

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

канд. техн. наук, доц.

_____ О. В. Попов

« ___ » _____ 2021 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ**

«МАГІСТР»

**ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
«ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГУВАННЯ ТА РЕМОНТ
ПОВІТРЯНИХ СУДЕН І АВІАДВИГУНІВ»**

Тема: « Дослідження методів діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака»

Виконав: _____ А. М. Кириченко

Керівник: канд. техн. наук _____ Е. П. Ясиніцький

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

охорона праці: канд.техн.наук, доцент _____ О. М. Гунченко

охорона навколишнього середовища: _____ Є. О. Бовсуновський

Нормоконтролер: _____

Київ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аерокосмічний факультет

Кафедра авіаційних двигунів

Освітній ступінь «Магістр»

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

канд. техн. наук, доц.

_____ О. В. Попов

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

КИРИЧЕНКО АНДРІЯ МИХАЙЛОВИЧА

1. Тема роботи: «Дослідження методів діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака» затверджено наказом ректора від 11 жовтня 2021р. № 2196/ст.
2. Термін виконання роботи: з 21 жовтня 2021 р. по 31 грудня 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: статистичні дані відмов і несправностей по результатам досвіду експлуатації вітчизняного легкого транспортного літака, наявні методи їх попередження.
4. Зміст пояснювальної записки: дослідження типових несправностей джерел живлення турбогвинтового двигуна, визначення параметрів об'єкта дослідження, методи та засоби діагностики технічного стану джерел живлення, вдосконалення системи діагностики і прогнозування виникнення несправностей, розробка заходів з охорони праці та навколишнього середовища.

Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: загальний

вигляд легкого транспортного літака Ан-26, схема розміщення джерел

живлення електричного струму на турбогвинтовому двигуні, сучасні методи

діагностування технічного стану авіаційної техніки.

6. Календарний план - графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Літературний огляд матеріалів за темою дипломної роботи	14.08–30.08. 2021 р.	
2	Аналіз завдань і тактико технічних даних легкого ВТЛ	30.08 – 19.09. 2021 р.	
3	Аналіз основних несправностей, що виникають в джерелах живлення турбогвинтового двигуна	19.09 – 01.10. 2021 р.	
4	Методи діагностики несправностей джерел живлення турбогвинтового двигуна і оцінка їх ефективності	01.10 – 16.10. 2021 р.	
5	Моделювання характеристик, які впливають на якість технологічних процесів та вдосконалення системи діагностики і прогнозування відмов	16.10 – 01.11. 2021 р.	
6	Виконання окремих розділів пояснювальної записки	01.11 – 15.11. 2021 р.	
7	Оформлення пояснювальної записки	15.11 – 06.12. 2021 р.	

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	канд. техн. наук, доц. Гунченко О. М.		
Охорона навколишнього середовища	канд. техн. наук, доц Бовсуновський Є. О.		

8. Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2021 р.

Керівник дипломної роботи

_____ (підпис)

Е.П. Ясиніцький

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

А.М.Кириченко

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: «Дослідження методів діагностики технічного стану джерел електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака»:

93 с., 12 мал., 11 табл., 27 джерел.

Об'єкт дослідження – турбогвинтовий двигун транспортного літака.

Предмет дослідження – джерела живлення електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака, дослідження та вдосконалення методів діагностики їх технічного стану.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення якісних характеристик електричного струму та напруги джерел живлення турбогвинтового двигуна транспортного літака, які використовуються для пілотажних, навігаційних приладів та іншого обладнання літака.

Метод дослідження – прогнозування технічного стану стартер-генераторов постійного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака шляхом побудови нечіткої діагностичної моделі з використанням теорії нечіткої логіки.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи визначається вдосконаленням системи діагностики технічного стану джерел електричного струму турбогвинтового двигуна шляхом дослідження методів оцінки технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу основних елементів електричних машин.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати в навчальному процесі і практичній діяльності персоналу з обслуговування джерел живлення електричного струму.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТУРБОГВИНТОВОГО ТРАНСПОРТНОГО ЛІТАКА.....	9
1.1 Короткий аналіз характеристик військово-транспортного літака літака Ан-26.....	9
1.2. Загальний огляд джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна на прикладі легкого транспортного літака Ан-26.....	12
1.2.1. Стартер-генератор СТГ-18ТМО.....	14
1.2.2. Регулятори напруги РН-180 і РН-120У.....	15
1.2.3. Комплексний апарат ДМР-600Т другої серії.....	16
1.2.4. Автомат захисту від перевантаження АЗП-8М.....	17
1.2.5. Генератори ГС-24Б, ГО16ПЧ8.....	18
1.2.6. Регулятор напруги РН-600, коробка включення та регулювання КВР-2.....	19
1.2.7. Автомат захисту від перенапруги АЗП1-1СД, коробка відсікання за частотою.....	19
Висновки до розділу 1	20
2 ОСНОВНІ ВИДИ ВІДМОВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН.....	21
2.1 Аналіз статистичних даних по відмовам.....	21
2.2 Аналіз методів діагностики і контролю щітково-колекторних вузлів.....	22
2.3. Аналіз методів діагностики і контролю стану підшипників.....	31
2.4. Аналіз методів діагностики ізоляції.....	36
Висновки до розділу 2	53
3 ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ	54
3.1. Роль діагностики в оцінці технічного стану електрообладнання турбогвинтового двигуна.....	54
3.2. Управління технічним станом електрообладнання джерел живлення	

електричного струму турбогвинтового двигуна.....	55
3.3. Принципи та напрями прогнозування відмов головних вузлів джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна.....	59
Висновки до розділу 3	71
4 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	72
4.1. Вплив на навколишнє середовище небезпечних та шкідливих факторів під час проведення діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака.....	72
4.2 Методи і засоби захисту навколишнього середовища від небезпечних та шкідливих факторів, які виникають при проведенні діагностичних робіт....	76
4.3 Розрахунок контуру захисного заземлення.....	78
Висновки до розділу 4	80
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	81
5.1. Аналіз умов праці на робочому місці.....	81
5.1.1. Організація робочого місця.....	81
5.1.2. Перелік шкідливих та небезпечних виробничих чинників.....	82
5.2. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників.....	82
5.2.1. Виробничий шум.....	82
5.2.2. Природне та штучне освітлення.....	84
5.2.3. Електробезпека.....	85
5.2.4. Пожежна безпека.....	85
5.3 Розрахунок захисної перегородки для захисту від виробничого шуму...	86
Висновки до розділу 5	88
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	89
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ	
ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	90

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АД – асинхронний двигун

АЦП – аналого- цифровий перетворювач

ГОСТ – державний стандарт

ГТД – газотурбінний двигун

ДЖЕС ТВД – джерела живлення електричного струму турбогвинтового двигуна

ЕМ – електрична машина

ЛА – літальний апарат

ОП – охорона праці

ОЯ – обмотка якоря

ПД – поршневий двигун

ПКВ – прилад контролю вологості

ППР – планово-попереджувальні роботи

ПС – повітряне судно

СЕП – система електропостачання

СТГ – стартер-генератор

ТВД – турбогвинтовий двигун

ТРД – турбореактивний двигун

ЩКВ – щітково-колекторний вузол

Rіз – опір ізоляції електричної машини

ВСТУП

Для перевезень вантажів використовуються три типи повітряних суден - пасажирські літаки, спеціалізовані вантажні повітряні судна та вантажні літаки, створені на базі пасажирських.

Пасажирськими літаками вантажі перевозяться в багажно-вантажних відсіках. Пасажирські літаки можуть перевозити близько 20 т вантажу, а сумарний обсяг вантажних приміщень зазвичай не перевищує 100 м^3 . Обсяг відсіків і розміри вантажних люків можуть суттєво обмежувати розміри вантажних місць.

Вантажні літаки спеціально створюються для транспортування вантажів, найчастіше для потреб військово-транспортної авіації. Нині вони широко використовуються у комерційній вантажній авіації. Збільшений перетин фюзеляжу забезпечує високу вантажомісткість; конструкція шасі дозволяє використовувати широкий спектр аеродромів, у тому числі ґрунтових; вантажні люки в носовій частині фюзеляжу та в хвостовій забезпечують максимальну величину вантажного отвору та зручність вантажних операцій; високо розташоване крило дає можливість зменшити навантажувальну висоту і використовувати вантажні рампи для навантаження та вивантаження накатом. Такі повітряні судна отримали назву рампові літаки. Вони мають найкращі технічні характеристики для вантажних перевезень.

Вантажні літаки, створені з урахуванням пасажирських, або одночасно будуються у вантажному варіанті, або переобладнуються компаніями-виробниками з пасажирських. Такі літаки мають вантажопідйомність до 100 т та обсяг вантажного приміщення до 600 м^3 . Їх експлуатація є найбільш економічною, оскільки за всіма основними елементами конструкції, за запасними частинами та технологією обслуговування вони відповідають пасажирським літакам, що випускаються у великих кількостях.

РОЗДІЛ 1

ПРИЗНАЧЕННЯ ТУРБОГВИНТОВОГО ТРАНСПОРТНОГО ЛІТАКА.

1.1. Короткій аналіз характеристик військово-транспортного літака

Головним призначенням літаків транспортної авіації є перевезення різноманітних вантажів.

За вантажопідйомністю транспортні літаки поділяються на легкі, з вантажопідйомністю до 11 т, - середні - до 20 т і важкі - більше 20 т.

За типом встановлених двигунів сучасні транспортні літаки поділяються на мають газотурбінні (ГТД) і поршневі (ПД) двигуни.

Літаки з газотурбінними двигунами в свою чергу діляться на ті що мають турбореактивні двигуни (ТРД) і турбогвинтові (ТВД).

