання ПЗН в організаціях постачальника (розробника, виробника) та споживача (замовника) на доповнення до їх систем забезпечення якості. Гарантія надійності об'єкта є відповідальністю, яку повинні поділяти як постачальник, так і споживач.

Програми забезпечення надійності є основним документом, який дає змогу здійснити комплексний підхід до вирішення завдань забезпечення надійності з урахуванням інтересів усіх сторін (постачальника, споживача) на всіх стадіях життєвого циклу об'єктів, скоординувати діяльність усіх служб організацій чи підприємств у вирішенні цих завдань, узгодити терміни проведення окремих заходів.

4.3. Необхідність розробки ПЗН та її обсяг встановлюють за узгодженням із замовником (споживачем) і розробником (виробником).

ПЗН може розроблятися як розділ програми підвищення технічного рівня та якості продукції або у вигляді самостійного документа.

4.4. Заходи ПЗН повинні бути спрямовані на аналіз, підтвердження, контроль та підтримання рівня надійності, встановленого у нормативно-технічних документах, мати комплексний характер і розроблятися:

- замовником – у вихідних вимогах-заявці;
- головним розробником – для всіх стадій життєвого циклу;
- головним виробником – для стадій виготовлення;
- основним споживачем – для стадії експлуатації.

Загальне керівництво та контроль за виконанням ПЗН, що охоплює всі стадії життєвого циклу, забезпечує головний розробник об'єкта, який відповідає за його поставлення на виробництво.

Примітка 1. Споживач у своїй ПЗНе (ПЗНв) повинен передбачити всі необхідні заходи для гарантії відповідності умов експлуатації та технічного обслуговування, обумовлених постачальником.

Примітка 2. Споживач у разі потреби повинен брати участь у підготовці ПЗН постачальника, надаючи йому будь-яку інформацію, необхідну для визначення умов забезпечення експлуатації та технічного обслуговування, контролю документації, заходів і ресурсів підтримання технічного стану відповідно до ПЗН.

4.5. У ПЗН повинні бути встановлені:

- перелік конкретних заходів щодо забезпечення надійності об'єктів із зазначенням етапів і видів робіт на відповідній стадії життєвого циклу;
- відповідальний виконавець, виконавці та терміни виконання кожного заходу;
- нормативні та методичні документи, які потрібно використовувати під час виконання зазначених заходів;

- звітні документи, що відображають результати виконання заходів;
- контрольні етапи, після завершення яких проводять оцінку досягнутого рівня надійності об'єкта та уточнюють заходи щодо подальшої реалізації ПЗН;

- порядок контролю реалізації та коригування ПЗН.

За складом і термінами заходів, що плануються, ПЗН повинна бути узгоджена з роботами, що проводяться на відповідній стадії життєвого циклу об'єкта, по забезпеченню якості та скоординована з іншими програмами, якщо такі передбачені, щоб запобігти протиріччям між ними.

4.6. Під час розробки та виробництва на одному підприємстві групи однотипних об'єктів допускається розробка ПЗН на всю групу.

Під час розробки та виробництва на одному підприємстві об'єкта, його складових частин і модулів для них розробляється спільна ПЗН.

Під час розробки та виробництва об'єкта, його складових частин і модулів на декількох підприємствах кожне з них розробляє свою ПЗН узгоджену з ПЗН головного постачальника.

5. ВИМОГИ ДО ЗМІСТУ ПЗН

5.1. Загальні вимоги.

5.1.1. ПЗН повинна містити елементи, які включають усі заходи, що можуть вплинути на надійність об'єкта. Зміст ПЗН залежить від конкретних рішень, специфічних обмежень і від важливості вимог щодо надійності кожного конкретного об'єкта. ПЗН охоплює основні заходи щодо забезпечення надійності та вказує їх зв'язки із стадіями життєвого циклу об'єкта.

Загальна ПЗН, яка визначена у цьому стандарті, містить 10 елементів, що визначають відповідальність усіх сторін, які беруть участь, за розробку, встановлення та підтримання стратегії досягнення заданого рівня надійності.

Для багатьох об'єктів не існує чіткої межі між різними елементами та завданнями ПЗН і стадіями життєвого циклу об'єкта. Зв'язок між стадіями життєвого циклу об'єкта та елементами ПЗН наведено у додатку до цього ДСТУ.

5.1.2. Стадії життєвого циклу об'єкта.

Життєвий цикл об'єкта складається з чотирьох стадій:

- висування концепції та визначень;
- проектування та розробки;
- виготовлення та встановлення;
- експлуатації, обслуговування та ремонту.

5.1.3. На стадії висування концепції та визначень установлюється необхідність створення об'єкта та задаються вимоги до нього. На цій стадії закладаються основи надійності об'єкта та вартості його життєвого циклу.

Заходи щодо забезпечення надійності на цій стадії повинні концентруватися на встановленні правильних вимог щодо надійності та її подальшого підтримування, а також на розробці ПЗН, яка використовується як основа для керування надійністю на наступних стадіях.

5.1.4. На стадії проектування та розробки створюється апаратна частина та (чи) програмне забезпечення об'єкта, розробляється технічна документація, інструкції по використанню та обслуговуванню, випробовується та документується програмне забезпечення.

Заходи щодо забезпечення надійності повинні зосереджуватись на виконанні вимог щодо надійності. Загальна мета забезпечення надійності на цій стадії полягає в тому, що:

- всі вимоги щодо надійності використовуються для керування процесом проектування;

- визначаються та виконуються процедури оцінювання, в тому числі аналітичні методи розрахунку, перевірки та випробування з метою досягнення відповідності вимогам щодо надійності;

- розробляються та виконуються заходи щодо аналізу та прогнозування для керування надійністю об'єкта;

- аналізуються з точки зору забезпечення гарантії надійності об'єкта в цілому комплектуючі та складові частини об'єкта, які одержують від постачальника або споживача;

- заходи щодо планування та забезпечення технічного обслуговування узгоджуються з проектними рішеннями об'єкта з метою забезпечення відповідності вимогам щодо надійності.

На цій стадії найважливішими є завдання, які забезпечують безвідмовність, довговічність, резмонтопридатність, технічне обслуговування та ремонт; контролепридатність, ергономічність, аналіз надійності, прогнозування, аналіз компромісів та ризику, аналіз зростання безвідмовності, випробування та перегляд конструкції.

5.1.5. На стадії виготовлення та встановлення об'єкту приймається відповідне забезпечення надійності.

Заходи щодо забезпечення надійності повинні зосереджуватись на приймальних випробуваннях за наявністю.

Випробування повинні охоплювати показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збережаності. Випробувальна стратегія повинна забезпечувати оцінку вірогідності ризиків постачальника та споживача, контроль процедур випробувань та звітності.

5.1.6. На стадії експлуатації, обслуговування та ремонту об'єкт використовується за призначенням, обслуговується та ремонтується.

Заходи щодо забезпечення надійності повинні базуватись на збиранні експлуатаційної інформації, оцінці даних про несправності, стратегії технічного обслуговування та ремонту, забезпеченні запасними частинами.

5.1.7. Елементи ПЗН, завдання та критерії їх виконання, визначені у цьому стандарті, мають загальний характер. Для кожного конкретного об'єкта ПЗН повинна бути адаптована і конкретизована.

Процес адаптації ПЗН полягає у виборі елементів і завдань з урахуванням специфіки об'єкта та умов контракту. Зв'язок між елементами ПЗН у різних контрактних ситуаціях наведено в додатку до ДСТУ.

5.2. Вимоги до елемента ПЗН «Планування та керування».

5.2.1. Планування.

Постачальник (розробник) повинен розробити ПЗН як частину загального плану розробки об'єкта. У цьому плані потрібно прийняти всі заходи, які можуть вплинути на надійність об'єкта, вказати їх послідовність у часі, чітко визначити обов'язки керівництва підприємства щодо виконання цих заходів, зазначити методи, що використовуються для виконання поставлених завдань, а також методи контролю за їх виконанням.

В цій частині ПЗН повинна містити:

- опис системи перевірок відповідності дій щодо забезпечення надійності запланованим заходам;

- чіткий розподіл відповідальності, повноважень і взаємодії всього персоналу, що керує та перевіряє роботу щодо забезпечення надійності;

- опис процедур виконання завдань, графік виконання робіт, встановлення точок контролю, перевірок і критеріїв прийняття рішень під час проектування об'єкта та оцінки його надійності;

- визначення ресурсів, необхідних для своєчасного виконання поставлених завдань;

- визначення термінів постачання субпідрядчиками комплектуючих та складових частин і документації на них;

- розробка системи керування складом документації, процедурою внесення змін як до складу документації, такі в різні типи документів;

- установлення процедур використання даних щодо надійності для ефективного впровадження заходів коригуючої дії.

5.2.2. Керування проектними рішеннями.

Для забезпечення функції керування проектними рішеннями в ПЗН необхідно встановити контрольні точки, скоординовані з етапами та контрольними точками проектування об'єкта.

Правила прийняття рішень за основними етапами проектування повинні бути встановлені для кожної складової частини об'єкта і для кожної контрольної точки згідно з призначенням об'єкта та системою його обслуговування.

5.2.3. Керування просліджуваністю.

Для забезпечення функції просліджування за виконанням прийнятих рішень повинні бути розроблені методи та заходи, що дадуть змогу проконтролювати:

- яка діяльність спрямована на забезпечення окремої (конкретної) вимоги щодо надійності (просліджування в прямому напрямку);
- якій вимозі щодо надійності відповідають дії, що застосовуються відповіді у зворотному напрямку).

5.2.4. Керування конфігурацією.

У ПЗН повинна бути передбачена система керування конфігурацією яка встановлює процедури керування, контролю та документування змін, внесених в об'єкт та в забезпечення його технічного обслуговування на будь-якій стадії життєвого циклу.

5.3. Вимоги до елемента ПЗН «Складання контракту» у ПЗН повинна бути розроблена система взаємодій постачальника та споживача під час складання контракту.

5.3.1. Аналіз контракту.

Кожен контракт повинен бути проаналізований в частині його положень, які стосуються надійності, з метою:

- аналізу елементів ПЗН і визначення можливостей їх виконання чи доцільності їх включення;
- визначення повноти та чіткості вимог щодо надійності об'єкта та системи його обслуговування;
- визначення гарантій щодо забезпечення надійності;
- аналізу вимог щодо оцінювання, перевірки та випробування на надійність з приймальними випробуваннями включно;
- визначення умов, за яких ці вимоги є дійсними.

5.3.2. Представники служби керування надійністю.

Для забезпечення ефективного зв'язку із споживачем та керування надійністю постачальник повинен призначити представника. Представник повинен добре знати теорію та практику забезпечення надійності та сам об'єкт.

Представники служби керування надійністю повинні мати відповідні повноваження і нести постійну відповідальність за прийняття рішень у відношеннях споживач – постачальник з урахуванням:

- специфікації та модифікації вимог щодо надійності;
- остаточних угод з іншими сторонами відносно конструкції об'єкте документації на нього, даних щодо надійності, перегляду ПЗН;
- гарантій того, що відповідними організаціями будуть виконані умови підписаної угоди відносно забезпечення надійності;
- установлених процедур і критеріїв оцінювання, приймання та гарантій надійності.

5.4. Вимоги до елемента ПЗН «Вимоги щодо надійності».

5.4.1. Специфікація вимог щодо надійності.

Специфікація вимог щодо надійності повинна бути підготовлена по-стачальником і (або) споживачем для об'єкта чи його складових частин з урахуванням дослідження ринку та вартості життєвого циклу об'єкта.

Специфікація містить:

«+» – необхідний елемент;

«-» – не використовується;

«о» – варіантний елемент, використання якого залежить від ситуації, пов'язаної з об'єктом і контрактом.

3. ДСТУ 2365-94 «МАШИНИ ЕЛЕКТРИЧНІ АСИНХРОННІ ПОТУЖНІСТЮ ДО 400 кВт ВКЛЮЧНО. ДВИГУНИ. ЗАГАЛЬНІ ТЕХНІЧНІ УМОВИ»

Чинний від 01.01.95

Цей стандарт поширюється на асинхронні двигуни (надалі – двигуни) загального призначення і їх модифікації для роботи від мережі змінного струму напругою до 660 В включно, які виготовляються для потреб народного господарства і експорту.

Стандарт не поширюється на двигуни, встановлені на засобах наземного, морського і повітряного транспорту, вибухозахищені і заглиблені двигуни.

Стандарт придатний для цілей сертифікації.

Вимоги до якості двигунів, які гарантують безпеку для життя і здоров'я людей, викладеш в п. 3.2.

Терміни і визначення за ДСТУ 2267 та ДСТУ 2286.

1. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ І РОЗМІРИ

1.1. Номінальні потужності двигунів повинні відповідати вимогам ГОСТ 12139 і зазначеним у додатку 1.

1.2. Двигуни повинні виготовлятися на номінальні напруги 220, 380, 660 В за ГОСТ 12139 зі схемами сполучення обмотки статора «трикутник», «зірка», «трикутник/зірка» з частотою електричної мережі 50 і 60 Гц.

За вимогами замовника двигуни повинні виготовлятися на інші стандартні напруги і схеми сполучення, в тому разі 240, 400, 415 і 440 В на двигуни в експортному виконанні, що повинно бути зазначено в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

1.3. Номінальні частоти обертання (синхронні) відповідно з вимогами ГОСТ 12139:

500, 600, 750, 1000, 1500, 3000 об/хв – частоти 50 Гц;

600, 720, 900, 1200, 1800, 3600 об/хв – частоти 60 Гц.

1.4. Моментні характеристики двигунів – за ГОСТ 28327.

Максимальні значення відносної гаданої пускової потужності – за ГОСТ 28327. Для двигунів потужністю до 0,4 кВт максимальне значення відносної гаданої пускової потужності не нормується, а вказується відношення пускового струму до номінального в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Допускається в нормативно-технічній документації вказувати замість максимальних значень відносної гаданої пускової потужності відношення пускового струму до номінального або пусковий струм.

1.5. Значення коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності, номінального ковзання, маси двигуна і їх допустимі відхилення зазначають в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

1.6. Допустимі відхилення від номінальних значень основних параметрів двигунів – за ГОСТ 183.

1.7. Габарити від 45 до 355 мм установлюють із ряду R20 за ГОСТ 13267.

1.8. Установочні та приєднальні розміри повинні відповідати зазначеним у додатку 2.

1.9. Розміри виступаючого кінця валу залежно від найбільшого обертового моменту повинні відповідати зазначеним у додатку 3.

1.10. Габаритні розміри двигунів повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

1.11. Умовні позначення двигунів повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

2.1. Загальні вимоги.

2.1.1. Двигуни повинні відповідати вимогам даного стандарту, ГОСТ 183. Додаткові вимоги встановлюють у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.1.2. Вимоги щодо стійкості двигунів до дії агресивних середовищ, дезінфікуючих розчинів відповідно вимогам ГОСТ 24682, а також дезактивуючих розчинів при необхідності установлюють у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.1.3. Вимога до двигунів сільськогосподарського призначення відповідно вимогам ГОСТ 19348 зазначають в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.2. Вимоги до конструкції.

2.2.1. Двигуни повинні виготовлятися з ступенями захисту IP23, IP44, IP54 згідно з ГОСТ 17494.

За домовленістю з замовником двигуни повинні виготовлятися і з іншими ступенями захисту згідно з ГОСТ 17494.

2.2.2. Конструктивне виконання двигунів за способом монтажу – за ГОСТ 2479.

2.2.3. Спосіб охолодження двигунів – за ГОСТ 20459.

2.2.4. Двигуни повинні виготовлятися з струмовводами таких виконань:

- 1) з панеллю виводів і одним штуцером – К-3-І;
- 2) з панеллю виводів і двома штуцерами – К-3-ІІ;
- 3) з панеллю виводів і трьома штуцерами – К-3-ІІІ;
- 4) без панелі виводів з одним штуцером – К-2-І;
- 5) без панелі виводів з двома штуцерами – К-2-ІІ;
- 6) з панеллю виводів і подовжувачем під сухий поділ кабеля або заливку кабельної маси – К-3-М.

За домовленістю з замовником можливе застосування інших струмовводів.

Струмоввід двигунів повинен допускати приєднання з будь-якої із протилежних бокових сторін кабелів з мідними або алюмінієвими жилами з оболонками із гуми або пластиків, а також гнучкого металевого рукава.

Виконання струмовводів, розміри ввідних штуцерів і прохідні діаметри отворів зазначають в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.2.5. Двигуни повинні працювати в будь-якому напрямі обертання. Напря́м обертання двополюсних двигунів 280-355 габаритів повинен бути зазначений в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.3. Вимоги щодо стійкості до дії кліматичних зовнішніх факторів.

2.3.1. Номінальні значення кліматичних факторів навколишнього середовища – за ГОСТ 15543.1 і ГОСТ 15150 при цьому:

- 1) висота над рівнем моря не більше 1000 м;
- 2) навколишнє середовище не має струмопровідного пилу;
- 3) запиленість повітря не більше: двигунів з ступенем захисту IP23 – 2 мг/м³; двигунів з ступенем захисту IP44 – 10 мг/м³.

При перевищуванні верхнього значення робочої температури навколишнього середовища (повітря) порівняно з зазначеними у цих стандартах номінальна потужність двигунів знижується на 5% при підвищенні температури на 5 К (5 °С) .

Для роботи двигунів на висотах понад 1000 до 4300 м середнє і верхнє значення температур встановлюють за ГОСТ 15150.

2.4. Вимога щодо стійкості до дії механічних зовнішніх факторів.

2.4.1. Групи виконань двигунів щодо стійкості до дії механічних зовнішніх факторів – за ГОСТ 17516.1 встановлюють в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.4.2. Вимоги до сейсмостійкості (інтенсивність землетрусу в балах і рівень установки над нульовою відміткою) при необхідності зазначають в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.5. Вимоги до характеристик.

2.5.1. Середній рівень звуку і звукової потужності двигунів потужністю до 0,25 кВт повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Значення рівня звуку і звукової потужності інших двигунів – за ГОСТ 16372 повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.5.2. Клас вібрації двигунів – за ГОСТ 16921 повинен бути зазначений в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.5.3. Класи нагрівостійкості електричної ізоляції – за ГОСТ 8865 і перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища за ГОСТ 183 зазначають у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.5.4. Опір ізоляції обмоток двигунів відносно корпусу і між обмотками при нормальних кліматичних умовах випробування за ГОСТ 15150 повинен бути не менше за:

- 1) 10 МОм – в практично холодному стані;
- 2) 3 МОм – при температурі обмотки близької до робочої;
- 3) 0,5 МОм – при верхньому значенні вологості повітря.

2.5.5. Режими роботи двигунів – за ГОСТ 183 зазначають в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.6. Вимоги з надійності.

Надійність двигунів в умовах і режимах експлуатації, встановленнях даним стандартом, повинна характеризуватися такими показниками:

- 1) середнє напрацювання на відмову;
- 2) середній ресурс до капітального ремонту;
- 3) середній час відновлення працездатного стану;
- 4) строк зберігання.

Допускається застосування інших показників надійності за домовленістю з замовником. Значення показників надійності повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.6.1. Граничним станом двигунів вважається:

- 1) вихід із ладу обмотки, пробій ізоляції, порушення електричного кола обмотки, виткове замикання;
- 2) зниження опору ізоляції понад встановлені норми і не ліквідоване сушінням двигунів;
- 3) руйнування виступаючого кінця валу.

2.6.2. Відмовою двигунів вважається:

1) нездатність двигуна набрати номінальне число обертів при наявності на контактних затискачах номінальної з допустимими відхиленнями напруги і навантаженням на валу, яке не перевищує номінальне для двигуна;

- 2) вихід із ладу підшипникового вузла;
- 3) вихід із ладу вузла контактних кілець;
- 4) вихід із ладу обмотки.

2.7. Комплектність.

2.7.1. В комплект поставки входять:

- 1) двигун з шпонкою на валу, шт. - 1;
- 2) паспорт, шт. - 1, для двигунів, які постачаються для потреб країни, допускається оформляти один паспорт на всю відвантажену партію за однією адресою;
- 3) технічний опис і інструкція експлуатації, шт. - 1, але не більше 5 шт. на всю відвантажену партію за однією адресою.

Примітка. Необхідність додаткової комплектації зазначають у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

2.7.2. Документація на двигуни для експорту повинна відповідати умовам договору (контракту) на поставку.

2.8. Маркування.

2.8.1. На кожному двигуні повинна бути укріплена табличка згідно з ГОСТ 12969, і ГОСТ 12971, у якій зазначають дані двигуна:

- 1) товарний знак (або назва підприємства-виготовлювача);
- 2) тип двигуна;
- 3) заводський номер;
- 4) рід струму (∞);
- 5) частота електричного струму в герцах і число фаз;
- 6) схема сполучення;
- 7) номінальний режим роботи;
- 8) номінальна потужність в кіловатах;
- 9) номінальна напруга в вольтах;
- 10) номінальний струм в амперах;
- 11) номінальна частота обертання в обертах у хвилину;
- 12) коефіцієнт корисної дії в відсотках;

- 13) коефіцієнт потужності;
- 14) ступінь захисту;
- 15) клас нагрівостійкості електричної ізоляції;
- 16) рік випуску;
- 17) маса двигуна;
- 18) позначення даного стандарту або технічні умови;
- 19) надпис «Виготовлено в Україні».

Примітка. На табличці двигунів з повторно-короткочасним режимом роботи зазначають потужності і струми при одній тривалості включення.

2.8.2. Маркувальні дані двигуна, призначеного для поставки на експорт, повинні виконуватися мовою, зазначеною в договорі (контракті) на поставку.

2.8.3. Для двигунів масою до 10 кг допускається на табличці масу не вказувати.

2.8.4. Позначення виводів двигунів – за ГОСТ 26772.

2.8.5. Маркування вантажу – за ГОСТ 14192.

2.9. Упаковка.

2.9.1. Упаковка, консервація і розконсервація двигунів – за ГОСТ 23216 для умов зберігання і транспортування, зазначених в розділі 6.

2.9.2. Види упаковки і засоби консервації повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

3. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ

3.1. Вимоги безпеки двигунів повинні відповідати вимогам ДСТУ 2331, а також вимогам безпеки «Правил улаштування електроустановок» і «Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів».

3.2. Вимоги до якості двигунів, які гарантують безпеку для життя і здоров'я людей, ДСТУ 2331.

4. ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ

4.1. Для перевірки відповідності двигунів вимогам даного стандарту встановлюють такі категорії контрольних випробувань:

- 1) приймально-здавальні;
- 2) кваліфікаційні;
- 3) періодичні;
- 4) типові;
- 5) сертифікаційні.

4.2. Відбір двигунів для проведення випробувань проводять методом «наосліп» за ГОСТ 18321.

4.3. Приймально-здавальні випробування проводять на кожному двигуні за програмою, зазначеною в табл. 1.

Таблиця 1

Найменування перевірки і випробування	Вид випробування			Метод випробування
	Приймально-здавальні	Кваліфікаційні	Періодичні	Пункт стандарту
1. Зовнішній огляд	+	+	+	5.2
2. Перевірка габаритних установочних і приєднальних розмірів	+	+	+	5.6
3. Вимір маси	—	+	+	5.8
4. Випробування за програмою приймальних за ГОСТ 183		+	+	5.3
5. Випробування за програмою приймально-здавальних за ГОСТ 183	+			5.3
6. Випробування на стійкість щодо дії механічних зовнішніх факторів		+	+	5.9-5.12
7. Випробування на стійкість щодо дії кліматичних зовнішніх факторів		+	+	5.13-5.19
8. Випробування на відповідність ступеню захисту		+	+	5.20
9. Контроль показників надійності		+	+	5.21
10. Механічні випробування упакованих двигунів			+	5.22
11. Випробування на безпеку	+	+	+	5.23

1. Знак «+» – випробування проводять, знак «-» – випробування не проводять.

2. Випробування за п. 10 в складі періодичних випробувань проводять при наявності рекламаций.

Додатково до програми випробувань включають вимір вібрації.

Допускається проводити вибірково перевірку габаритних, установочних і приєднальних розмірів, опір обмоток при постійному струмі в практично холодному стані, опір ізоляції відносно корпусу і між обмотками, визначення струму і втрат короткого замикання, вимір вібрації.

Вид контролю нормальний, двоступеневий вибірковий за ГОСТ 18242. Рівень контролю, приймальний рівень дефектності установлюють в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Допустимі значення струмів і втрат неробочого ходу, струмів і втрат короткого замикання при приймально-здавальних випробуваннях установлюють підприємства-виготовлювачі двигунів за результатами кваліфікаційних випробувань і статистикою періодичних випробувань.

Кваліфікаційні випробування проводять на зразках установочної серії або першої промислової партії двигунів за програмою випробувань, зазначеною в табл. 1.

Об'єм партії для проведення випробувань встановлюють не менше п'яти двигунів кожного типовиконання, минулі приймально-здавальні випробування за п.4.3.

Об'єм вибірки для перевірок і випробувань встановлюють в розмірі не менше двох двигунів.