Літаки з турбогвинтовими двигунами мають набагато меншу в порівнянні з реактивними витрати палива при малих швидкостях польоту.

З точки зору, відомчої приналежності транспортні літаки діляться на військові і літаки цивільної авіації.

На військових літаках встановлюється додаткове обладнання, пов'язане з виконанням бойових завдань (озброєння, спеціальне обладнання для парашутного десантування військ, техніки і вантажів, система заправки паливом в польоті). Типовим прикладом легкого турбогвинтового військово-транспортного літака є літак всесвітньо відомого українського конструктора Олега Костянтиновича Антонова – Ан-26, представлений на рисунку 1.1.

Легкий транспортний літак Ан-26 створений на базі літака Ан-24РТ і відрізняється від нього розширеною хвостовою частиною фюзеляжу з великим вантажним люком і герметично закривається рампою. Оригінальна конструкція стулки рампи, що зміщується під фюзеляж або опускається на землю, забезпечує швидке проведення вантажно-розвантажувальних робіт, перевезення великогабаритних вантажів і техніки, а також зручність при парашутному скиданні вантажів і людей. Вантажна кабіна літака Ан-26 має

систему кондиціювання повітря, що дозволяє перевозити людей на висоті до 6000 м.



Рисунок 1.1- Військово-транспортний літак Ан-26

В даний час Ан-26 широко використовується цивільними компаніями для комерційних перевезень по всьому світу. Завдяки великій ширині отвору вантажного люка (2,4 м) та установки спеціальної трап-стулки, можливе зручне навантаження, як із землі, так і з кузова автомобіля, що значно прискорює та полегшує вантажно-розвантажувальні роботи. У кабіну через вантажний люк можна завантажити різну техніку, у тому числі автомашини легкові та спеціального призначення.

Для виконання вантажно-розвантажувальних робіт літак має кран-балку вантажопідйомністю 1500 кг, встановлену над вантажним люком і транспортером-конвеєром вантажної кабіни. Транспортер приводиться в дію як електромотором, так і вручну. Хоча розвантаження літака Ан-26 може здійснюватися за допомогою транспортера та кран-балки, за неможливості здійснити посадку в пункті призначення вантаж може бути десантований з парашутом. Це надає можливість застосовувати літак для транспортування ліків та продуктів харчування до ізольованих населених пунктів, а також

надання гуманітарної допомоги та рятувальних робіт під час стихійного лиха.

Дальність польоту з максимальним навантаженням 5,5 тонни – 650 км. Максимальна дальність польоту порожнього літака із повністю заправленими паливними баками 2400 км. Середньогодинна витрата палива при експлуатації становить 913 кг, або 412 г на тонно-кілометр.

Ресурс двигунів АІ-24ВТ встановлених на літаку 15000 льотних годин та 30000 годин для фюзеляжу (з міжремонтним інтервалом 6000 годин).

Літак виконує зльоти та посадки з погано підготовлених злітно-посадкових смуг довжиною від 2000 м.

З 1968 по 1985 Київським авіазаводом побудовано близько 1410 літаків цього типу, з яких 415 літаків пішло на експорт до 27 зарубіжних країн.

Ан-26 характеризується хорошим оглядом з кабіни екіпажу, легкістю керування, простотою техніки пілотування, що дозволяє пілотувати його навіть льотчикам середньої кваліфікації. Високі злітно-посадкові якості і прохідність шасі, забезпечують цьому літаку невибагливість до злітно-посадкових майданчиків і дозволяють цілий рік експлуатувати його навіть на ґрунтових аеродромах.

Тактико-технічні характеристики літака Ан-26

Таблиця 1.1

Рік прийняття на озброєння	1968
Розмах крила, м	29,2
Довжина літака, м	23,8
Висота літака, м	8,58
Площа крила, кв.м	74,98
Маса, кг	
- порожнього літака;	15020
- нормальна злітна;	23000
- максимальна злітна	24000
Маса внутрішнього палива, кг	5500
Тип двигуна	
- основні;	2хТГВД Прогрес (Івченко) АІ-24ВТ;
- додатковий	1хТРД МНПК Союз (Туманський) РУ-19А-300

Потужність - основні; - додатковий	2 x 2820 к.с 7,85 кН (800 кгс)
Крейсерська швидкість, км/год	440
Практична дальність, км	2550
Дальність дії, км	1100
Практична стеія, м	7500
Екіпаж, чол	5
Корисне навантаження	40 десантників або 24 носилок з супроводом або 5500 кг вантажу

У загальному випадку авіаційні джерела живлення електричного струму турбогвинтового двигуна - система електропостачання, призначена для забезпечення бортового енергоукомплектування літального апарату електроенергією необхідної якості. Системою електропостачання прийнято називати сукупність пристроїв для виробництва і розподілу електроенергії. Для живлення бортового обладнання і систем ЛА в цей час застосовується електроенергія постійного струму напруженням 27 вольт, змінного однофазного або трифазного з нейтраллю струму з напруженням 208/115 вольт, частотою 400 Гц, змінного трифазного без нейтралі струму лінійним напруженням 36 вольт, 400 герц. Сумарна потужність генераторів на борту може складати від 20 кВт для невеликих літаків або вертольотів до 600 і більше за кВт для важких ЛА.

Розглянемо більш детально склад ДЖЕС ТВД на прикладі раніше згаданого літака Ан-26.

1.2. Загальний огляд джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна на прикладі легкого транспортного літака Ан-26

На Ан-26 встановлено два турбогвинтових двигуни АІ-24ВТ (рис. 1.2) зі злітною потужністю 2820 к.с. Двигуни розташовані в мотогондолах на центроплані. АІ-24ВТ оснащений десяти-ступеневим компресором і триступеневою турбіною. Камера згоряння кільцева із 8 форсунками.



Рисунок 1.2 – Турбогвинтовий двигун АІ-24ВТ

Електрообладнання двигуна забезпечує автоматичний запуск двигуна на землі і в польоті та живлення бортової електромережі літака постійним струмом напругою 28,5 В та змінним однофазним струмом 115 В, 400 Гц.

В якості основних джерел живлення постійного струму використовуються два стартер-генератора СТГ-18ТМО, в якості резервного джерела – генератор ГС-24Б.

Основними джерелами змінного однофазного струму 115 В, 400 Гц є два генератора Г016ПЧ8.

Стартер-генератор СТГ-18ТМО працює в комплекті з наступною апаратурою:

- комплексним апаратом ДМР-600Т;
- регулятором напруги РН-180;
- виносним опором ВС-25Б;
- автоматом захисту від перевантаження АЗП-8М.

Генератор ГС-24Б у свою чергу працює в комплекті з комплексним апаратом ДМР-600Т 2-ї серії, регулятором напруги РН-120У, виносним опором ВС-25Б та автоматом захисту від перенавантаження АЗП-8М.

1.2.1. Стартер-генератор СТГ-18ТМО

Стартер-генератор (зображений на рисунку 1.3) уявляє собою шестиполосну машину постійного струму, шунтового збудження, теплостійкого виконання і складається з корпусу, щитів, якоря і редуктора. Стартер-генератор використовується при роботі в стартерному режимі - для запуску двигунів, а при роботі в генераторному режимі - для живлення літакової бортової мережі. Напрямок обертання якоря стартер-генератора – лівий, якщо дивитися зі сторони привода. Виконання стартер-генератора – напівзакрите; в щитах є вікна для входу і виходу охолоджуючого повітря.



Рисунок 1.3 - Стартер-генератор СТГ-18ТМО

Стартер-генератор при роботі на літаку охолоджується навколишнім повітрям, що надходить через спеціальний отвір на капота і патрубок, розташований з боку заднього щита. Частина повітря проходить над якорем, обдуваючи колектор, залізо якоря та котушки полюсів, і виходить через вікна переднього щита. Решта повітря проходить через осьові канали всередині якоря і також виходить через вікна переднього щита. Для охолодження при роботі на землі стартер-генератор має вентилятор. Після закінчення запуску двигуна стартер-генератор переключається на генераторний режим роботи; обгінна муфта вимикає в цьому режимі роботи редуктор стартер-генератора.

Основні дані Стартер-генератор СТГ-18ТМО

У генераторному режимі:

напруга, В.....	8,5
струм, що віддається у мережу, А.....	600
потужність (при 30 В), кВт.....	18
режим роботи.....	тривалий

В стартерному режимі:

напруга живлення, В.....	30
навантажувальний момент, кг·м	16
швидкість обертання вихідного вала, об/хв.....	750
струм, що споживається А, не більше.....	600
Допустима вологість повітря при температурі плюс 20° С, %... До 95–98	
Діапазон робочих температур повітря, °С..... від плюс 100 до мінус 60	
Допустиме ударне навантаження ...4 g при частоті ударів від 60 до 100 за хв	

1.2.2. Регулятори напруги РН-180 і РН-120У

Вугільні регулятори РН-180 та РН-120У призначені для автоматичної підтримки в заданих межах напруги стартер-генераторів та генератора ГС-24Б при зміні їх швидкості обертання та навантаження у генераторному режимі. Одночасно регулятори підтримують рівномірне розподілення навантаження при паралельній роботі стартер-генераторів. Регулятор напруги є електромагнітним регулятором реостатного типу з плавною зміною опору вугільного стовпа. Основними частинами регулятора є власне регулятор, плита з амортизаторами, основа, штепсельний роз'єм, три опори та колодка з германієвим діодом.

Процес регулювання напруги протікає так: при підвищенні напруги генератора збільшується струм у робочій обмотці регулятора, що знаходиться під напругою генератора. Отже, збільшується сила електромагніту, за рахунок якої якір, долаючи опір пружини, починає притягатися до осердя.