Об'єм вибірки для випробувань на надійність установлюють в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Випробування за програмою приймальних – згідно з ГОСТ 183 проводять на двигунах кожного типорозміру будь-якого конструктивного виконання за способом монтажу (крім виміру вібрації) і кліматичного виконання.

Випробування на стійкість до кліматичних зовнішніх впливових факторів проводять на двигунах кожного габариту, будь-якого типорозміру і конструктивного виконання за способом монтажу, кожного кліматичного виконання.

Випробування на стійкість щодо дії механічних зовнішніх факторів проводять на двигунах кожного габариту і конструктивного виконання за способом монтажу будь-якого кліматичного виконання або електричної модифікації.

Випробування на відповідність вимогам за ступенем захисту, який забезпечується оболонками двигунів, проводять на двигунах кожного габариту будь-якого кліматичного і конструктивного виконання за способом монтажу незалежно від електричної модифікації.

4.4. Періодичні випробування проводять не менше одного разу на три роки за програмою випробувань, зазначеною в табл. 1.

Об'єм виборки установлюють у кількості не менше двох двигунів.

4.5. Типові випробування повинні проводити при змінюванні конструкції, технології або заміні матеріалів, якщо ці змінювання можуть мати вплив на параметри двигунів.

Об'єм випробувань і кількість зразків, що підлягають типовим випробуванням, установлюють в програмі, складеній підприємством-

виготовлювачем і узгодженої з підприємством-власником оригіналів конструкторської документації, залежно від ступеню впливу запропонованих змінювань на параметри двигунів, які випускаються.

Якщо при кваліфікаційних, періодичних і типових випробуваннях виявиться хоч би один двигун, не відповідний вимогам одного з пунктів даного стандарту, то випробування проводять повторно на подвоєній кількості зразків. Якщо при повторних випробуваннях виявиться хоч би один двигун, не відповідний вимогам одного з пунктів даного стандарту, випуск двигунів припиняють до усунення причин, внаслідок яких вони виявились такими, що не відповідають вимогам даного стандарту або нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

4.6. Сертифікаційні випробування проводять в незалежних акредитованих випробних лабораторіях (центрах) з періодичністю, встановленій Держстандартом України.

4.7. Випробування на підтвердження відповідності двигунів вимогам згідно з п.3.2, які гарантують безпеку для життя і здоров'я людей, є обов'язковими.

Об'єм випробувань і кількість зразків, на яких проводять випробування, зазначають у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

4.8. Випробування на підтвердження відповідності основних параметрів і розмірів, характеристик двигунів рекомендується проводити за ініціативою підприємства-виготовлювача або за вимогою споживача.

Відбір зразків для проведення випробувань повинен проводитись представниками незалежних акредитованих випробних лабораторій (центрів).

Двигуни, які пройшли кліматичні, механічні випробування щодо дії дезинфікуючих розчинів, випробування на надійність і пожежобезпеку не поставляються споживачам.

5. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

5.1. Методи контролю двигунів відповідно вимогам ГОСТ 183 з урахуванням викладеного в даному стандарті.

Випробування проводять при нормальних значеннях кліматичних факторів навколишнього середовища згідно з ГОСТ 15150 і номінальній напрузі, якщо інші значення не встановлені в даному стандарті для конкретних видів випробувань.

5.2. Зовнішній вигляд двигунів перевіряють візуально, встановлюючи відповідність конструкторській документації або порівнюючи з затвердженим контрольним зразком.

При зовнішньому огляді двигунів також перевіряють: перед проведенням випробувань – конструктивне виконання способом монтажу, спосіб охолодження, розміщення струмовводу, маркування табличок: при упаковці і відвантаженні – комплектність поставки, маркування вантажу і транспортне маркування, консервацію і упаковку.

5.3. Випробування по програмі прийнятно-здавальних і приймальних – згідно з ГОСТ 183 проводять згідно з ГОСТ 7217, ГОСТ 11828.

5.4. Вимір рівня шуму проводять за ГОСТ 11929 при роботі двигунів в режимі неробочого ходу.

5.5. Вимір вібрації двигунів проводять за ГОСТ 12379, ГОСТ 20832, при пружній установці двигунів.

Напрямок і точки виміру вібрації повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

5.6. Перевірку установочних і приєднальних розмірів двигунів проводять за ГОСТ 8592. Перевірку габаритних розмірів проводять за допомогою універсальних засобів вимірів.

5.7. Напрямок обертання вала визначають візуально при ввімкненні або вимкненні двигуна. За напрямом обертання вала визначають правильність маркування вивідних кінців обмотки двигуна.

5.8. Перевірку маси двигуна проводять на вагах для статичного зважування за ГОСТ 23711.

5.9. Для підтвердження відповідності двигунів вимогам щодо стійкості до дії зовнішніх факторів проводять такі види випробувань методами за ГОСТ 16962.2 і ГОСТ 20.57.406 залежно від групи виконання двигунів – за ГОСТ 17516.1:

- 1) випробування на вібростійкість;
- 2) випробування на віброміцність;
- 3) випробування на ударну стійкість;
- 4) випробування на ударну міцність.

Додаткові види випробувань при потребі зазначають в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Контрольну точку потрібно встановлювати на платформі стенду на відстані, що не більше 20 мм від однієї з точок кріплення двигуна, або кріпильному пристрої.

5.10. При випробуванні на вібростійкість двигуни повинні працювати в режимі неробочого ходу, при випробуванні на віброміцність двигуни повинні бути вимкнені з мережі живлення.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

- 1) в процесі випробування на вібростійкість функціонування нормальне;

2) після випробування на віброміцність відсутні механічні пошкодження двигунів і відкручування кріплення, функціонування при неробочому ході нормальне (перевірку при неробочому ході проводять не менше 30 хв), опір ізоляції обмоток відносно корпусу і між обмотками двигунів становить не менше 10 МОм.

Примітка. Під нормальним функціонуванням розуміється така робота двигуна, при якій вал вільно обертається без будь-яких гальмувань.

5.11. Випробування на ударну стійкість проводять в режимі неробочого ходу. Після випробування проводять зовнішній огляд двигуна, перевірку опору ізоляції і функціонування при неробочому ході.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

- 1) відсутні механічні пошкодження;
- 2) опір ізоляції обмоток відносно корпусу двигуна і між обмотками становить не менше 10 МОм;
- 3) функціонування при неробочому ході протягом 30 хв нормальне.

5.12. Випробування на ударну міцність проводять в неробочому стані. До і після випробування проводять перевірку опору ізоляції і функціонування при неробочому ході. Зовнішній огляд і розбирання двигуна – після випробування.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

- 1) відсутні зовнішні і внутрішні механічні пошкодження і відкручування кріплення;
- 2) відсутні порушення лакофарбного покриття;
- 3) опір ізоляції обмоток відносно корпусу і між обмотками становить не менше 10 МОм;
- 4) функціонування при неробочому ході протягом 30 хв нормальне.

5.13. Для підтвердження відповідності двигунів вимогам до стійкості до діяння кліматичних зовнішніх впливових факторів проводять наступні види випробувань методами згідно з ГОСТ 16962.1 і ГОСТ 20.57.406 в залежності від виду кліматичного виконання – за ГОСТ 15150:

- 1) випробування щодо дії верхнього значення температури середовища при експлуатації;
- 2) випробування щодо дії верхнього значення температури середовища при транспортуванні і зберіганні;
- 3) випробування щодо дії нижнього значення температури середовища при експлуатації;
- 4) випробування щодо дії нижнього значення температури середовища при транспортуванні і зберіганні;
- 5) випробування щодо дії зміни температури середовища;
- 6) випробування щодо дії вологості повітря.

Додаткові види випробувань при необхідності зазначають у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

5.14. Випробування щодо дії верхнього значення температури середовища при експлуатації проводять в режимі номінального навантаження при температурі для даного виду кліматичного виконання, зазначеній у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

При наявності декількох видів кліматичних виконань температуру вказують для кожного виду кліматичного виконання.

Мінімально допустима відстань між двигунами і стінками термокамери, а також між двигунами і приладами, які вимірюють температуру, повинна бути не менше 70 мм.

Тривалість витримки двигунів в термокамері становить не менше 4 год.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

1) опір ізоляції обмотки відносно корпусу і між обмотками, вимірний відразу після відключення двигуна від мережі, становить не менше 3 МОм;

2) після витримування двигунів протягом 12-24 год в нормальних кліматичних умовах відсутні порушення зовнішнього лакофарбного покриття.

5.15. Випробування щодо дії верхнього значення температури середовища при транспортуванні і зберіганні проводять при температурі умов транспортування і зберігання, зазначеній в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Тривалість витримування двигунів в термокамері становить не менше 4 год.

Після цього часу двигуни виймають із камери і витримують протягом 12-24 год в нормальних кліматичних умовах, після чого проводять візуальний огляд і вимір параметрів.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

1) опір ізоляції обмотки відносно корпусу і між обмотками становить не менше 10 МОм;

2) відсутні порушення зовнішнього лакофарбного покриття.

Допускається сполучати це випробування з випробуванням щодо дії верхнього значення температури середовища при експлуатації.

5.16. Випробування щодо дії нижнього значення температури середовища при експлуатації проводять при температурі для даного виду кліматичного виконання, зазначеній у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Двигуни поміщають в термокамеру, температуру в якій знижують до потрібного значення. Допускається поміщати двигуни в термокамеру, температура в якій установлена заздалегідь.

Тривалість витримування двигунів в термокамері становить не менше 4 год.

Після цього часу двигуни виймають із камери і проводять візуальний огляд.

Двигуни витримали випробування, якщо вони нормально запускаються при неробочому ході при напрузі рівній 0,8 Уном.

5.17. Випробування до дії нижнього значення температури середовища при транспортуванні і зберіганні проводять при температурі умов транспортування і зберігання, зазначеній у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Двигуни поміщають в термокамеру, температуру в якій знижують до потрібного значення. Допускається поміщати двигуни в термокамеру, температура в якій установлена заздалегідь.

Тривалість витримування двигунів в термокамері становить не менше 4 год.

По закінченні даного часу двигуни виймають із камери без підвищення температури до нормальної і витримують протягом 12-24 год в нормальних кліматичних умовах, після чого проводять огляд і вимір параметрів.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

1) опір ізоляції обмотки відносно корпусу і між обмотками становить не менше 10 МОм;

2) відсутні порушення зовнішнього лакофарбного покриття.

5.18. Випробування щодо дії зміни температури середовища проводять при температурі для даного виду кліматичного виконання, зазначеній у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

1) опір ізоляції обмотки відносно корпусу і між обмотками становить не менше 0,5 МОм;

2) відсутнє розтріскування внутрішнього лакофарбного покриття;

3) після витримки двигунів протягом 12-24 год. в нормальних кліматичних умовах відсутні порушення зовнішнього лакофарбного покриття;

4) різниця значень опору ізоляції за замірами, відповідним однаковому часу перебування в камері вологості, не перевищує 25%. Для

одного значення різниці допускається перевищення величини від 25% до 40%.

5.19. Випробування до впливу вологості повітря проводять для конкретного виду кліматичного виконання. Тривалість випробувань встановлюється в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Допускається проведення прискорених випробувань.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

1) опір ізоляції обмоток відносно корпусу і між обмотками становить не менше 0,5 МОм і ізоляція витримує випробування напругою, рівною 50% випробуваної напруги за ГОСТ 183, протягом 5 хв;

2) міжвиткова ізоляція витримує випробування напругою рівною 1,3 Уном при роботі двигунів при неробочому ході протягом 3 хв (якщо струм неробочого ходу при напрузі 1,3 Уном перевищує номінальний, то тривалість випробувань скорочують до 1 хв.);

3) відсутні порушення зовнішнього лакофарбового покриття після витримки двигунів протягом 12-24 год в нормальних кліматичних умовах.

Допускаються окремі сліди корозії, які не впливають на товарний вигляд двигуна.

5.20. Перевірка ступеню захисту, який забезпечується оболонками двигунів, за ГОСТ 17494.

5.21. Методи контролю показників надійності відповідно з вимогами ГОСТ 27.410 зазначають в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

Середній час відновлення робоздатного стану двигунів підтверджують розрахунками.

Допускається контроль показників надійності здійснювати розрахунковим методом, виходячи з статистичних даних піднадзорної експлуатації двигунів.

5.22. Механічні випробування упакованих двигунів проводять за ГОСТ 23216.

Двигуни витримали випробування, якщо вони задовольняють такі вимоги:

1) при зовнішньому огляді не виявлено пошкоджень упаковки, які ведуть до втрати її захисних властивостей;

2) не виявлено ослаблення кріплення двигунів в упаковці;

3) значення опору ізоляції обмоток відносно корпусу і між обмотками становить не менше 10 МОм;

4) значення віброшвидкості відповідає вимогам, які зазначені у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

5.23. Методи випробувань на безпеку за ДСТУ 2331.

6. ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗБЕРІГАННЯ

6.1. Умови транспортування двигунів щодо дії механічних факторів за ГОСТ 23216, щодо дії кліматичних факторів такі ж, як умови зберігання за ГОСТ 15150, зазначають у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

6.2. Умови зберігання упакованих двигунів за ГОСТ 15150.

Допустимий строк зберігання в упаковці і з консервацією підприємства-виготовлювача зазначають у нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

7. ВКАЗІВКИ ЩОДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Експлуатація двигунів повинна проводитися згідно з «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів», технічним описом і інструкцією з експлуатації на конкретні типи двигунів.

7.1. Перед монтажем двигуни необхідно очистити від консерваційного мастила і заміряти опір ізоляції. Двигуни, які мають опір ізоляції менше зазначеного в п. 2.5.4, повинні підлягати сушінню.

7.2. Установлені для роботи двигуни повинні бути заземлені. При експлуатації двигунів не повинно бути доступу до обертових і струмовідних частин. Забороняється робота двигунів зі знятими кожухами і відкритим струмоводом.

7.3. Двигуни повинні допускати роботу на висотах до 4300 м. Для двигунів, у яких номінальне значення висоти встановлено 1000 м при їх експлуатації на висоті понад 1000 до 4300 м і температурі 313 К (40 °С), номінальні потужності їх знижуються згідно з табл. 2.

Таблиця 2

Висота над рівнем моря, м	Номінальна потужність, %	Висота над рівнем моря, м	Номінальна потужність, %
1000	100	3000	
1500	98	3500	
2000	95	4000	
2400	93	4300	

8. ГАРАНТІЇ ВИГОТОВЛЮВАЧА

8.1. Виготовлювач повинен гарантувати відповідність двигунів вимогам даного стандарту за умови додержання споживачем правил експлуатації, зберігання, транспортування і монтажу двигунів.

8.2. Гарантійний строк експлуатації двигунів указується в нормативно-технічній документації на конкретні типи двигунів.

ДОДАТОК 1 ДО ДСТУ 2365–94
Обов'язковий

РЯД НОМІНАЛЬНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ДВИГУНІВ

Значення номінальних потужностей двигунів, в кВт в залежності від числа полюсів двигуна, зазначені в табл. 3.

Таблиця 3

Число пар полюсів					
2	4	6	8	10	12
0,04	0,025	—	—	—	—
0,06	0,040	—	—	—	—
0,09	0,060	—	—	—	—
0,12	0,090	—	—	—	—
0,18	0,120	—	—	—	—
0,25	0,180	—	—	—	—
0,37	0,250	0,18	—	—	—
0,55	0,370	0,25	—	—	—
0,75	0,550	0,37	0,25	—	—
1,10	0,750	0,55	0,37	—	—
1,50	1,100	0,75	0,55	—	—
2,20	1,500	1,10	0,75	—	—
3,00	2,200	1,50	1,10	—	—
4,00	3,000	2,20	1,50	—	—
5,50	4,000	3,00	2,20	—	—
7,50	5,500	4,00	3,00	—	—
11,00	7,500	5,50	4,00	—	—
15,00	11,000	7,50	5,50	—	—
18,50	15,000	11,00	7,50	—	—
22,00	18,500	15,00	11,00	—	—
30,00	22,000	18,50	15,00	—	—
37,00	30,000	22,00	18,50	—	—
45,00	37,000	30,00	22,00	—	—
55,00	45,000	37,00	30,00	22,0	—
75,00	55,000	45,00	37,00	30,0	—
110,0	75,000	55,00	45,00	37,0	—
132,0	90,0	75,0	55,0	45,0	—
160,0	110,0	90,0	75,0	55,0	45,0
200,0	132,0	110,0	90,0	75,0	55,0
250,0	160,0	132,0	110,0	75,0	75,0
315,0	200,0	160,0	132,0	90,0	90,0
400,0	250,0	200,0	160,0	110,0	110,0
—	315,0	250,0	200,0	132,0	132,0

4. ДСТУ 3398-96 (ГОСТ 30458-97) «МАШИНИ ЕЛЕКТРИЧНІ ОБЕРТОВІ. ІЗОЛЯЦІЯ. НОРМИ ТА МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ»

Чинний від 1999-01-01

1. ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ

Цей стандарт розповсюджується на електричні обертові машини (далі - машини), які працюють від мережі змінного, постійного та пульсуючого струмів незалежно від потужності та напруги. Стандарт встановлює норми та методи випробувань ізоляції на новій цілком зібраній машині і в умовах, аналогічних нормативним умовам експлуатації на підприємстві-виробнику.

Стандарт не розповсюджується на машини, що призначені для засобів транспорту.

Можливі відхилення від окремих вимог стандарту за умови забезпечення безпеки персоналу, який обслуговує машини, та навколишнього середовища у випадках, обґрунтованих та узгоджених між замовником та виробником.

2. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цьому стандарті є посилання на стандарт:

ГОСТ 28173-89 (ІЕС 34-1) Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и рабочие характеристики.

3. ОБСЯГ ТА НОРМИ ВИПРОБУВАНЬ

3.1. Випробування ізоляції обмоток машин під час приймально-здавальних випробувань.

3.1.1. Кожна машина повинна підлягати приймально-здавальним випробуванням ізоляції обмоток згідно з цим стандартом.

3.1.2. Ізоляція обмоток машин відносно корпусу машини і поміж обмотками повинна витримувати протягом однієї хвилини випробувальну напругу змінного струму, наведену в таблиці 1. Випробування проводяться на нових повністю виготовлених машинах або частинах машин. Ізоляція обмоток машин, що укладається повністю або частково на місці встановлення, повинна витримувати протягом однієї хвилини випробувальну напругу промислової частоти, наведену в таблиці 1.

У випадку часткового перемотування обмотки її ізоляцію випробують напругою, рівною 0,75 від значення випробувальної напруги, передбаченою для нової машини. Перед випробуванням слід очистити та висушити стару частину обмотки.

Ізоляцію обмотки машини, яка підлягає ревізії або ремонту, після очистки та сушіння випробовують напругою, рівною 1,5 від значення номінальної напруги, але не менш 1000 В, якщо значення номінальної напруги дорівнює або більше 100 В, та не менше 500 В, якщо значення номінальної напруги менше 100 В.

Таблиця 1

Випробування на електричну міцність

Назва машини або її частини	Значення випробувальної напруги (діюче)
1. Обмотки машин потужністю менше 1 кВт (або кВА) і номінальною напругою менш 100 В, за винятком наведених у пунктах 4-8	500 В плюс двократна номінальна напруга
2. Обмотки машин потужністю менше 10 МВт (або МВА), за винятком наведених у пунктах 1 і 4-8	1000 В плюс двократна номінальна напруга, але не менш 1500 В
3. Обмотки машин потужністю 10 МВт (або МВА) і більше, за винятком наведених у пунктах 4-8 номінальною напругою:	
до 24 кВ	1000 В плюс двократна номінальна напруга
більше 24 кВ	Встановлюється за погодженням виробника та споживача
4. Обмотки незалежного збудження машин постійного струму	1000 В плюс двократна максимальна напруга збудження, але не менш 1500 В
5. Обмотки збудження синхронних генераторів, синхронних двигунів та синхронних компенсаторів:	
а) номінальна напруга збудження менше, або, яка дорівнює 500 В	Десятикратна номінальна напруга збудження, але не менш 1500 В
більше 500 В	4000 В плюс двократна номінальна напруга збудження
б) машина, призначена для пуску з обмоткою збудження, що замкнена накоротко або замкнена на опір, менший десятикратного опору обмотки	Десятикратна номінальна напруга збудження, але не менше 1500 В та не більше 3500 В
в) машина, призначена для пуску або з обмоткою звуження, замкненого на опір, що дорівнює або більше десятикратного опору обмотки, або з розімкнутими обмотками збудження із секціонуванням обмоток збудження або без нього	1000 В плюс двократне максимальне діюче значення напруги, що може бути за заданими умовами пуску на виводах обмотки збудження, або, на випадок секціонованої обмотки збудження, на виводах будь-якої секції, але не менше 1500 В (примітка 3)

6. Вторинні (роторні) обмотки асинхронних двигунів або синхронізованих асинхронних двигунів, які не замкнені постійно накоротко	
а) нереверсивних двигунів, або двигунів, реверсивних тільки із нерухомого стану	1000 В плюс двократна напруга розімкнутого ланцюга у стані покою, виміряна поміж контактними кільцями або виводами вторинної обмотки за номінальною напругою, прикладеною до первинних обмоток
б) двигунів, які дозволяють реверсування або гальмування за посередництвом реверсування первинного живлення під час роботи двигуна	1000 В плюс чотирикратна вторинна напруга розімкнутого кола в нерухомому стані, як наведено у б переліку а
7. Збудники за винятком наведених нижче:	Те ж, що і для обмоток, з якими вони з'єднані
а) збудники синхронних двигунів (у тому числі синхронізовані асинхронні двигуни), якщо під час пуску вони заземлені або відімкнені від обмоток збудження	1000 В плюс двократна номінальна напруга збудника, але не менш 1500 В
б) обмотки незалежного збудження збудників (примітка 2)	
8. Зібрані у групи машини та апарати	Якщо випробуванню підлягає група, зібрана із нових установлених та з'єднаних машин та апаратів, кожна(ий) із яких проходила(ив) випробування на електричну міцність ізоляції, то випробувальна напруга не повинна перевищувати 0,8 випробувальної напруги тієї машини (апарату), у якої (ого) вона є найменша (примітка 2)
Примітка 1. Для розрахунку випробувальної напруги двофазних обмоток з одним загальним виводом слід брати найбільше діюче значення напруги між будь-якими двома виводами під час роботи.	
Примітка 2. Для обмоток однієї або кількох машин, електрично з'єднаних поміж собою, розрахунковою напругою є найбільша напруга відносно землі.	
Примітка 3. Напругу, яка встановлюється на виводах обмоток збудження або їх секціях за заданих умов пуску, можна вимірювати відповідним чином пониженою напругою живлення; виміряне таким чином значення напруги повинно бути помножено на відношення повної напруги живлення під час пуску до пониженої напруги живлення під час випробувань.	

3.1.3. Ізоляція обмоток машин потужністю 1000 кВт (1000 кВА) і більше напругою 3000 В і більше за узгодженням виробника та замовника додатково повинна витримувати протягом однієї хвилини випробувальну напругу постійного струму, яка дорівнює 1,6 ефективного значення змінної напруги, наведеної в таблиці 1.

3.1.4. Після встановлення машин у зібраному стані на місці експлуатації ізоляція машин повинна витримувати протягом однієї хвилини випробувальну напругу змінного струму, що дорівнює 0,8 випробувальної напруги за таблицею 1. Це випробування є обов'язковим для турбогенераторів, гідрогенераторів, синхронних компенсаторів та машин потужністю 1000 кВт (1000 кВА) і більше, напругою 3000 В і більше, для решти машин це випробування провадять за власним розсудом замовника.

Це випробування можна не проводити, якщо випробування ізоляції обмоток, що укладається повністю або частково на місці встановлення, за 3.1.2 таблиці 1, які проведені після встановлення машини на фундаменті.

3.1.5. Ізоляція обмоток машин, випробуваних по 3.1.3, після встановлення машин на місці експлуатації, повинна витримувати протягом однієї хвилини випробувальну напругу постійного струму, яка дорівнює 1,28 ефективного значення змінної напруги, наведеної у таблиці 1.

3.1.6. Опір ізоляції обмоток турбогенераторів, гідрогенераторів і машин потужністю 1000 кВт (1000 кВА) і більше напругою 3000 В і більше, відносно корпусу і між обмотками за розрахунковою робочою температурою повинен бути не менший значення, яке обчислюється за формулою:

$$R_{i3} = \frac{U}{1000 + \frac{P}{100}},$$

де R_{i3} – опір ізоляції, МОм;

U – номінальна напруга обмотки, В;

P – номінальна потужність машини, кВт (кВ • А).

Опір ізоляції, що обчислюється за формулою, необхідно подвоїти на кожні повні чи неповні 20 °С різниці між розрахунковою робочою температурою та температурою, меншою розрахунковою, за якою виконане вимірювання. Опір ізоляції обмотки ротора з безпосереднім водяним охолодженням після заповнення водою не нормується. Опір ізоляції обмоток решти машин встановлюється в нормативній документації на конкретні види машин за погодженням виробника та споживача.