Тиск на вугільний стовп, що послідовно включений з обмоткою збудження, зменшується, і опір його зростає, що призводить до зменшення струму у ланцюзі збудження генератора. Напруга генератора знижується до номінального значення. При зниженні напруги генератора процес регулювання відбувається у зворотному порядку.

Щоб зміна температури не впливала на роботу регулятора, він має обмотку температурної компенсації.

Для підвищення стійкості роботи регулятора в його схемі передбачені діоди та стабілізуючий опір, що сприяє зменшенню коливань напруги та їх згасання. Обмотка паралельної роботи забезпечує нормальну роботу генераторів, що паралельно працюють. Обмотки регуляторів, що працюють з паралельно включеними генераторами, з'єднуються назустріч один одному і служать для вирівнювання навантажень генераторів шляхом автоматичного коригування їх напруги. Величину напруги, яку підтримує регулятор, можна підрегулювати за допомогою виносних опорів, встановлених на щитку управління електроенергетикою.

Основні дані РН-120У

Нормальна регульована напруга, В.....	28,5
Максимальна потужність, розсіювана вугільним стовпом, Вт.....	120
режим роботи.....	тривалий
Діапазон підтримуваних напруг, В.....	26,3–30±0,2
Струм, що споживається робочою обмоткою регулятора, А, не більше.....	0,870
Рівень напруги генератора, що забезпечується виносним опором ВС-25Б, В. в межах ±1,5	
Маса, кг. не більше.....	2,0

1.2.3. Комплексний апарат ДМР-600Т другої серії

Комплексний апарат ДМР-600Т призначений для:

- автоматичного підключення генератора до мережі за правильної його полярності, коли напруга генератора перевищує напругу мережі на певну величину;
- відключення генератора від мережі за наявності певної величини зворотного струму;
- ручного дистанційного включення та відключення генератора;
- сигналізації відключення генератора

Комплексний апарат лівого стартера-генератора розташований у лівому ЦРУ, правого стартера-генератора – у правому ЦРУ, генератора ГС-24Б – в РК гондоли правого двигуна. Комплексний апарат ДМР-600Т випускається заводом-виробником у відрегульованому вигляді, тому в процесі експлуатації його регулювання не допускається.

Основні дані ДМР-600Т

Напруга живлення реле, В.....	25–30
Перевищення напруги генератора над напругою мережі, при якому спрацьовує диференціальне реле на включення, В.....	0,2–1
Зворотний струм відключення реле, А.....	25–50
Номинальний струм силового ланцюга, А.....	600
Маса, кг, не більше.....	2,5

1.2.4. Автомат захисту від перевантаження АЗП-8М

Автомат АЗП-8М служить для захисту мережі постійного струму від аварійного підвищення напруги у разі перезбудження будь-якого з паралельно працюючих генераторів постійного струму в системі з акумуляторними батареями. Автомати АЗП-8М встановлені на стелі вантажної кабіни. При зростанні напруги стартер-генератора більше 29-33 В через певний проміжок часу, що залежить від величини, напруги, спрацьовує реле уповільненої дії. Уповільнення спрацьовування реле забезпечується повітряним демпфером і застосовується з метою попередження спрацьовування АЗП при короткочасному збільшенні напруги, що не є аварійним. Після замикання контактів реле спрацьовує акумуляторне реле,

яке замикає ланцюг обмотки кнопкового контактора. Контактор спрацьовує і своїми контактами розриває ланцюг обмотки збудження генератора, а іншою парою контактів знеструмлює комплексний апарат ДМР-600Т. ДМР вимикає пошкоджений стартер-генератор від мережі.

При спрацьовуванні кнопкового контактора його шток піднімається. Для того щоб привести контакти у вихідне положення потрібно натиснути кнопку на кришці АЗП-8М.

1.2.5. Генератори ГС-24Б, ГО16ПЧ8

Генератор ГС-24Б призначений для живлення бортмережі під час підготовки літака до польоту та живлення стартер-генераторів під час запуску двигунів, а також використовується як джерело резервного живлення. Генератор уявляє собою шестиполосну електричну машину постійного струму с шунтовим збудженням.

Конструктивне виконання генератора – напівзакрите. Привід якоря здійснюється через торсіонний валик, який пом'якшує поштовхи на якір від динамічних навантажень. Наявність торсіонного валика полегшує стикування генератора з редуктором турбоустановки. У щитах є вікна для входу та виходу охолоджуючого повітря. Витрата охолоджуючого повітря – не менше 180 л/с при тиску повітря у вхідного патрубку 400 мм вод. ст.

Генератор ГС-24Б працює на допоміжному двигуні у двох режимах: стартерному та генераторному. Стартерний режим необхідний для розкручування двигуна турбогенератора під час запуску.

Основними джерелами електроенергії змінного струму 115, 400 Гц літаку є два генератори ГО16ПЧ8, встановлених по одному на кожному двигуні.

Генератори ГО16ПЧ8 разом з пускорегулюючою апаратурою (коробками включення та точного регулювання КВР-2, регуляторами напруги РН-600, автоматами захисту мережі від перенапруги АЗП-1–1СД, коробками відсікання за частотою КОЧ-1АН та виносними опорами ВС-33) забезпечення живлення змінним струмом стабільної напруги та частоти.

Виносний опір ВС-33 призначений для ручної зміни напруги на клеммах генератора в межах ± 10 В. Опір встановлений на щиток керування електроенергетикою.

1.2.6. Регулятор напруги РН-600, коробка включення та регулювання КВР-2

Вугільний регулятор напруги РН-600 призначений для автоматичної підтримки в заданих межах напруги генератора при зміні його навантаження та швидкості обертання в робочому діапазоні.

Агрегат є електромагнітним регулятором реостатного типу з плавною зміною опору вугільного стовпа.

Коробка КВР-2 спільно з регулятором напруги РН-600 призначена для включення та регулювання напруги генератора та захисту його від коротких замикань у мережі та втрати збудження.

Включення генератора після досягнення напруги 95 здійснюється спрацьовуванням реле.

Реле ЕМРВ-27Б служить для витримки часу у разі короткочасного (менше 6 с) зниження напруги (нижче 28) на клеммах генератора.

Магнітний підсилювач МУТ-1Т служить для регулювання струму в обмотці керуючої електромагніта вугільного регулятора пропорційно напрузі на генераторі.

1.2.7. Автомат захисту від перенапруги АЗП1-1СД, коробка відсікання за частотою

Автомат призначений для захисту мережі однофазного змінного струму від аварійного підвищення напруги. Автомати встановлені у вантажній кабіні на стелі між шпангоутами 23-

Коробка відсікання за частотою КОЧ-1АН призначена для захисту споживачів від живлення змінним струмом зниженої частоти. Коробки встановлені на стелі між шпангоутами 22-23.

Живлення схеми відсічення по частоті здійснюється через понижувальний трансформатор від генератора при подачі змінної напруги через клема 2-3 ШР коробки КОЧ-1АН.

Чутливим елементом, що сприймає зміну частоти змінного струму генератора, є дросель, індуктивний опір якого змінюється пропорційно до частоти. Виконавчим органом схеми є магнітний підсилювач, що працює в релейному режимі та впливає на спеціальне струмове реле.

Джерела живлення електричного струму турбогвинтового двигуна разом з регулюючою, захисною та контрольно-керуючою апаратурою спільно з системою передачі та розподілу електроенергії утворюють систему електропостачання (СЕР). Незалежно від призначення, всі літальні апарати (ЛА) мають досить схожу систему електропостачання. Споживачами електричної енергії літака є: освітлення, протипожежна система, машини постійного та змінного струму в паливних та гідравлічних системах, система протиобледеніння, радіобладнання, побутове обладнання.

Надійність СЕР ЛА є одним із основних факторів безпеки польоту.

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто призначення транспортного турбогвинтового літака і основні задачі, які виконує літак.
2. На прикладі легкого транспортного літака Ан-26 було зроблено огляд джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна і аналіз надійності основних елементів системи електропостачання (СЕР).

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ ВИДИ ВІДМОВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

2.1. Аналіз статистичних даних по відмовам

Розглядаючи накопичений достатньо достовірний статистичний матеріал, що стосується експлуатаційної надійності електричних машин можна впевнено сказати, що найбільше число відмов в машинах постійного струму припадає на щітково-колекторний вузол (ЩКВ) і на підшипники. Тому вирішальне значення для тривалої та стабільної роботи цього обладнання має своєчасна діагностика ступеня зносу щітково-колекторних та підшипникових вузлів, і також виявлення дефектів обмоток.

Аналіз, проведений для генераторів серій ГС і СТГ за 4 роки експлуатації на літаках АН-26, показав, що відмови вузлів цих генераторів складають: ЩКВ – 69,1...85,4 % (в основному через знос і руйнування колектора), підшипники – 10,8 % (в основному через руйнування), обмотки якоря (ОЯ) – 10,3 % (в основному через перегрів).

До характерних пошкоджень колектора відноситься зміна його форми через нерівномірність зносу, підгоряння і оплавлення пластин колектора при несприятливій комутації.

На зносостійкість і довговічність деталей підшипників впливають структурні особливості металу, хімічна комбінація матеріалу і змашування, корозія, теплові впливи, стан поверхневого шару і механічні навантаження на поверхні і в тілі кочення.

Пошкодження корпусної ізоляції хоча менш об'ємні, однак наслідки, як правило, більш важкі. В основному, це порушення ізоляції між провідниками секції; руйнування бандажів, що утримують обмотку якоря. Руйнування ізоляції відбувається у результаті нагріву, механічних впливів (вібрація, тиск, удари), впливу вологи, агресивних середовищ і т.п. Поступове руйнування ізоляції в експлуатаційних умовах або під час випробування у більшості випадків закінчується пробоем.

Перейдемо до розгляду методів діагностики вузлів найбільш схильних до виникнення відмов.