3.1.7. Випробування міжвиткової ізоляції машин провадяться до вимог нормативної документації на конкретні види машин.

3.2. Додаткові та вибіркові випробування стрижнів і котушок машин потужністю > 5 МВт та напругою > 6 кВ.

3.2.1. Ізоляція стрижнів (катушок) машин для контролю технології виготовлення підлягає додатковим випробуванням, що включають вимірювання $\text{tg}\delta$ ізоляції залежно від випробувальної напруги; випробування ізоляції між провідниками стрижнів, випробування виткової ізоляції катушок.

3.2.2. За погодженням виробника та споживача у програму вибіркових випробувань входить визначення напруги пробою ізоляції пазової та лобової частин стрижнів (катушок), визначення напруги пробою виткової ізоляції катушок.

3.2.3. Тангенс кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) ізоляції стрижнів (катушок) та прирощення тангенсу кута діелектричних втрат ($\Delta\text{tg}\delta$) не повинні перевищувати значень, наведених у таблиці 2.

Таблиця 2

Значення тангенсу кута діелектричних втрат ізоляції

Вид ізоляції обмотки	$\text{tg}\delta$ за номінальною напругою, не більше	$\Delta\text{tg}\delta$ 8 інтервалі напруг від 0,5 до 1,5 номінальної, не більше
Термопластична	0,12	0,04
Термореактивна	0,08	0,03

3.2.4. Ізоляція між елементарними провідниками (або між провідниками та трубками охолодження) повинна витримувати випробувальну напругу змінного струму не менш 110 В протягом від 1 до 2 с.

3.2.5. Виткова ізоляція катушок повинна витримувати випробування підвищеною напругою за методом та нормами виробника.

3.2.6. Напруга пробою ізоляції пазової та лобової частин стрижня (катушки) в разі плавного підвищення випробувальної напруги змінного струму повинна бути не менше подвійної випробувальної напруги машини за таблицею 1.

3.2.7. Виткова ізоляція розрізаної катушки повинна витримувати протягом однієї хвилини напругу змінного струму, яка дорівнює 0,3 номінальної напруги машин. Потім прикладена напруга підвищується зі швидкістю 0,5 кВ/с до моменту пробою виткової ізоляції. Напруга пробою виткової ізоляції не нормується.

4. МЕТОДИ, УМОВИ ТА ПРОЦЕДУРА ВИПРОБУВАНЬ, ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Вимірювання опору ізоляції.

4.1.1. Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу машин та поміж обмотками провадиться з метою перевірки стану ізоляції, у тому числі придатності машини до проведення наступних випробувань.

Вимірювання опору ізоляції проводять:

- у практично холодному стані випробувальної машини - до початку її випробування за відповідною програмою;

- у нагрітому стані - при температурі обмотки, близької до температури режиму роботи, під час якого провадилося випробування на нагрівання;

- незалежно від температури обмоток - до і після випробувань ізоляції відносно корпусу машини та поміж обмотками підвищеною змінною та постійною напругою, до та після випробування в разі перевантаження струмом або обертовим моментом, до та після випробування в разі підвищеної частоти обертання, а також до та після деяких спеціальних видів випробувань, передбачених програмою.

Вимірювання опору ізоляції відносно корпусу машини та поміж обмотками слід провадити за чергою для кожного кола, що має окремі виводи, в разі електричного з'єднання всіх інших кіл із заземленим корпусом машин.

4.1.2. Вимірювання опору ізоляції обмоток, з'єднаних нероз'ємно, провадиться для обмотки цілком щодо відношення до корпусу.

4.1.3. Ізольовані обмотки, захисні конденсатори та інше устаткування, постійне з'єднані з корпусом машини, на час вимірювання опору їх ізоляції повинні бути від'єднані від корпусу машини.

4.1.4. Вимірювання опору ізоляції обмоток, які мають безпосереднє водяне охолодження, після хоч однократного заповнення системи охолодження водою в обмотки статора, повинно проводитись під час з'єднання фаз обмотки поміж собою та в разі від'єднання від ізольованої відносно корпусу колекторів зовнішньої системи живлення обмоток водою, а в обмотки ротору провадиться за умови заповнення водою або зливої води з обмотки.

4.1.5. Відлік значення опору ізоляції слід провадити через 60 с після початку вимірювання. Для машин потужністю 1 МВт (1 МВ А і понад, напругою 3 кВ і понад) відлік провадиться через 15 та 60 с після початку вимірювання. Для машин потужністю до 15 кВт з номінальною напругою до 660 В під час масового випуску дозволяється відлік величини опору ізоляції провадити через 15 с після початку вимірювання.

4.2. Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини та поміж обмотками підвищеною напругою.

4.2.1. Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини та поміж обмотками слід провадити у нерухомому стані машини, крім обмоток неявнополюсних роторів синхронних машин, випробування ізоляції яких слід провадити під час обертання ротора з номінальною частотою.

4.2.2. Якщо машина підлягає випробуванню на нагрівання, випробування ізоляції слід провадити безпосередньо після закінчення цього випро-

бування. Випробування ізоляції синхронних машин з неявнополюсним ротором слід провадити після завершення решти випробувань з умови знятих щитів та вийнятого ротору в разі, якщо у зібраній машині не виникає небезпеки перекриття з обмоток нерухомої частини на обмотки або корпус обертний та навпаки.

4.2.3. Випробуванню ізоляції обмоток повинні передувати, як правило, наступні випробування:

- випробування за підвищеною частотою обертання, короткочасним перевантаженням струму або обертового моменту, в разі раптового короткого замикання (для синхронних машин), а також спеціальні види випробувань, передбачені програмою;

- вимірювання опору ізоляції обмоток.

Випробування ізоляції обмотки підвищеною напругою постійного струму повинні передувати випробуванням ізоляції обмотки підвищеною напругою змінного струму.

4.2.4. Випробування ізоляції обмоток підвищеною напругою відносно корпусу машини та між обмотками слід провадити за чергою для кожного кола, яке має окремі виводи під час електричного з'єднання усіх інших кіл із заземленим корпусом машини.

Якщо обмотки з'єднані нероз'ємно, то всі обмотки, разом слід випробувати відносно до корпусу.

Ізольовані обмотки та інші пристрої, які за нормальної роботи з'єднані з корпусом, на час випробувань ізоляції цих обмоток або пристроїв від'єднуються від корпусу машини. Якщо з випробуваною обмоткою з'єднані пристрої збудження, регулювання або захисту, необхідність їх від'єднання на час випробувань ізоляції повинна бути наведена з нормативній документації на машину.

4.2.5. Випробування ізоляції обмоток, які мають безпосереднє водяне охолодження, підвищеною напругою змінного струму провадяться за циркуляцією води у системі охолодження обмотки. Випробування ізоляції обмоток, які мають безпосереднє водяне охолодження, підвищеною напругою постійного струму провадяться без циркуляції води в разі подачі напруги одночасно на ізоляцію обмотки та колекторів, які від'єднані від зовнішньої системи охолодження водою.

4.2.6. Випробування підвищеною напругою змінного струму слід починати з напруги, що не перевищує половину значення повної випробувальної напруги. Час підвищення випробувальної напруги від половинного значення до повного повинен бути не менший за 10 с. Повну випробувальну напругу слід витримувати протягом хвилини, після чого плавно знизити до половинного значення та вимкнути випробувальне обладнання.

4.2.7. Випробування підвищеною напругою постійного струму слід провадити не менше, ніж чотирима різними ступенями з одночасним вимірюванням струму витоку крізь ізоляцію. На кожному ступені напругу слід витримати протягом однієї хвилини, струм витоку міряти через кожні 15 с. Підвищення напруги від ступеня до ступеня слід провадити плавно протягом 10 с. Швидкість зниження напруги не нормується.

4.2.8. Змінювання струму витоку вимірюється на кожному ступені випробувальної напруги, залежно від часу витримки на ступені. Критерій оцінювання встановлюється виробником.

4.3. Результати випробування.

Результати випробування ізоляції обмотки підвищеною напругою відносно корпусу машини та між обмотками вважаються задовільними, якщо під час випробування не трапилось пробою ізоляції або перекриття її ковзними розрядами.

4.4. Вимірювання $\text{tg}\delta$ ізоляції.

4.4.1. Вимірювання $\text{tg}\delta$ ізоляції стрижнів (котушок) машин слід робити на цілком готових стрижнях (котушках) за нормальною температурою та трьох ступенях випробувальної напруги, що дорівнюють 0,5; 1,0; 1,5 від значення номінальної напруги обмотки. В ході вибіркового випробування вимірювання $\text{tg}\delta$ провадиться за нормальною температурою повітря.

4.4.2. Для вимірювання ізоляції стрижня (котушки) на довжині, рівній довжині осердя статора, поверх ізоляції стрижня накладається металевий або інший провідний електрод. Під час вибіркового випробування рекомендується випробувати стрижні (котушки) до виконання протикоронного покриття у лобових частинах та до електроду додаються заземлені охоронні кільця шириною від 10 до 20 мм на відстані від 2 до 4 мм від краю електроду.

4.5. Випробування ізоляції між провідниками.

4.5.1. Випробування провадиться до нанесення корпусної ізоляції між провідниками та трубками охолодження та на цілком готових стрижнях. Для стрижнів обмоток з водяним охолодженням випробування провадиться до наповнення наконечника та нанесення ізоляції.

4.5.2. Випробування виконується шляхом послідовного підімкнення двох провідників та трубок охолодження, які знаходяться поруч, до джерела напруги послідовно з лампою розжарювання. Запалювання лампи вказує на замикання провідників (трубок).

5. ВІДБІР ВИРОБІВ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ

5.1. Випробуванню, окрім вимірювання $\text{tg}\delta$ ізоляції та вибіркового випробування, підлягає кожний виріб.

5.2. Вимірювання $\tan\delta$ ізоляції провадяться для машин потужністю 50 МВт (МВ А) та вище на кожному стрижні (котушці) обмотки, для машин потужністю меншій 50 МВт (МВ А) - 60 стрижнях (котушках) з доданням 10 % загальної кількості стрижнів (котушок).

5.3. Вибірковим випробуванням підлягають два довільно вибраних стрижні (котушки) із комплекта обмотки, якщо інше не передбачено погодженням виробника та споживача.

6. ВИМОГИ ДО ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТА ВИПРОБУВАЛЬНИХ УСТАТКОВАНЬ

6.1. Загальні вимоги.

6.1.1. Вимірювання усіх електричних величин під час випробування машин слід провадити електровимірювальними приладами класу точності не нижче 0,5, за винятком приладів для вимірювання опору ізоляції та мостів діелектричних втрат, які повинні мати клас точності не нижче 1,5.

6.1.2. Шунти, додаткові резистори, вимірювальні трансформатори струму та напруги повинні мати клас точності на один клас вище класу точності вимірювальних приладів.

6.1.3. Під час випробувань ізоляції машин масового випуску на механізованому та автоматизованому випробувальному устаткуванні електровимірювальні прилади повинні мати клас точності не гірше 1,5.

6.2. Вимоги до приладів для вимірювання опору ізоляції.

6.2.1. Під час вимірювання опору ізоляції слід використовувати мегаомметри:

- за номінальною напругою обмотки до 500 В - на 500 В;
- за номінальною напругою обмотки понад 500 В та до 3000 В - на 1000 В;
- за номінальною напругою понад 3000 В - на 2500 В

6.3. Вимоги до устаткування для випробування ізоляції підвищеного напругою змінного струму.

6.3.1. Устаткування для випробування ізоляції підвищеною напругою змінного струму повинно забезпечувати синусоїдальну напругу частотою від 40 до 62 Гц, відношення амплітудного значення напруги до діючого значення від 1,34 до 1,48%, (або вміст вищих гармонік - не більше 5% діючого значення основної гармоніки).

6.3.2. Устаткування повинно забезпечувати регулювання випробувальної напруги в інтервалі від половини до повного значення випробувальної напруги випробуваної ізоляції, плавно або ступенями, що не перевищують 5% його кінцевого значення. Якщо випробувальна напруга не перевищує 2 кВ, устаткуванню може подавати повну випробувальну напругу.

6.3.3. Вимірювання випробувальної напруги слід провадити за допомогою електростатичного вольтметра, вимірювального трансформатора напруги або вимірювальної обмотки випробувального трансформатора. Вимірювання випробувальної напруги до 3 кВ дозволяється виконувати за допомогою вольтметра з додатковим резистором.

6.4. Вимоги до устаткування для випробування ізоляції підвищеною напругою постійного струму.

6.4.1 Як джерело підвищеної напруги постійного струму може вживатись устаткування, яке має одно- або двохполуперіодну схему випрямлення. Коефіцієнт пульсації випробувальної напруги устаткування (з підімкненим об'єктом випробування) не повинен перевищувати 5 %. Устаткування повинно забезпечувати плавне регулювання випробувальної напруги протягом усього інтервалу вимірювання.

6.4.2 Устаткування для випробування повинно забезпечити вимірювання струму витoku ізоляції у колі підводу випробувальної напруги до об'єкту випробувань. Для обмоток машин з водяним охолодженням рекомендується виконувати одночасно роздільне вимірювання струму витoku ізоляції у кожній фазі (гілці) обмотки.

6.4.3. Вимірювання напруги слід робити за допомогою електростатичного вольтметра або вольтметра з роздільником напруги. Похибки вимірювання випробувальної напруги повинні бути не більше ніж 3%.

6.4.4. Вимірювання струму витoku слід проводити багатограничним приладом з перемиканням границь під випробувальною напругою. Прилад слід постійно зашунтовувати закороткою та вимикати у момент вимірювання струму витoku ізоляції.

6.5. Вимоги до устаткування для вимірювання тангенса кута діелектричних втрат.

6.5.1. Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ізоляції слід робити мостом Шерінга або іншим устаткуванням для вимірювання ємності й тангенса кута діелектричних втрат.

6.5.2. Точність вимірювання тангенса кута діелектричних втрат повинна бути $\pm(10-4+10-2t\delta)$.

6.6. Вимоги до устаткування для перевірки ізоляції між провідниками.

6.6.1. Устаткування для перевірки ізоляції між елементарними провідниками повинно забезпечувати на виході випробувальну напругу не менше 110 В, подання випробувальної напруги щупами, індикацію замикання за допомогою світлового сигналу.

7. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ

7.1. Після закінчення вимірювання опору ізоляції кожного кола його слід розрядити, з'єднати з заземленим корпусом машини. Для обмоток на

номінальну напругу 3кВ та понад тривалість з'єднання з корпусом повинна бути:

- для машин потужністю до 1000 кВт (кВА) - не менше 15 с;
- для машин потужністю понад 1000 кВт (кВА) - не менше 60 с.

У разі використання мегаомметра на 2500 В тривалість з'єднання з корпусом повинна бути не менше 3 хв незалежно від потужності машини.

7.2. Після вимикання випробувального устаткування постійного струму випробувальне коло необхідно розряджати електричним з'єднанням із заземленим корпусом машини на час, не менший 5 хв. Для обмоток машин потужністю понад 1000 кВт (кВА) заземлення слід провадити у два етапи: спочатку через резистор, який обмежує струм розряду, а потім - з'єднанням закороткою.

7.3. Устаткування для вимірювання тангенса кута діелектричних втрат повинне бути забезпечене розрядниками, які захищають низькопотенціальну частину устаткування від проникнення високої випробувальної напруги.

7.4. Металеві неструмопровідні частини машини, яку випробують, випробувального та допоміжного обладнання слід заземлити.

7.5. Приміщення для проведення випробувань повинні бути пристосовані для роботи із стаціонарними системами протипожежної сигналізації та захисту.

5. ДСТУ 2331–93 «МАШИНИ ЕЛЕКТРИЧНІ АСИНХРОННІ ПОТУЖНІСТЮ ДО 400 кВт ВКЛЮЧНО. ДВИГУНИ. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ТА МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ»

Чинний від 01.01.95

Цей стандарт поширюється на електричні двигуни загального призначення напругою до 1000 В (далі – двигуни) та визначає вимоги до якості двигунів, які забезпечують безпеку для життя та здоров'я населення і методи їх випробувань.

Вимоги, встановлені цим стандартом, є обов'язковими при розробленні технічної документації на конкретні види двигунів.

Стандарт не поширюється на двигуни, які встановлюються на засобах наземного і повітряного транспорту, на вибухозахищені та заглибні двигуни.

Стандарт придатний для сертифікації.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. Конструкція двигунів повинна забезпечувати безпеку працюючих під час експлуатації за умови дотримання вимог, передбачених експлуатаційною документацією.

1.2. Для запобігання або зменшення до допустимого рівня впливу на людину електричного струму рухомих частин двигунів, частин, які нагріваються до високих температур, шуму та вібрації в конструкції двигунів можуть бути використані:

- 1) ізоляція струмопровідних частин;
- 2) живлення від мережі малої напруга;
- 3) елементи для здійснення заземлення металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою;
- 4) елементи, які відмикають двигуни від мережі;
- 5) оболонки для запобігання можливості випадкового дотику до струмо-провідних, рухомих частин та частин, які нагріваються;
- 6) засоби шумо- та віброзахисту.

1.3. Зниження пожежної небезпеки двигунів досягається:

- 1) виключенням використання в конструкції двигунів легкозаймистих матеріалів згідно з ГОСТ 12.1.044;
- 2) виключенням проникнення горючих речовин зовні до пожежонебезпечних вузлів двигунів;
- 3) використанням засобів та (або) елементів, призначених для відмикання двигунів у аварійному режимі роботи (перевантаження, перегрів, коротке замикання та ін.) та виключаючих займання частин двигунів, виконаних із електроізоляційних матеріалів (наприклад, двигуни з температурним захистом).

2. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ

2.1. Загальні вимоги.

Двигуни повинні відповідати вимогам цього стандарту, ГОСТ 12.2.007.0, ГОСТ 12.2.007.1, ГОСТ 12.2.003, ГОСТ 12.1.004.

В конструкції двигунів повинні бути передбачені засоби шумо- та віброзахисту, які забезпечують рівні шуму та вібрації на робочих місцях у відповідності із затвердженими санітарними нормами.

Допустимі значення шумових та вібраційних характеристик повинні бути встановлені у нормативно-технічних документах на конкретні види двигунів.

2.1.1. Вимоги про наявність в конструкції двигунів елементів, призначених для захисту від випадкового дотику до рухомих та струмопровідних частин, а також допустима температура нагріву корпусів

двигунів повинні бути зазначені у нормативно-технічних документах на конкретні види двигунів.

2.1.2. Конструкція двигунів повинна виключати можливість неправильного приєднання його зчленованих струмопровідних частин під час монтажу у споживача.

2.1.3. Двигуни повинні бути стійкими до дії механічних зовнішніх факторів.

Групи виконання двигунів по стійкості до дії механічних зовнішніх факторів згідно з ГОСТ 17516.1 встановлюють у нормативно-технічних документах на конкретні види двигунів.

2.1.4. Двигуни масою більше 20 кг або такі, що мають великі габаритні розміри, повинні мати пристрій для піднімання, опускання і утримання у всячому положенні при монтажних та такелажних роботах, якщо контури двигунів не дозволяють зручно і надійно захопити їх тросом підйомного пристрою.

2.1.5. Конструкція підшипникових вузлів повинна виключати можливість стікання масла по валу на обмотки двигунів, на настил робочої площадки, на струмопровідні частини і обладнання, а розташування маслянок повинно забезпечувати вільний та зручний доступ до них для обслуговування.

2.1.6. Конструкція і матеріал вивідних кінців та панелей виводів із затискачами повинні виключати можливість поверхневого перекриття розрядами під час роботи двигунів в умовах підвищеної вологості або зниженого тиску, встановлених у нормативно-технічних документах на конкретні види двигунів.

2.1.7. Двигуни для побутових приладів повинні бути сконструйовані так, щоб небезпека виникнення пожежі та механічних пошкоджень, які знижують безпеку у результаті роботи з відхиленням від вимог експлуатаційної документації або недбалої експлуатації, була мінімальною та щоб була виключена можливість ураження електричним струмом.

2.1.8. Двигуни з конденсаторами неповинні становити небезпеку ураження електричним струмом від заряджених конденсаторів у випадку дотику до вивідних затискачів через 1 с після відмикання від мережі.

2.1.9. Пожежна безпека двигунів повинна забезпечуватися як у нормальному, так і в аварійному режимах роботи. Імовірність виникнення пожежі не повинна бути більшою ніж 10^{-6} на рік згідно з ГОСТ 12.1.004.

2.2. Вимоги до ізоляції.

2.2.1. Вибір ізоляції двигунів та його частин повинен визначатися застосовуваною напругою.

Опір ізоляції струмопровідних частин двигунів відносно корпусу повинен бути не менше зазначеного в таблиці 1.

Таблиця 1

Умови, при яких провадяться заміри опору	Значення опору основної ізоляції, МОм	
	двигунів для побутових приладів	інших двигунів
1. В практично холодному стані за нормальних кліматичних умов	100	10,0
2. При робочій температурі	2	3,0
3. При верхньому значенні вологості повітря	2	0,5

2.2.2. Ізоляція обмоток відносно корпусу двигуна та між обмотками повинна витримувати без пошкодження на протязі 1 хв випробувальну напругу частоти 50 Гц, практично синусоїдну, згідно з ГОСТ 183.

2.2.3. Клас захисту двигунів від ураження електричним струмом згідно з ГОСТ 12.2.007.0 повинен бути зазначений у нормативнотехнічних документах на конкретні види двигунів.

2.2.4. Додатково у нормативно-технічних документах на двигуни для побутових приладів повинен бути зазначений струм витоку двигунів при усталеному тепловому стані і після дії вологи, який не повинен перевищувати 3,5 мА при напрузі 1,1 $U_{ном}$.

2.3. Вимоги до заземлюючого пристрою.

У двигунах класів 01 і 1 повинно бути забезпечено електричне з'єднання усіх доступних металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою, із заземлюючими затискачами.

Значення опору між заземлюючим затискачем та кожною доступною дотику металевою неструмопровідною частиною двигуна, яка може опинитися під напругою, не повинно перевищувати 1 Ом.

Двигуни повинні мати для заземлення корпусу зовнішні заземлюючі затискачі, обладнані пристроєм, що запобігає самовідкручуванню: один на корпусі та один - у струмовводі.

Для двигунів потужністю до 0,55 кВт допускається за узгодженням із замовником наявність затискача тільки у струмовводі.

Двигуни видів кліматичних виконань Т1, Т2, Т3, ОМ2, ОМ5 потужністю до 0,55 кВт повинні мати один затискач заземлюючий на корпусі та один у струмовводі, двигуни потужністю від 0,75 до 400 кВт повинні мати два затискачі заземлюючих на корпусі та один - у струмовводі.

Для вбудованих двигунів заземлюючі затискачі встановлюють на виробках, в які вбудовується двигун.

Затискачі заземлюючі і знаки заземлення - згідно з ГОСТ 21130.

2.4. Вимоги до оболонки.

2.4.1. Оболонки двигунів повинні з'єднуватися з основними їх частинами в єдину конструкцію, закривати небезпечну зону і зніматися тільки за допомогою інструменту.

2.4.2. В разі необхідності оболонки повинні мати рукоятки, скоби та інші пристрої для зручного і безпечного утримання їх при зніманні та установленні.

2.4.3. Ступінь захисту від дотику до струмопровідних і рухомих частин за допомогою оболонок повинен відповідати ГОСТ 17494 і має бути зазначений у нормативно-технічних документах на конкретні види двигунів.

2.5. Вимоги до струмоводів.

2.5.1. Ввід проводів у корпуси, струмоводи та інші пристрої слід здійснювати через ізоляційні деталі. При цьому повинна виключатися можливість пошкодження проводів та їх ізоляції у процесі монтажу та експлуатації двигунів.

2.5.2. Конструкція і матеріал струмоводу повинні виключати можливість випадкового дотику до струмопровідних частин, електричних перекриттів, а також замикання провідників на корпус та короткого замикання.

У двигунах, які виготовляються без струмоводу, повинні бути передбачені заходи, що виключають можливість випадкових дотиків до виводів обмоток.

2.6. Вимоги до маркування.

Виводи обмоток двигунів повинні бути виконані таким чином, щоб була можливість нанесення маркування.

Маркування виводів - згідно з ГОСТ 26772.

3. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ

3.1. Випробування двигунів на підтвердження вимог безпеки мають бути обов'язковими при проведенні кваліфікаційних, приймально-здавальних, періодичних та сертифікаційних випробувань.

Перелік випробувань наведено у таблиці 2.

Кількість і порядок відбору зразків, які повинні піддаватися випробуванням, повинні бути зазначені у нормативно-технічних документах на конкретні види двигунів.

3.2. Під час проведення випробувань двигунів повинні дотримуватись вимог, установлених НТД "Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів" та "Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів".

Вимірювальна апаратура повинна задовольняти вимогам ГОСТ 11828.