2.2 Аналіз методів діагностики і контролю щітково-колекторних вузлів

Як було зазначено вище найменш надійним вузлом, який і повинен підлягати першочерговому контролю, є ЩКВ. Зовнішнім проявом незадовільного перебігу процесу комутації служить іскріння в ковзному контакті. Прояв порушень комутації в іскрині традиційно сприймається як показник загального стану машин постійного струму. При цьому ступінь іскріння оцінюється відповідно до характеристик, наведених у таблиці 2.1 (ГОСТ 183-74), з якої видно, що ступінь іскріння оцінюється візуально (суб'єктивно), що зумовлює неоднозначність оцінки.

Оцінка ступеня іскріння у щітковому контакті машин постійного струму

Таблиця 2.1

Ступінь іскріння	Характеристика іскріння	Стан колектора і щіток
1	відсутність іскріння (темна комутація)	Відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках
1 ¹ / ₄	Слабке точечне іскріння під невеликою частиною щітки	Відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках
Г/2	Слабке іскріння під більшою частиною щітки	Поява на колекторі слідів почорніння, що легко усуваються протиранням його поверхні бензином, а також слідів нагару на щітках
2	Искріння під всією щіткою, допустиме тільки при короткочасних скачках навантаження і перевантаженні	Поява на колекторі слідів почорніння, що легко усуваються протиранням його поверхні бензином, а також слідів нагару на щітках
3	Значне іскріння під щіткою, наявність великих вилітаючих іскор. Допустиме тільки в момент прямого включення або реверсування двигуна	Значне почорніння колектора, що не усувається протиранням його поверхні бензином, а також підгар і руйнування щіток

Проведений аналіз існуючих методик контролю іскріння (методики, засновані на вимірюванні фотоструму, на виділенні радіоперешкод при іскринні, а також способі індикації іскріння за методом додаткової щітки) [2] показав недоліки, що перешкоджають їх масовому впровадженню:

- складність конструкції та низьку перешкодозахищеність реєструючої апаратури;

- складність монтажу датчиків іскріння на щітково-колекторному вузлі електричної машини, що потребує зміни конструкції обладнання;
- неможливість автоматизації процесу контролю іскріння при експлуатації, запису, зберіганні та використанні інформації про іскріння при керуванні технічним станом генератора.

Проте оцінці ступеня іскріння можливий підхід, заснований на твердженні, що будь-які порушення у роботі авіаційних стартер-генераторів (СТГ) впливають параметри пульсацій напруги їх зовнішньої мережі [3]. Оскільки ці пульсації носять циклічний характер, доцільно як діагностичних ознак використовувати параметри спектра сигналу напруги [4]. Аналіз неідентичності комутаційних циклів дає можливість вважати, що спектри таких сигналів мало відрізняються один від одного, а спектр, отриманий в результаті усереднення вибірки реалізацій, можна використовувати для діагностики СТГ [5].

Основними завданнями діагностики СТГ є виявлення:

- несиметрії магнітного поля збудження, у тому числі з урахуванням поля реакції якоря та компенсуючого поля додаткових полюсів, через нерівномірність повітряних зазорів та електричної несиметрії обмоток основних та додаткових полюсів;
- електричної несиметрії обмоток якоря, у тому числі короткозамкнених витків, та обривів в обмотці та зрівняльних з'єднаннях;
- обривів електричних з'єднань між обмотками якоря та пластинами колектора;
- дефектів щітково-колекторного вузла, у тому числі нерівномірного зносу пластин та щіток, замикання пластин колектора.

Зношування щіток, їх слабкий притиск, заїдання в обоймі, а також биття колектора і підгорання його пластин найчастіше призводять до порушень процесу комутації переважно однієї зі щіток з однією або групою пластин. Відсутність контакту щітки з однією або декількома колекторними пластинами веде до перерозподілу струму в обмотці якоря. При цьому

магнітне поле стає несиметричним, що обумовлює модуляцію вихідної напруги з частотами, кратними частоті обертання якоря.

На частоті обертання і кратних їй частотах також виявляються дефекти обмотки якоря (обриви секцій, виткові замикання), що обумовлюють додаткові пульсації напруги кілька разів за оборот.

Сколи щіток зумовлюють порушення комутації при кожному перемиканні секцій обмотки якоря з однієї паралельної гілки до іншої, що призводить до модуляції вихідної напруги з частотами, кратними частоті комутації.

При порушенні геометрії установки щіток провідники комутуваних секцій виявляються під впливом спотвореного магнітного поля головних полюсів. У цих секціях, крім реактивної ЕРС, індукується ще ЕРС обертання, що може призвести до погіршення комутації при кожному перемиканні струму якоря.

Нерівномірне зношування колектора призводить до модуляції вихідної напруги на проміжних частотах (діапазон частот між частотою обертання якоря і частотою комутації). При цьому розмір частотного діапазону залежить від характеру зносу колектора.

Таким чином, практично всі експлуатаційні несправності СТГ (крім нерівномірного зносу колектора) виявляються на двох частотах спектра напруги зовнішнього ланцюга: частоті обертання та частоті комутації.

Вочевидь, що з розвитку певного дефекту спостерігається зростання амплітуди характерної гармоніки. Отже, є можливість оцінки технічного стану СТГ з амплітуд характерних гармонік різницевого спектра напруги зовнішнього ланцюга. Умовою такої діагностики є необхідність урахування режимів роботи генератора. Так, еталонні значення діагностичних параметрів залежать від частоти обертання якоря n .

На рисунку 2.1 дано різниця в спектрі, що є результатом віднімання з поточного спектра напруги авіаційного стартер-генератора ГСР-СТ-12/40Д еталонного спектра (справна електрична машина). На рисунку позначені

амплітуди гармонік іскріння для різних частот обертання якоря (1 - $n = 4500$ об/хв; 2 - 6000; 3 - 9000 об/хв).

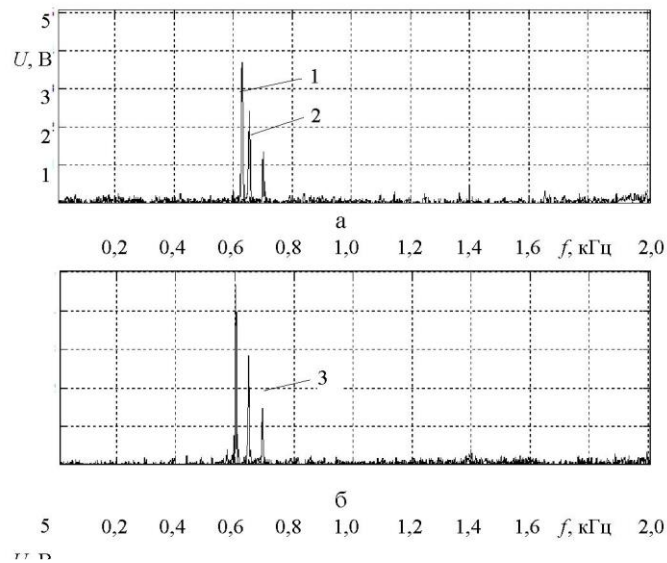


Рисунок 2.1- Вплив режимів роботи стартер-генератора на значення діагностичного параметра: а) - іскріння при сколі однієї щітки; б) - іскріння при сколі чотирьох щіток. [5]

Більшість діагностичних алгоритмів, заснованих на спектральному аналізі відповідних сигналів, вимагає наявності значного обсягу статистичної інформації для формування навчальної вибірки. У цьому суб'єктивність оцінки ступеня іскріння практично не дозволяє отримати конкретні еталонні значення діагностичних параметрів. Крім того, великі похибки вимірювання амплітуд гармонік, зумовлені нестабільністю параметрів СТГ, призводять до того, що вихідні дані для аналізу становлять нерепрезентативні вибірки.

Описаних вище недоліків позбавлені методики, засновані на використанні теорії нечіткої логіки. Нечіткі системи засновані на правилах, що дозволяють наблизитися до стилю мислення людини та використовують лінгвістичні змінні. Для побудови нечіткої діагностичної моделі СТГ пропонується використовувати лінгвістичну змінну «ступінь іскріння».

Безліч її значень $D = \{D_i\} (i = \overline{1, 5})$ відповідає ступеню іскріння $S = \left\{ 1, 1\frac{1}{4}, 1\frac{1}{2}, 2, 3 \right\}$ (i - Клас комутації).

Нехай кожне i -е значення лінгвістичної змінної являє собою перетин нечітких підмножин $D_i = A_i \cap B_i \cap C_i$, визначених на трьох базових шкалах (X, Y, Z):

$$\left. \begin{aligned} D_i(s, \mu_{D_i}(s)), & \quad s \in S; \\ A_i(x, \mu_{A_i}(x)), & \quad x \in X; \\ B_i(y, \mu_{B_i}(y)), & \quad y \in Y; \\ C_i(z, \mu_{C_i}(z)), & \quad z \in Z, \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

де X, Y, Z - множини значень амплітуд гармонік іскріння при частотах обертання якоря: $n1 = 4500$ об/хв; $n2 = 6000$ об/хв; $n3 = 9000$ об/хв відповідно; A_i, B_i, C_i , - безлічі значень амплітуд гармоніки іскріння, відповідних i -му класу комутації (i -му значенню лінгвістичної змінної) при частотах: $n1 = 4500$ об / хв; $n2 = 6000$ об/хв; $n3 = 9000$ об/хв; $\mu_{D_i}(s), \mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y), \mu_{C_i}(z)$ - функції приналежності базових змінних x, y, z - нечітким множинам D_i, A_i, B_i, C_i .