Таблиця 2

Найменування випробування	Види випробувань		
	кваліфікаційні, сертифікаційні	приймально-здавальні	періодичні
1. Зовнішній огляд	+	+	+
2. Вимірювання опору ізоляції	+	+	+
3. Перевірка ізоляції обмоток на електричну міцність	+	+	+
4. Перевірка струму витoku	+	-	+
5. Вимірювання опору між заземлюючим елементом та кожною доступною металевою частиною	+	-	+
6. Перевірка ступеня захисту	+	-	+
7. Вимірювання температури корпусу	+	-	-
8. Визначення рівня звуку	+	-	+
9. Вимірювання та оцінювання вібрації	+	-	+
10. Перевірка двигуна у ненормальному режимі роботи	+	-	+
11. Випробування на стійкість до дії механічних зовнішніх факторів	+	-	+
12. Випробування на пожежну безпеку	+	-	-
13. Перевірка на небезпеку ураження електричним струмом від заряджених конденсаторів	+	-	-

Примітка. Знак "+" - випробування (перевірка, вимірювання) - проводиться

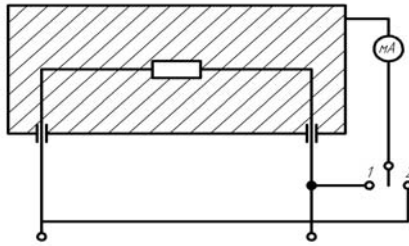
Знак "-" - випробування (перевірка, вимірювання) - не проводиться.

3.3. Перед випробуваннями треба перевірити зовнішнім оглядом наявність заземлюючих затискачів і знака заземлення, маркування виводів, розташування струмовводу, а також затягнення болтів, гвинтів, гайок, вільне обертання ротора.

3.4. Вимірювання опору ізоляції та випробування ізоляції обмоток на електричну міцність проводять згідно з ГОСТ 11828.

3.5. Струм витoku двигуна вимірюють між корпусом або щитами і всьома полюсами струмопровідних частин після випробувань двигуна на нагрівання та вологостійкість. Якщо корпус або щити двигуна пофарбовані, то як електрод використовують металеву фольгу площею не менше (20×10) мм², щільно притиснуту до поверхні корпусу або щита.

Струм витoku вимірюють за допомогою селективного перемикача, наведеного на схемі, у кожному із положень 1 та 2:



При досягненні двигуном усталеного теплового стану струм витoku не повинен перевищувати 3,5 мА при напрузі $1,1 U_{\text{ном}}$.

3.6. Для вимірювання опору між заземлюючим елементом та кожною доступною металеву частинною двигунів, пропускають стум 25 А, одержуваний від джерела змінного струму, напруга холостого ходу якого не перевищує 12 В. За зазначенням вимірюного спаду напруги між заземлюючим елементом та кожною доступною металеву частинною двигунів і струму визначають значення опору, яке не повинно перевищувати 0,1 Ом.

3.7. Перевірку на небезпеку ураження електричним струмом від заряджених конденсаторів у разі дотику до вивідних затискачів провадять десять разів таким чином.

Двигуни повинні працювати в номінальному режимі, потім їх відмикають від мережі. Через 1 с після відмикання заміряють величину напруги між вивідними затискачами приладом, який не має помітного впливу на вимірювану напругу. Виміряна напруга не повинна перевищувати 34 В.

3.8. Перевірка ступеня захисту від дотику до струмопровідних та рухомих частин двигунів на відповідність першій характеристичній цифрі – згідно з ГОСТ 17494.

3.9. Вимірювання температури корпусів двигунів провадяться методом термометра - згідно з ГОСТ 11828.

Відлік температури треба провадити тільки після повного встановлення показань вимірювача.

3.10. Методи визначення рівня звуку - згідно з ГОСТ 11929. Вимірювання провадяться під час роботи двигунів в режимі холостого ходу.

3.11. Методи оцінювання вібрації - згідно з ГОСТ 12379.

Вимірювання вібрації провадяться при пружному установленні двигунів.

Напрямы і точки вимірювання вібрації повинні бути зазначені в нормативно-технічних документах на конкретний вид двигунів.

3.12. Випробування двигунів у ненормальному режимі роботи провадять із загальмованим ротором та замкненим накоротко пусковим конденсатором (якщо він передбачений конструкцією) при номінальній напрузі, починаючи з холодного стану протягом 10 хв.

Після закінчення випробування температура обмоток не повинна перевищувати для класів нагрівостійкості ізоляції: А - 473 К (200°C); Е - 488 К (215 °С); В - 498 К (225 °С); Р-513К (240°C); Н-533К (260°C).

3.13. Методи випробувань двигунів на стійкість до дії механічних зовнішніх факторів - згідно з ГОСТ 16962.2.

3.14. Випробування на пожежну безпеку провадяться методом експериментального визначення імовірності виникнення пожежі - згідно з ГОСТ 12.1.004.

Кількість двигунів для проведення випробування повинна бути достатньою для забезпечення вірогідності та точності експериментальних даних, але не менше трьох.

Імовірність зосередження горючих речовин в двигунах, які являють пожежну небезпеку, приймається рівною 1, тому що ізоляція обмотки в асинхронних двигунах є горючою і являє пожежну небезпеку.

3.15. Імовірність виникнення пожежі від двигуна розраховується за формулою

$$Q_{П} = Q_{ПР} \cdot Q_{З} \cdot Q_{НЗ} \cdot Q_{ПЗ}, \quad (1)$$

де $Q_{ПР}$ – імовірність виникнення характерного пожежонебезпечного режиму;

$Q_{З}$ – імовірність займання горючого матеріалу обмотки;

$Q_{НЗ}$ – імовірність неспрацювання (відказу) захисту (електричного, теплового і т.п.);

$Q_{ПЗ}$ – імовірність того, що значення характерного електротехнічного параметра знаходяться у діапазоні пожежонебезпечних значень.

3.16. Імовірність $Q_{ПР}$ визначається за формулою

$$Q_{ПР} = Q_{В} \cdot Q_{ПВ} \quad (2)$$

де $Q_{В}$ – імовірність відказу двигунів на протязі одного року експлуатації;

$Q_{ПВ}$ – імовірність того, що відказ, який виник, є пожежонебезпечним.

3.17. Імовірність $Q_{В}$ визначається на основі експериментальних даних, наприклад, за результатами випробувань двигунів на надійність.

3.18. Значення імовірності $Q_{ПВ}$ приймається рівним 0,08.

3.19. Імовірність займання горючого матеріалу $Q_{З}$ під час роботи в екстремальному режимі (надалі P'') визначається як верхня довірча границя крапкової оцінки імовірності займання

$$Q_3 = m/n, \quad (3)$$

де m – кількість дослідів, в яких при досягненні критичної температури відбувся відказ двигунів або їх займання;

n – кількість двигунів.

Значення P'' при довірчій імовірності $P^* = 0,5$ наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Кількість дослідів, m	Значення p'' для кількості двигунів n		
	3	4	5
0	0,207	0,160	0,130
1	0,500	0,390	0,314
2	0,794	0,614	0,500
3	1,000	0,840	0,790
4	-	1,000	0,870

3.20. Під екстремальним режимом двигуна розуміється будь-який режим роботи, що підвищує температуру нагріву обмотки двигуна до критичної (температури займання).

Під час випробувань за екстремальний режим, який приводить до температури займання ізоляції обмотки, повинен бути прийнятий один із режимів:

- 1) режим роботи на двох фазах;
- 2) режим при пониженій напрузі і загальмованому роторі;
- 3) режим при навантаженні на валу, більшому за номінальне;
- 4) інші режими, що підвищують температуру нагрівання двигунів.

3.21. Температура займання ізоляції обмотки приймається рівною критичній температурі, що визначається за графіками залежності температури від середнього ресурсу системи ізоляції, зазначеними ГОСТ 10518. За критичну температуру приймається температура, відповідна річному ресурсу двигунів.

Температура під час випробувань не повинна перевищувати 453 К (180 °С) для класу нагрівостійкості В, 473 К (200 °С) – для класу нагрівостійкості F, 494 К (220 °С) – для класу нагрівостійкості Н.

3.22. Під час випробувань у екстремальному режимі двигуни відмикаються від мережі при досягненні критичної температури.

Дослід вважається негативним, якщо при досягненні критичної температури не сталося займання ізоляції обмотки або її відказ.

Дослід вважається позитивним, якщо при досягненні критичної температури відказали двигуни або сталося займання обмотки. Під процесом займання треба розуміти з'явлення диму, іскор, вогню.

3.23. Імовірність неспрацювання (відказу) захисту ($Q_{НЗ}$) двигунів розраховується за формулою

$$Q_{НЗ} = 1 - \exp(-\lambda_3 \cdot T_{Год}), \quad (4)$$

де λ_3 – імовірність відказів елементів захисту, використовуваних у двигунах, год⁻¹.

Якщо конкретний тип захисту двигунів не зазначений, то λ_3 приймається рівною $0,5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

3.24. Імовірність того, що величина характерного електричного параметра знаходиться у діапазоні пожежонебезпечних значень $Q_{ПЗ}$, визначається на основі випробувань двигуна у екстремальному режимі за формулою:

$$Q_{ПЗ} = \frac{I_{ПЗ} - I_{НЗ}}{I_{МЗ} - I_{НЗ}} \quad (5)$$

де $I_{ПЗ}$ – значення струму під час випробування двигунів у пожежонебезпечному режимі;

$I_{НЗ}$ – номінальний струм двигунів;

$I_{МЗ}$ – максимальне значення струму, яке може привести у аварійному режимі до відказу двигунів.

Визначення $I_{МЗ}$ провадиться в режимі загальмованого ротора двигуна.

3.25. Двигуни відповідають зазначеним вимогам з пожежної безпеки, якщо одержане значення $Q_{П}$ менше 10^{-6} .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольдберг О. Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. – М., 1976. – 56 с.
2. Рьжкин А.А., Слюсарь Б.Н., Шучев К.Г. Основы теории надежности: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. 2002. – 182 с.
3. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. – М.: Высшая школа, 1985. – 168 с.
4. Ермолин Н. П., Жерихин И. П. Надежность электрических машин. – Л., 1976. – 248с.
5. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н. И. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для ВУЗов по спец. «Электро-механика». – М.: Вышш.шк., 1988. –232 с.
6. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.,1976. – 279 с.
7. ДСТУ 2863-94. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. – Чинний від 1994–12–08. – Київ: Держстандарт України, 1994. – IV, 37 с. – (Надійність техніки).
8. ДСТУ 2864-94. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. – Чинний від 1996-01-01. – К.: Держстандарт України, 1995. – IV, 30 с. – (Надійність техніки).
9. ДСТУ 3004-95. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. – Чинний від 1995-01-25. – Київ: Держстандарт України, 1995. IV, 130 с. – (Надійність техніки).
10. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 564 с.
11. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры электроники и автоматики. – М., 1975. – 471 с.
12. Хазан С. И. Турбогенераторы. Повреждения и ремонт. М., 1983. –520 с.
13. Бернштейн Л. И. Изоляция электрических машин общепромышленного применения. –М.: Энергия, 1971, – 367 с.
14. Вакуленко К. Н., Реуцкий Н. А., Бесперстов П. П. Повышение качества и надежности электрических машин. – К.: Об-во «Знание» УССР, 1979. – 20 с.
15. Таран В. П. Техническая диагностика при эксплуатации электрооборудования. –К.: Урожай, 1978. – 152с.
16. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техніка, 1983. –200 с.

17. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
18. ДСТУ 2925-94. Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення: Чинний від 1996-01-01. Офіц.вид. – К.: Держстандарт України, 1995. – 34 с.
19. Коваленко И.Н. Расчет вероятностных характеристик систем / Коваленко И. Н. – К.: Техніка, 1982. – 95 с.
20. Васілевський О.М. Нормування показників надійності технічних засобів: навч. посіб. / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко ; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.
21. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
22. Мозгалеvский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высш.шк., 1975. – 207с.
23. Кутін В.М. Диагностика електрообладнання: навчальний посібник /В. М. Кутін, М.О. Ілюхін, М.В. Кутіна. – Вінниця: ВНТУ, 2013. –161 с.
24. Гаспер Б.С., І.Н. Липатов І.Н. Решение задач по курсу прикладная теория надежности (Учебное пособие). – Пермь: ПГТУ, 1998. – 89с.
25. Губаревич О. В., Невзлін Б.І. Надійність і диагностика електрообладнання: Навчальний посібник. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2004. – 156 с., бібліогр.15 назв.
26. Данко П. Е., Попов А. Г., Кожевникова Т. Я. Высшая математика в упражнениях и задачах: Учеб. Пособие для студентов втузов. В 2-х ч. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 415 с.
27. Заренин Ю. Г., Хлобыстова О. А. Оптимальное планирование испытаний на надежность приборов и средств автоматизации // Приборы и системы управления. – 1981. – № 9. – С. 13-15.
28. Таран В. П. Об организации диагностирования при эксплуатации электрооборудования. Пром. энергетика, 1979, №6, – С.18-20.
29. Основы технической диагностики / [В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян та ін.]. – М. : Энергия, 1976. – 464 с.
30. Гайдамака А.В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення: навч. посіб. / А. В. Гайдамака. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – 248с.
31. Заренин Ю.Г., Хлобыстова О.А. Графоаналитические методы решения задачи оптимального планирования испытаний на надежность // Надежность и контроль качества. – 1981. – № 11. – С. 33-43.
32. Аронов И. З., Бодин Б. В., Лapidус В. А. Надежность и эффективность в технике: Справочник специалиста. Том 6. Экспериментальная отработка и испытания. – М. : Машиностроение, 1989. – 376 с.