Механізм нечіткого логічного висновку заснований на базі знань, що формується у вигляді сукупності нечітких продукційних правил Π_i [6]:

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 : & \text{if } x \in A_1 \cap y \in B_1 \cap z \in C_1 \Rightarrow s \in D_1; \\ \Pi_2 : & \text{if } x \in A_2 \cap y \in B_2 \cap z \in C_2 \Rightarrow s \in D_2; \\ \Pi_3 : & \text{if } x \in A_3 \cap y \in B_3 \cap z \in C_3 \Rightarrow s \in D_3; \\ \Pi_4 : & \text{if } x \in A_4 \cap y \in B_4 \cap z \in C_4 \Rightarrow s \in D_4; \\ \Pi_5 : & \text{if } x \in A_5 \cap y \in B_5 \cap z \in C_5 \Rightarrow s \in D_5. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Правила, що пов'язують значення вхідних D_i і вихідних A_i, B_i, C_i , лінгвістичних змінних, можна знайти з досвіду експлуатації та теорії функціонування систем. Так, якщо значення всіх діагностичних параметрів близькі до еталонних, то існує високий рівень упевненості в справності системи.

Алгоритм отримання логічного висновку має чотири етапи.

Перший етап уявляє собою введення нечіткості для вихідної інформації. При цьому для конкретних вихідних значень амплітуд гармоніки на частоті комутації при різних обертах якоря СТГ були розраховані приналежності к окремим значенням лінгвістичної змінної ступінь іскріння. Для цього було проведено моделювання процесів переключення струму в секціях якорів електричних машин, що перебувають в різних технічних станах.

На основі розробленої моделі з використанням класичної теорії комутації отримано вираз залежності амплітуди гармоніки на частоті комутації u_k від інтенсивності іскріння P і обертів якоря n :

$$u_k = 2\tau n \omega_c l_\delta \left(\sqrt{\frac{2ar l_{III} P}{b\tau n L_c \beta_k}} + \left(\frac{\xi N b}{\pi D_a} + \frac{K_a}{\beta_k} \right) i_a \right), \quad (2.3)$$

де b – число пар полюсів; τ – протяжність полюсного поділу; n – частота обертів якоря; L_c – індуктивність короткозамкненої секції; a – число паралельних гілок обмоток якоря; r – опір секції; ω_c – число вітків у секції; l_δ – довжина активної частини поділки обмотки якоря; ξ – питома магнітна провідність шляхів для магнітних потоків взаємоіндукції; N – кількість активних провідників, що складають обмотку якоря; D_a – діаметр якоря; K_a – емпіричний коефіцієнт, що враховує зміну опору ковзаючого контакту в процесі комутації; i_a – струм якоря.

Для обраного в якості об'єкта дослідження авіаційного стартер-генератора на основі рівняння (2.3) враховуючи (2.1) і (2.2) отримані функції приналежності $\mu_{A1}(x)$, $\mu_{B1}(y)$, $\mu_{C1}(z)$ для ступенів іскріння $1; 1\frac{1}{4}; 1\frac{1}{2}; 2; 3$.

Графіки деяких функцій приналежності ($\mu_{A1}(x)$, $\mu_{B1}(y)$, $\mu_{C1}(z)$) зображені на рисунку 2.2

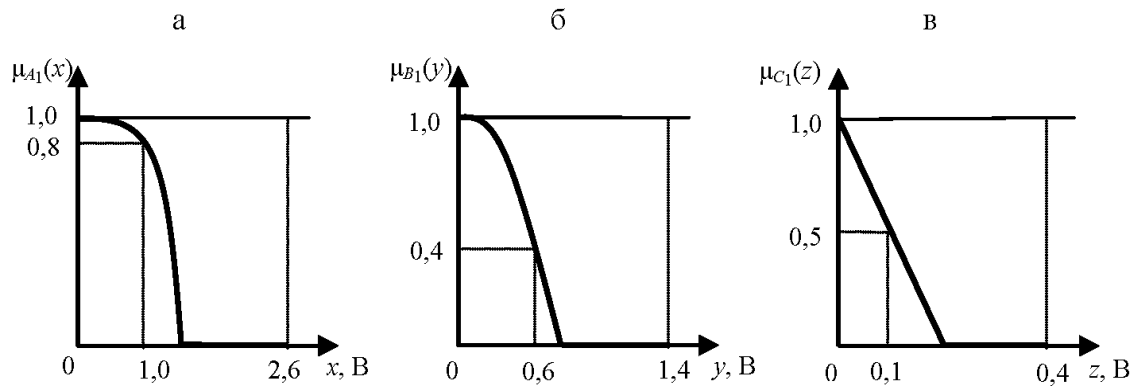


Рисунок 2.2 – Функції приналежності для ступеня іскріння 1

За допомогою цих функцій на основі чітких значень вхідних базових змінних, що задаються ($x = 1\text{В}$; $y = 0,6\text{ В}$; $z = 0,1\text{ В}$) визначається ступінь впевненості в тому, що вихідна лінгвістична змінна (D ступінь іскріння) приймає конкретне значення ($D_i = D_1 = 1$). Характер розглянутих функцій приналежності для ступеня іскріння 1 показує тенденцію к підвищенню класа комутації при збільшенні значень вхідних базових змінних. Залежність значень вихідної лінгвістичної змінної від значень вхідних базових змінних будувалась за аналогією з залежністю значень діагностичних ознак від інтенсивності іскріння P (2.3).

Другий етап логічного висновку уявляє собою знаходження передумов зміни вихідних функції приналежності, що створюється кожним окремим правилом $\alpha(i)$ при конкретних вхідних сигналах x_0, y_0, z_0 , тобто значеннях діагностичних параметрів при заданих обертах якоря:

$$\alpha(i) = \mu_{A_i}(x_0) \cap \mu_{B_i}(y_0) \cap \mu_{C_i}(z_0). \quad (2.4)$$

Результуючі функції приналежності кожного правила обчислимо за наступною формулою:

$$\mu_i(s) = \alpha(i) \cap \mu_{D1}(s). \quad (2.5)$$

Третій етап логічного висновку уявляє собою знаходження результуючої функції приналежності всієї сукупності правил при заданих вхідних сигналах x_0, y_0, z_0 :

$$\mu_{\Sigma}(s) = \mu_1(s) \cap \mu_2(s) \cap \mu_3(s) \cap \mu_4(s) \cap \mu_5(s). \quad (2.6)$$

Найголовніший четвертий етап логічного висновку уявляє собою визначення значення ступіня іскріння. Вихідна функція приналежності при цьому перетворюється в конкретне визначене число s_0 у відповідності з рівнянням:

$$s_0 = \frac{\int_D s \mu_\Sigma(s) ds}{\int_D \mu_\Sigma(s) ds} \quad (2.7)$$

На рисунку 2.3 зображена схема нечіткого висновку за алгоритмом Мамдани при моделюванні другого етапу мінімумом за п'ять етапів (рисунок 2.3 а-д), агрегації середнього значення (e) і побудови нечіткого значення виходу $\mu_\Sigma(s)$ за результатами попередніх етапів у відповідності до (2.6). Обчислений у відповідності до (2.7) центр ваги фігури (рисунок 2.3 е) $s_0 \approx 1\frac{1}{3}$ уявляє собою отримане при вхідних сигналах $x_0 = 1$ В; $y_0 = 0,6$ В; $z_0 = 0,1$ В чітке значення базової змінної, а саме ступеня іскріння.

Прогнозування зміни технічного стану СТГ засноване на оцінці ступеня відхилення центра ваги s_0 фігури (рисунок 2.3 е), що є функцією приналежності $\mu_\Sigma(s)$, від найближчого значення класу комутації. Ця важлива властивість функції приналежності дозволяє здійснювати зміну режимів технічного обслуговування СТГ виходячи з того потрібно виконувати дані роботи чи ні.

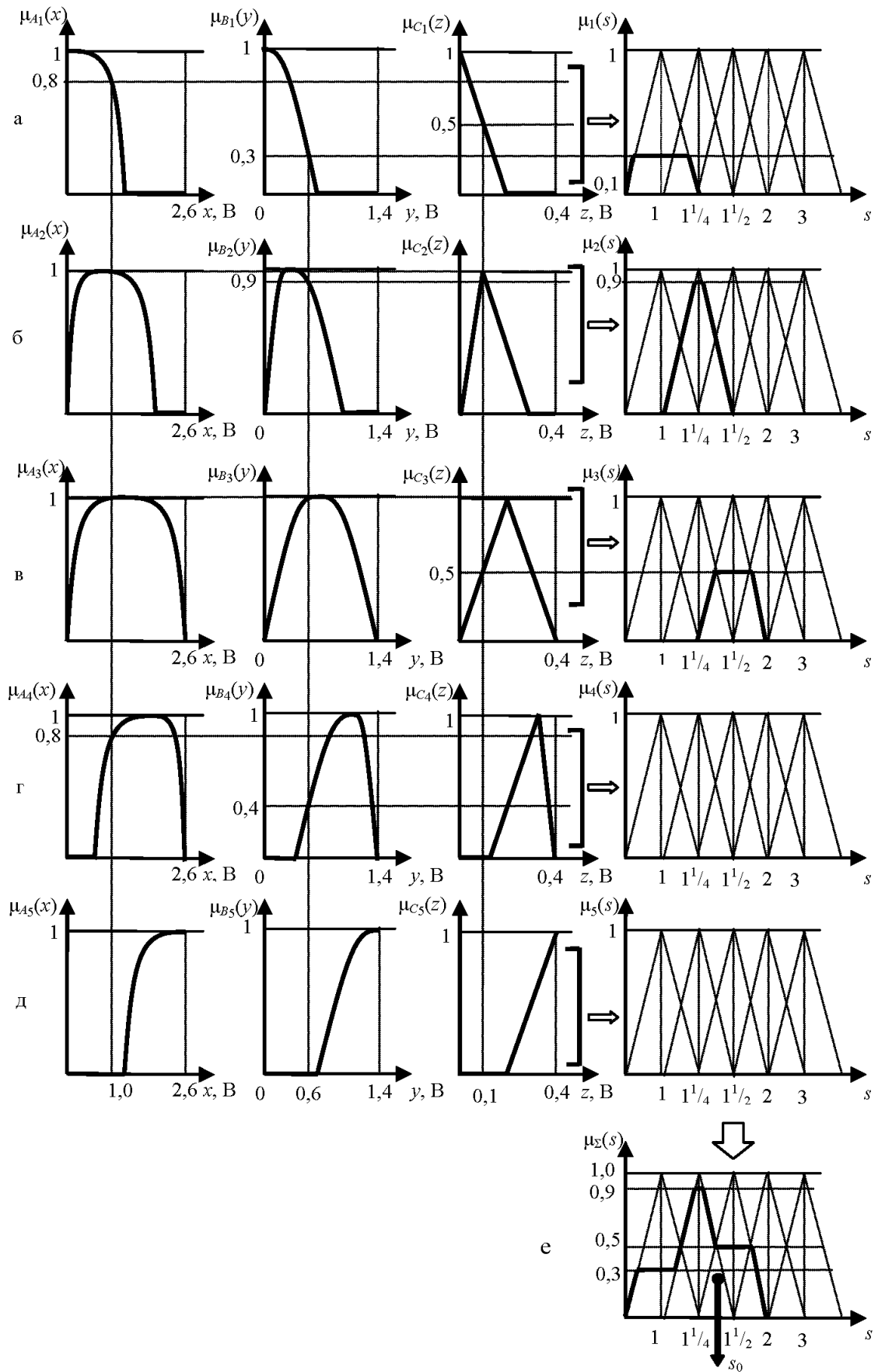


Рисунок 2.3 – Знаходження конкретного значення ступеня іскріння

Зазначений вище метод діагностики отримав назву діагностики стартер-генераторів постійного струму з використанням теорії нечіткої логіки. Він дозволяє оцінювати і прогнозувати технічний стан СТГ шляхом накопичення усєї інформації, яка є в наявності використовуючи при цьому досвід персонала.

2.3. Аналіз методів діагностики і контролю стану підшипників

Для підвищення експлуатаційної надійності та терміну служби електричних машин (ЕМ) необхідне своєчасне виявлення (діагностика) дефектів ще до виникнення аварійної ситуації. Це значно знизить час та вартість ремонту. Вироблення підшипника ЕМ є дефектом, що найбільш часто виникає в практиці експлуатації асинхронних двигунів. Даний дефект призводить до нерівномірності повітряного зазору, а оскільки в електричній машині повітряний зазор відносно малий, то виникає ексцентриситет ротора, що призводить до підсилення вібрацій і прискорює подальше спрацювання підшипників.

Відомо, що в результаті появи значного ексцентриситету ротора погіршуються показники ЕМ. Коефіцієнт корисної дії електричної машини при цьому знижується до 3 %, максимальний та пусковий моменти зменшуються у межах 20 і 8 % відповідно, ковзання збільшується на 10 % [6]. У найбільш важких випадках можливе торкання ротора за внутрішню поверхню статора, що в свою чергу призводить до додаткового нагрівання в місці торкання та механічних пошкоджень поверхні ротора і статора. Пошкодження, що виникають при цьому, потребують проведення тривалого відновлювального ремонту ЕМ. Витрати в цьому випадку близькі до вартості нової машини.

До числа найбільш відомих методів контролю нерівномірності повітряного зазору в даний час можна віднести вібраційні методи [1, 2, 3], метод контролю за величиною синхронного індуктивного опору [4], а

також метод контролю за величинами індуктивного опору короткого замикання та нульової послідовності [5]. До недоліків останніх вказаних методів слід віднести:

- вимогу відключення ЕМ від мережі живлення з попередньою підготовкою робо-чого місця;
- необхідність використання зовнішніх джерел постійного чи змінного струмів;
- значний час проведення діагностичного випробовування (до 3...4 год).

Тому ці методи не знайшли широкого застосування в промисловості. Таким чином, задача створення більш ефективного методу контролю зношення підшипників залишається актуальною. У даній роботі авторами пропонується спосіб діагностики, який виключає вказані недоліки і простий у використанні.

Спосіб ґрунтується на такому фізичному явищі. При виробленні підшипника відбувається коливання ротора, що обумовлює нерівномірність повітряного зазору при роботі машини. Ця нерівномірність носить складний характер, який визначається видом дефекту (вироблення одного чи двох підшипників, нерівномірність вироблення підшипника і обумовлюється цілим рядом факторів: дією інших сил, зокрема, відцентрових. Це є предметом окремого дослідження.

Було проведено дослідження способу визначення дефектів підшипника, який ґрунтується на появі при дефекті підшипника несиметрії магнітного поля в повітряному зазорі. При виробленні підшипника магнітне поле в зазорі по колу змінюється. Якщо у повітряному зазорі встановити датчики магнітної індукції, зміщені в просторі по колу на деякий кут, то при дефектах підшипника, що призводять до появи ексцентриситету, показання цих датчиків будуть відрізнятися за діючими та миттєвими значеннями індукції, які вимірюються в один і той же момент часу. Для дослідження даного способу було створено фізичний стенд на базі асинхронного двигуна.

На гладкій торцевій частині статора (близько до ротора) в горизонтальному і вертикальному напрямках було встановлено чотири

датчики магнітного поля у вигляді індуктивних котушок. Значний досвід роботи з цими датчиками підтверджує надійність їх показань.

Методику ідентифікації вироблення підшипника ЕМ було апробовано в лабораторії інституту електродинаміки НАН України на основі експериментальних досліджень на АД з короткозамкненим ротором А62 - 12/8/6 з такими характеристиками: $P_{\text{н}}=1,7$ кВт, $f = 50$ Гц, $U_{\text{н}} = 380$ В, $2p = 12$, $I_{\text{н}} = 6,2$ А, $\eta = 63$ %, $n = 460$ об / хв, $\cos \varphi = 0,66$, $M_{\text{н}} = 45$ Н·м, $m = 3$.

Вироблення підшипника моделювалося за допомогою двох спеціальних мідних прокладок (кожна товщиною 0,2 мм), які в нормальному стані були розміщені по колу в отворі між підшипником та підшипниковим щитом. При їх видаленні формувався вказаний дефект, що моделювався на одному з підшипників.

Під час проведення експериментальних досліджень з використанням шістнадцятиканального пристрою реєстрації параметрів режиму з чотирнадцятирозрядним АЦП (аналого- цифровий перетворювач) типу Е14-440 проводилося цифрове осцилографування магнітної індукції у повітряному зазорі. Дослідження проводилося за таких умов:

- амплітуда напруги живлення постійна, $U = \text{const}$;
- запис даних для усіх датчиків проводився з запізненням у часі, яке на декілька порядків менше за період;
- частота напруги живлення постійна, $f_c = \text{const}$;
- статичний момент постійний, $M_c = \text{const}$.

Реєстрація даних проводилася для таких варіантів: 1 – без дефектів, 2 – відсутня одна мідна прокладка, 3 – відсутні дві мідні прокладки. Було набрано необхідну кількість даних для проведення теоретичних узагальнень.

Результати експериментів показали, що при наявності дефекту підшипника магнітне поле в зазорі машини, як і поле, витиснене із зазору на торці машини, тобто в місці установки датчиків, змінюється. Величина магнітної індукції у двох протилежних датчиках у зв'язку з горизонтальним

положенням машини та симетричним виробленням підшипника істотно змінюється. Зверху індукція магнітного поля буде збільшуватись, а знизу – зменшуватись.

У таблиці 2.2 наведено амплітудні величини магнітної індукції, що знімаються з датчиків. Дані підтверджують висновок щодо зміни поля по колу при виробленні підшипника.

Таблиця 2.2

Ступінь дефекту АД	Амплітудні значення магнітної індукції			
	Верхній датчик В δ 1	Нижній датчик В δ 2	Лівий датчик В δ 3	Правий датчик В δ 4
Умовно справний	8,76	8,6	8,5	7,1
Відсутня одна мідна прокладка	10,2	7,9	9,4	7,87
Відсутні дві мідні прокладки	10,95	7,2	9,4	7,87

Для підвищення чутливості діагностичного параметра необхідно знайти коефіцієнти співвідношення амплітудних значень магнітної індукції протилежних датчиків. Отримані дані наведено в таблиці 2.3

Таблиця 2.3

Ступінь дефекту АД	Коефіцієнт співвідношення амплітудних значень магнітної індукції	
	В δ 1/ В δ 2	В δ 3/ В δ 4
Умовно справний	1,01	1,19
Відсутня одна мідна прокладка	1,3	1,19
Відсутні дві мідні прокладки	1,52	1,19

Аналізуючи наведені в таблиці 2.3 дані, бачимо, що при збільшенні ступеня дефекту підшипника зростає коефіцієнт співвідношення амплітудних значень магнітної індукції, що дає можливість раннього виявлення даного дефекту. Магнітна індукція знизу змінюється прямо пропорційно зміні повітряного зазору за рахунок вироблення підшипника. У таблиці 2.4

наведено миттєві значення індукції магнітного поля в один із моментів часу. Ці дані чітко підтверджують висновки зроблені раніше.

Таблиця 2.4

Ступінь дефекту АД	Миттєві значення магнітної індукції			
	Верхній датчик В δ 1	Нижній датчик В δ 2	Лівий датчик В δ 3	Правий датчик В δ 4
Умовно справний	7	6,88	6,8	5,68
Відсутня одна мідна прокладка	8,16	6,32	7,52	6,3
Відсутні дві мідні прокладки	8,76	5,76	7,52	6,3

В таблиці 2.5 наведено діючі значення магнітної індукції в місцях встановлення по вертикальній осі двох датчиків залежно від ступеня вироблення підшипника. Ці дані є базою знань для використання в системі діагностування електричних машин.