33. ДСТУ 2861-94. Аналіз надійності. Основні положення. – Чинний від 1996-01-01. – Київ: Держстандарт України, 1994. – IV, 32 с. – (Надійність техніки).
34. Губаревич О.В. К вопросу ускоренных испытаний на надежность машины постоянного тока: Матеріали XVIII міжнар.наук.-техн. конф. Технологія-2015, 17-18 квіт. 2015, м. Северодонецьк. Ч. II: [Технол. ін-т, Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля (м. Северодонецьк)], – Северодонецьк, 2015. – С.85 – 88.
35. Кирса В.И. Прогнозирование технического состояния машин. – К.: Урожай, 1978. – 72с.
36. Кутін В. М. Вибір стратегії відновлювальних дій складних електротехнічних систем / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко, В. О. Травінський, Ю.М. Притула // Вісник Керменчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – № 2 (25). – С. 48-49.
37. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
38. ДСТУ 2389-94. Технічна діагностика. Терміни і визначення. – Чинний від 1995-01-01. – Київ: Держстандарт України, 1994, 26с.
39. Руссов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. – Пермь, 2012. – 252 с.
40. Ясинський Ю.О., Немчинов А.О., Нікішин О.М. Прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання з урахуванням якості споживаємої електроенергії / Системи обробки інформації. – 2010, випуск 9 (90) Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.
41. Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах // Вісник Керменчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: 230 КДПУ. – 2002. – Вип. 1. – С. 81-85.
42. Черный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2004. – Вип. 15 – С. 160-168.
43. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. – Чинний від 2014-10-01. – Київ: Держстандарт України, 2014, 33с.
44. Синягин Н. Н., Афанасьев Н. А., Новиков С. А., Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики. – М.: Энергия, 1978. – 408 с.

ГЛОСАРІЙ

Безвідмовна робота	faultless work
Безвідмовність	faultlessness
Відмова	refuse
Вірогідність	authenticity
Визначальні випробування	determining tests
Граничний стан	maximum state
Довговічність	longevity
Експоненціальний розподіл	eksponentnoe distributing
Захищеність	protected
Збереженість	safety
Інтегральна функція	integral function
Інтенсивність	intensity
Інтенсивність відмов	intensity of refuses
Імовірність безвідмовної роботи	probability of faultless work
Імовірність відмови	probability of refuse
Контрольні випробування	proof-testing
Критерій відмови	criterion of refuse
Надійність	reliability
Напрацювання	work
Напрацювання до відмови	work is to the refuse
Нормальний закон розподілу	normal law of distributing
Показник надійності	reliability index
Постійне резервування	permanent backuping
Роботоздатність	capacity
Ресурс	resource
Розподіл Вейбулла	distributing of Veybulla
Середній час відновлення	mean time of renewal
Середнє напрацювання	middle work
Теорія надійності	theory of reliability
Термін експлуатації	term of exploitation
Технічний засіб	hardware
Частота відмов	frequency of refuses
Щільність імовірності	closeness of probability

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А		
	Абразивний знос,	56, 111
Б		
	Безвідмовна робота,	31
	Биття колектору,	51, 112, 144
В		
	Відмова,	16, 28, 102, 115
	Вібрація,	16, 56, 58, 111
	Випробування	
	- визначальні,	77, 87
	- контрольні,	78
	- прискорені,	81
Г		
	Гамма-процентний ресурс,	36
	Граничний стан,	28, 35, 36
Д		
	Довговічність,	27, 61, 67, 71, 172
Е		
	Експлуатаційні відмови,	102
	Експоненціальний розподіл,	42, 43, 69
З		
	Збережуваність,	28

І		
	Інтенсивність відмов,	17, 18, 19, 37 31
	Імовірність	
	- безвідмовної роботи,	30, 33, 41, 44, 46, 53, 76, 85
	- відмови,	31, 41, 53, 75
К		
	Коефіцієнт готовності,	35
	Коефіцієнт вимушеного простою,	35
	Коефіцієнт прискорення,	78, 79, 81
	Конструктивні відмови,	101
	Критерій відмови,	51, 60
	Критерій працездатності,	51, 60, 84
Л		
	Логарифмічно-нормальний розподіл,	44
М		
	Математичне очікування,	32, 43, 52
	Модель надійності,	45, 49, 72, 73
Н		
	Нагрівостійкість,	105
	Надійність структурна,	39
	Напрацювання	
	- до відмови,	32, 65
	- середнє,	34, 65
О		
	Опір ізоляції,	121
	Опір обмотки,	119

П		
	Планування випробувань,	88
	Показники надійності,	29, 30
	Поток відмов,	33
	Працездатний стан,	29, 108
	Прогнозування,	162, 165
Р		
	Раптова відмова,	28
	Ремонтопридатність,	28
	Ризик замовника,	80, 81
	Ризик виробника,	80, 81
	Рівняння Ходвинка,	70, 171
	Розподіл	
	- Вейбулла	43, 64, 65
	- Гауса	43
С		
	Середнє напрацювання на відмову,	34
	Структура надійності,	39, 40
	Ступінь іскріння щіток,	147
Т		
	Термін служби,	29, 71, 105
	Технічний ресурс,	29, 173
	Технологічні відмови,	101
Ф		
	Функція Лапласа,	44
Ч		
	Частота відмов,	31
Щ		
	Щільність розподілу,	45, 74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АД	Асинхронний двигун
БР	Безвідмовна робота
ЕА	Електричний апарат
ЕМ	Електрична машина
ЕОМ	Електронна обчислювальна машина
ЕРС	Електрорушійна сила
ЕТУ	Електротехнічне устаткування
ІБР	Імовірність безвідмовної роботи
МПС	Машина постійного струму
НД	Нормативний документ
ПЗ	Програмне забезпечення
ПН	Показник надійності
ПНЗ	Програма забезпечення надійності
ППР	Планово-попереджувальні роботи
СКВ	Середньоквадратичне відхилення
СМ	Синхронна машина
ТУ	Технічні умови
$a(t)$	Частота відмов
K_T	Коефіцієнт готовності
K_{Π}	Коефіцієнт вимушеного простою
m_x	Математичне очікування
N_0	Число виробів на початку випробувань
$n(t)$	Число виробів, що відмовили, за час t .
$n(\Delta t)$	Число виробів, що відмовили, в інтервалі часу Δt
$P(t)$	Імовірність безвідмовної роботи
$P(t_1 < t < t_2)$	Імовірність безвідмовної роботи в заданому інтервалі t_1, t_2
$P_c(t)$	Імовірність безвідмовної роботи системи
P_α	Приймальний рівень імовірності безвідмовної роботи
P_β	Рівень імовірності безвідмовної роботи бракування партії виробів

$Q(t)$	Імовірність відмови
T_{cp}	Середнє напрацювання до першої відмови
t	Час
$tg\delta$	Тангенс кута діелекторичних втрат
α	Ризик виробника
β	Ризик замовника
Δt	Інтервал часу від t_{i-1} до t_i
$\lambda(t)$	Інтенсивність відмов
σ	Середньоквадратичне відхилення;
τ	Термін служби ізоляції
$\Phi(x)$	Інтеграл імовірності (інтеграл Лапласа)
$\omega(t)$	Параметр потоку відмов

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	5
1.1. Проблема надійності та її значення для сучасної техніки.....	5
1.2. Статистика відмов та аналіз пошкоджень електричних машин	7
1.3. Забезпечення і підвищення надійності електричних машин	20
1.4. Розрахунок економічно оптимальних значень показників надійності електричних машин.....	26
Контрольні запитання до розділу	26
2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ	27
2.1. Основні поняття і терміни теорії надійності	27
2.2. Показники надійності	30
2.3. Періоди роботи технічних виробів.....	36
2.4. Структурна надійність.....	39
2.5. Закони розподілу відмов	42
2.6. Модель «слабкої ланки».....	45
2.7. Надійність основних вузлів електричних машин. Моделі надійності	48
2.7.1. Надійність колекторно-щіткового вузла і контактних кілець. Аналіз роботи колекторно-щіткового вузла	48
2.7.2. Надійність підшипникових вузлів електричних машин.	55
2.7.3. Надійність ізоляції обмоток електричних машин.....	66
2.8. Оцінка надійності за даними випробувань і експлуатації.....	77
2.8.1. Основні методи оцінки надійності.....	77
2.8.2. Прискорені випробування на надійність. Визначення коефіцієнта прискорення.....	82
2.8.3. Методики проведення випробувань на надійність. Методика контрольних випробувань.	85
2.8.4. Метод послідовного аналізу	86
2.9. Методи теорії планування експериментів	88
Контрольні запитання до розділу	90

3. ОСНОВНІ ЕТАПИ І ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ	
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	91
3.1. Виділення найбільш інформативних показників оцінки працездатності основних вузлів електричних машин.....	91
3.2. Вибір параметрів і розробка методів діагностування електрообладнання.....	95
3.3. Вибір і розробка засобів для діагностування електрообладнання.....	98
3.4. Знос і пошкодження деталей і вузлів електрообладнання в процесі експлуатації.....	100
3.4.1. Закономірності процесів зносу деталей і вузлів електроустаткування.....	100
3.4.2. Старіння, дефекти та пошкодження ізоляції обмоток електричних машин і апаратів.....	103
3.4.3. Пошкодження і дефекти обмоток роторів і якорів електричних машин.....	109
3.4.4. Знос і пошкодження підшипників електричних машин.....	110
3.4.5. Знос і пошкодження активної сталі електричних машин.....	111
3.4.6. Знос і пошкодження колекторів, контактних кілець і щіткового механізму електричних машин.....	112
3.4.7. Знос і пошкодження апаратів управління і захисту електричних машин і установок.....	114
Контрольні запитання до розділу.....	117
4. МЕТОДИ, ПРИЛАДИ І СХЕМИ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ	
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	118
4.1. Діагностування обмоток електричних машин.....	118
4.1.1. Вимірювання опору обмоток постійного струму.....	119
4.1.2. Вимірювання опору ізоляції.....	120
4.1.3. Діагностування міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин.....	122
4.1.4. Визначення температурного режиму обмоток електричних машин.....	124
4.1.5. Моніторинг стану ізоляції обмотки сучасними методами.....	125
4.1.6. Діагностування короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів.....	128
4.2. Діагностування підшипників електричних машин.....	132
4.3. Визначення технічного стану магнітопроводів електричних машин.....	140
4.4. Визначення технічного стану колекторів, контактних кілець і щіткового механізму.....	143

4.4.1. Контроль стану колектора і контактних кілець	143
4.4.2. Визначення технічного стану щіткового механізму.....	146
4.4.3. Перевірка і регулювання комутації МПС.....	147
4.5. Діагностування електричних апаратів	149
4.5.1. Діагностування ізоляції котушок низьковольтних апаратів.....	149
4.5.2. Діагностування контактних систем низьковольтних апаратів.....	150
4.5.3. Контроль напруги втягування і відпуску якорів магнітних пускачів.....	153
4.5.4. Перевірка роботи елементів електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів.....	154
4.5.5. Визначення технічного стану і налаштування елементів теплового захисту.....	155
Контрольні запитання до розділу	158
5. УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	159
5.1. Управління технічним станом електрообладнання	159
5.2. Принципи та напрями прогнозування відмов основних елементів електричних машин.....	164
Контрольні запитання до розділу	175
Завдання для розрахунку надійності електрообладнання	176
ДОДАТКИ.....	179
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	236
ГЛОСАРІЙ.....	239
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	240
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	243

Навчальне видання

ГУБАРЕВИЧ Олег Володимирович

**НАДІЙНІСТЬ ТА ДІАГНОСТИКА
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

Підручник

Друкується в авторській редакції

Підписано до друку 11.11.2016.

Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір типогр. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. 14,4. Обл.-вид. арк.15,8.

Тираж 100 екз. Вид. № 3074. Замов. № 10/10. Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: просп. Центральний 59-А

м. Северодонецьк, 93400, Україна

e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com