Таблиця 2.5

Ступінь дефекту АД	Діючі значення магнітної індукції	
	Верхній датчик В δ 1	Нижній датчик В δ 2
Умовно справний	4,6	4,47
Відсутня одна мідна прокладка	5,3	4,1
Відсутні дві мідні прокладки	5,7	3,74

Таким чином, розглянутий метод діагностики електричних машин є достатньо ефективним для практичного застосування з високою ступінню достовірності діагностування. Спосіб є економічним при реалізації та дає можливість діагностування стану підшипників під час роботи електричної машини без відключення її від мережі живлення. Застосування даного способу дає можливість суттєво підвищити достовірність діагностування електричних машин.

2.4. Аналіз методів діагностики ізоляції

Незважаючи на велику кількість методів контролю стану обмоток статора електродвигунів, питання вдосконалення і розробки діагностичного обладнання з високим ступенем достовірності, що відповідає сучасним експлуатаційним вимогам, продовжує залишатися актуальним.

Наявні методи діагностики часто враховують тільки граничний або допустимий стан параметрів обмотки, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку. Особливо це стосується пошкоджень, що важко діагностуються та вимагають проведення подальших досліджень, якими є міжвиткові замикання в фазі обмотки статора.

Трифазні асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором є одними з найпоширеніших електричних машин, що використовуються для приводів різноманітних механізмів у всіх сучасних галузях. Найбільш ефективно використання АД стримує їх висока пошкоджуваність, зниження якої залежить від сучасного рівня і достовірності результатів діагностики. Своєчасне і точне виявлення несправностей сприяє підвищенню надійності електричних двигунів, скорочує терміни ремонту і зменшує непередбачені витрати у разі аварійних відмов.

Переважаючими причинами виходу з ладу АД є пошкодження обмотки статора, які відповідно до наявної зарубіжної та вітчизняної статистики складають 70...78 % всіх відмов двигуна. Згідно з статистичними даними, особливо пошкоджуваним елементом асинхронних двигунів є обмотка статора де міжвиткові замикання мають за різними даними 33,6...40 % всіх відмов статора і відносяться до дефектів, що важко виявляються та диференціюються [1]—[3].

Наявність міжвиткового замикання призводить до того, що в процесі експлуатації АД в пошкодженій секції котушки протікає підвищений струм, який викликає істотний нагрів як в самому замкнутому витку, так і в поруч розташованих витках, що тягне за собою погіршення властивостей ізоляції

проводів, передчасне старіння і руйнування, і, як наслідок, супроводжується новим пробоем ізоляції в сусідніх витках статора. Результатом цього процесу є відмова фазної обмотки і вихід двигуна з робочого стану. Розробка нових та вдосконалення існуючих методів діагностики обмоток статора асинхронних двигунів із застосуванням сучасних підходів є актуальним сучасним завданням.

В сучасних системах і методах діагностики асинхронних двигунів з організації встановлення пошкоджень, використовується тестовий контроль або функціональний. До методів тестового контролю відносяться методи, оснований на вимірювання або розрахування електричних та неелектричних величин: опору ізоляції, струмів виток, внутрішнього опору обмоток, тангенсу кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$, постійної часу релаксації, температури обмоток, ємності, коефіцієнта діелектричної абсорбції, величини індексу поляризації, коефіцієнту діелектричного розряду і ін. Тестове діагностування наразі є основним видом виявлення дефектів електродвигунів, що використовуються у вітчизняній промисловості [9], [10]. Функціональна діагностика електричних двигунів оснований на спектральному аналізі вібрацій, фазних струмів і напруг, що вимірюються в стаціонарних режимах роботи двигуна. Методи функціональної діагностики є перспективнішими для виявлення дефектів обмотки статора на початкових стадіях і найекономічнішими, оскільки не вимагають тимчасового виведення електродвигуна з експлуатації. Крім того, методи функціонального контролю стану електродвигунів, в своїй більшості, застосовні для створення автоматизованих діагностичних систем з дистанційним управлінням.

З огляду на перспективність функціональних методів діагностування існує необхідність проведення подальших досліджень щодо їх вдосконалення та впровадження із застосуванням сучасних підходів з використанням математичного моделювання [11], [12].

Наявність електричних і механічних несправностей призводить до змін магнітного потоку (амплітудної модуляції) в повітряному зазорі

електричної машини, що дає можливість виявити гармоніки струму, характерні для несправностей устаткування. Гармоніки в спектрі струму, які відповідають різним видам несправностей, відрізняються один від одного.

З утворенням міжвиткового замикання в одній з фаз статора створюється несиметричне обертове магнітне поле. Несиметрія зумовлена не тільки зменшенням активного й індуктивного опору однієї з пошкоджених фазних обмоток, а й значною зміною взаємної індуктивності між обмотками. Несиметричності, зумовлені виниклими дефектами, змінюють характер зовнішнього магнітного поля, викликаючи спектр просторових гармонік індукції і створюють появу вібрації, що зумовлена пульсаціями моменту і струму.

Серед існуючих методів функціональної діагностики обмоток статора найширше використовується метод вібродіагностики, заснований на вимірюванні та аналізі спектральних характеристик вібрації. Вібродіагностика дозволяє з достатньою достовірністю визначати дефекти підшипникового вузла, ексцентриситету і значно меншою мірою — дефекти обмотки статора [3], [13].

Останнім часом особливо широко розвиваються методи діагностики стану асинхронних двигунів, основані на контролі споживаного струму з подальшим виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу. Це дозволяє з високим ступенем достовірності визначати стан різних елементів двигуна. Наявність в спектрі струму двигуна характерних частот певної величини свідчить про наявність пошкоджень електричної або механічної частини електродвигуна і пов'язаного з ним механічного пристрою. Струми статора несуть в собі інформацію про міжвиткові замикання обмоток, обриви стрижнів, неспіввісність, статичний або динамічний ексцентриситет та ін. Механічні пошкодження, такі як руйнування підшипників, також можуть бути виявлені за спектром струму [14]—[16].

Проведення моніторингу струму двигуна може бути проведено як безпосередньо на коробці виводів, без зупинки двигуна, так і на щиті управління подачі живлення. В порівнянні з іншими способами, метод спектрального аналізу струму має низку переваг і найбільшою мірою відповідає критеріям точності і ефективності діагностики стану електродвигунів. Разом з тим, метод спектрального аналізу потребує доопрацювання для усунення низки наявних недоліків. Основним недоліком спектрального аналізу струму асинхронного двигуна є складність оцінки та інтерпретації отриманих результатів. Будь-яка частота f амплітудно-модульованого сигналу з виникненням дефекту, враховується в спектрі двічі, по обидва боки частоти напруги живлення f_l , тобто у вигляді $|f_l - f|$ і у вигляді $|f_l + f|$. Такий подвійний облік модульовальної частоти знижує точність діагностування оскільки ймовірність накладання частот від різних пошкоджень зростає вдвічі. [15], [16].

Для виключення накладання частот від різних пошкоджень і, як наслідок, спотворення картини реального стану двигуна використовується метод аналізу спектрів векторів Парка струму і напруги. Основна відмінність від простого спектрального аналізу сигналів струму, при формуванні спектрів модуля вектора Парка полягає в тому, що будь-яка характерна частота амплітудно-модульованого сигналу враховується в спектрі вектора Парка тільки один раз. Гармоніки в спектрі струму, які відповідають різним видам несправностей, відрізняються один від одного. Таким чином, виявлення в спектрі струму характерних гармонік достовірно і однозначно свідчить про наявність електричних або механічних несправностей в електродвигуні або в пристрої, що приводиться ним у дію [3], [17].

Виконувати оцінку стану і вигляду пошкоджень обмотки статора, як і деяких інших несправностей в асинхронному двигуні, з високою точністю можна за спотворенням годографа вектора Парка струму. Для визначення вектора Парка струму (I_x, I_y) необхідне вимірювання струмів (I_a, I_b, I_c) у всіх

трьох фазах статора, а для побудови годографа використовувати такі співвідношення [17]:

$$I_{1X} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_A - \sqrt{\frac{1}{6}} \times I_B - \sqrt{\frac{1}{6}} \times I_C; \quad (2.8)$$

$$I_Y = \sqrt{\frac{1}{2}} \times I_B - \sqrt{\frac{1}{2}} \times I_C. \quad (2.9)$$

Кінець вектора Парка для двигуна описує фігуру з центром на початку координат

$$\bar{I} = I_X + J - I_Y. \quad (2.10)$$

Аналіз змін параметрів двигуна, викликаних міжвитковим замиканням в обмотці статора доцільно проводити з використанням сучасних методів імітаційного моделювання. Сучасні моделі для вивчення властивостей асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором розглянуті в роботах [18]—[21]. Для проведення досліджень з діагностики міжвиткових замикань в обмотці статора використовувалася математична модель асинхронного двигуна, наведена в роботі [18] і реалізована в програмному пакеті MATLAB зі встановленням адекватності реальному процесу відповідно до параметрів та характеристик базового двигуна. За базову модель для проведення досліджень взято асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором серії АІР132М4 потужністю 11,0 кВт, паспортні дані якого наведені в таблиці 2.6.

Паспортні дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Таблиця 2.6

Параметр	Значення
Номінальна потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	11,0
Номінальна фазна напруга $U_{\text{ном}}$, В	220
Частота мережі f , Гц	50
Частота обертання в режимі холостого ходу (близько) n_0 , об/хв	1500
Частота обертання при номінальному навантаженні $n_{\text{ном}}$, об/хв	1450

Параметр	Значення
Момент холостого ходу M_0 , Нм	0,38
Момент при номінальному режимі $M_{ном}$, Нм	72,671
Струм холостого ходу I_0 , А	9,44
Амплітуда струму холостого ходу I_m , А	13,35
Активний опір обмотки статора r_1 , Ом	0,5
Реактивний опір обмотки статора x'_1 , Ом	0,56
Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора r'_2 , Ом	0,36

Для неушкодженого статора в режимі холостого ходу, а потім в номінальному режимі із застосуванням моделювання для досліджуваного двигуна визначені значення діючих струмів фаз статора, кутів відставання фазних струмів статора від напруг, діючих значень струмів фаз ротора, кутів відставання фазних струмів ротора від напруг статора. Моделювання також проведене для визначення аналогічних параметрів у разі зменшення комплексного опору фази А на 10% і на 20 %, що імітує міжвиткове замикання різних за величиною ділянок пошкодження обмотки статора. Результати моделювання наведені в таблиці 2.7

Результати моделювання роботи асинхронного двигуна за неушкодженого статора і за наявності міжвиткового замикання зі зміною комплексного опору фази обмотки.

Таблиця 2.7

Параметр	Холостий хід			Номінальний режим		
	Неушкоджений статор	Комплексний опір		Неушкоджений статор	Комплексний опір	
		90 %	80 %		90 %	80 %
Частота обертання, n об/хв	1500	1500	1500	1451,2	1451,2	1451,2
Діючий струм фази А статора I_{1A} , А	9,399	9,554	9,714	21,612	21,905	22,207
Діючий струм фази В статора I_{1B} , А	9,399	9,296	9,19	21,612	21,323	21,027
Діючий струм фази С статора I_{1C} , А	9,399	9,373	9,349	21,612	21,5	21,324
Кут відставання струму від напруги в фазі А статора, φ_{1A} град.	88,814	88,07	89,036	31,5	31,5	32,143

Кут відставання струму від напруги в фазі <i>B</i> статора, φ_{1B} град	88,814	88,07	90,0	31,5	31,5	32,786
Кут відставання струму від напруги в фазі <i>C</i> статора, φ_{1C} град	88,814	87,42	86,786	31,5	30,857	28,929
Діючий струм фази <i>A</i> статора I_{2A} , А	0,093	0,153	0,291	18,713	18,914	19,098
Діючий струм фази <i>B</i> статора I_{2B} , А	0,093	0,104	0,243	18,713	18,349	17,989
Діючий струм фази <i>C</i> статора I_{2C} , А	0,093	0,238	0,39	18,713	18,729	18,771
Кут відставання струму ротора від напруги в фазі <i>A</i> ротора, φ_{2A} град.	178,737	247,5 79	265,26	186,316	186,947	187,9
Кут відставання струму ротора від напруги в фазі <i>B</i> ротора, φ_{2B} град	178,737	78,94 7	60,0	186,316	186,947	186,95
Кут відставання струму ротора від напруги в фазі <i>C</i> ротора, φ_{2C} град	178,737	168,0	166,73	186,316	186,684	185,05

Для проведення діагностики із застосуванням методу годографа вектора Парка необхідно ввести в модель асинхронного двигуна блок обчислення складових струму статора по осях X, Y (I_{1X}, I_{1Y}) і амплітуду зображуючого струму статора I_{1Z0} . Для цього, з урахуванням виразів (2.8) і (2.9), споектуємо струм статора на осі X и Y . На вісь X проектуємо косинусоїдальні складові статорного струму, а на вісь Y — синусоїдальні. Потім, після переходу від діючих значень струму до амплітуд, проекція струму статора на вісь X буде мати вигляд [17], [19]

$$I_{1X} = \frac{2}{3}(I_{1A} \cos(\omega t + \varphi_{1A}) \cos 0^0 + I_{1B} \cos(\omega t + \varphi_{1B}) \cos(-120^0) + I_{1C} \cos(\omega t + \varphi_{1C}) \cos 120^0), \quad (2.11)$$

а проекція на вісь Y

$$I_{1Y} = \frac{2}{3}(I_{1A} \sin(\omega t + \varphi_{1A}) \sin 0^0 + I_{1B} \sin(\omega t + \varphi_{1B}) \sin(-120^0) + I_{1C} \sin(\omega t + \varphi_{1C}) \sin 120^0), \quad (2.12)$$

де ω - кутова частота; t - час.

Амплітуда зображуючого вектора Парка струму статора визначається виразом [17]

$$I_{1Z0} = \sqrt{(I_{1x})^2 + (I_{1y})^2} . \quad (2.13)$$

На рисунку 2.4 показаний блок для розрахунку вектора Парка струму, виконаний також в MATLAB, який реалізує вирази (2.11)-(2.13).

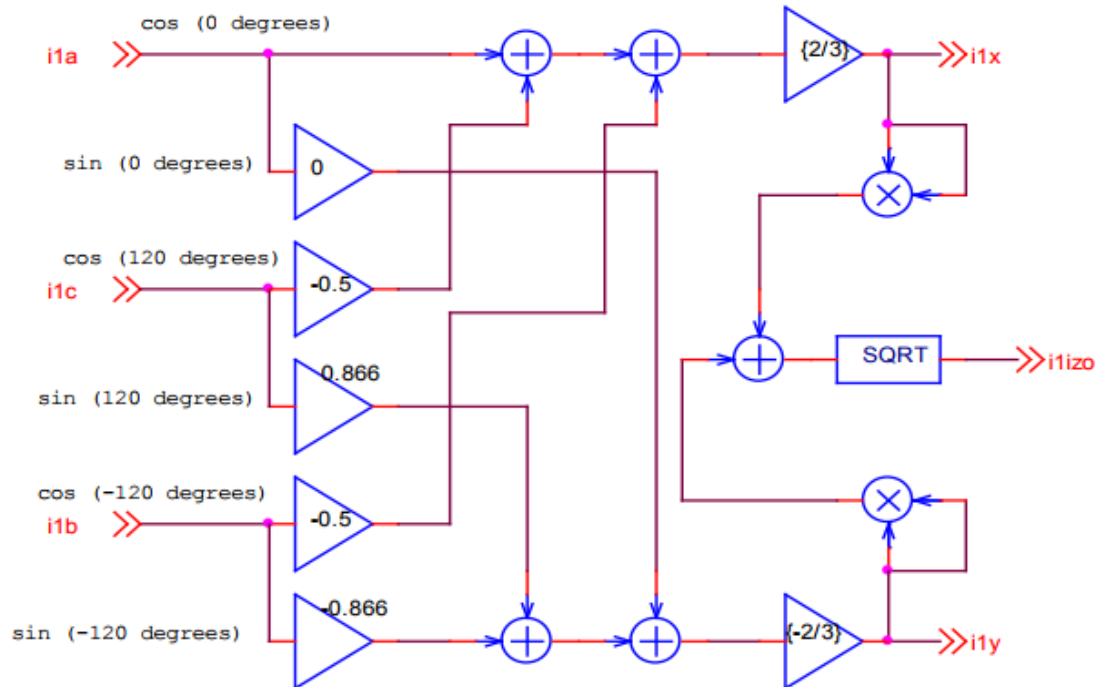


Рисунок 2.4 - Блок обчислення складових струму статора по осях X, Y (I_{1x} , I_{1y}) і амплітуди зображуючого струму статора I_{1Z0}

Використовуючи модель [18] і блок обчислення (рисунок 2.4) для проміжку часу від 0 до $T = 2\pi / \omega$, маємо побудований годограф вектора Парка для струму в номінальному режимі коли статора не має дефектів (рисунок 2.5а), за зміни при наявності міжвиткового замикання комплексного опору фази обмотки до 80 % в номінальному режимі (рисунок 2.5б) і теж саме в режимі холостого ходу (рисунок 2.5в) .

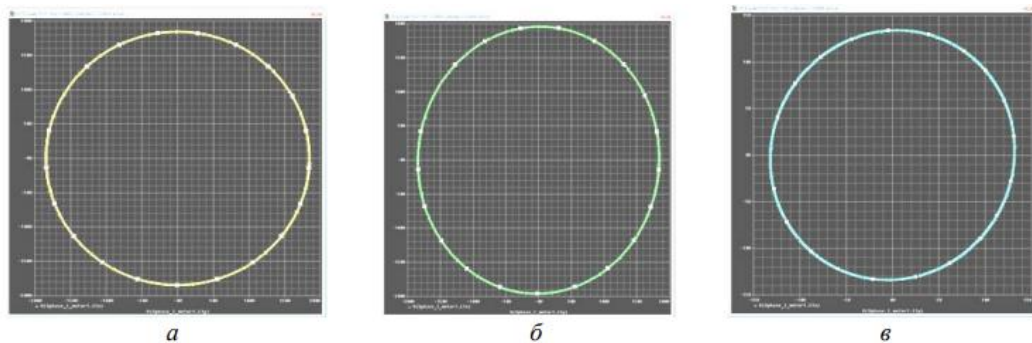


Рисунок 2.5- Годограф вектора Парка: *a* - обмотка статора без дефектів в номінальному режимі; *б*- результаті міжвиткового замикання комплексного опору фази обмотки до 80 % в номінальному режимі;

в - результаті міжвиткового замикання комплексного опору фази обмотки в режимі холостого ходу.

Як показує аналіз, за відсутності міжвиткового замикання (рисунок 2.5*a*) годограф вектора Парка описує правильне коло в масштабі, наведеному на рисунку. З цього випливає, що на комплексній площині з осями X і Y при ідеальних симетричних струмах фаз і ідеальній синусоїдальній напрузі живлення та за відсутності пошкоджень обмотки, складові вектора описують коло з постійним радіусом. Зменшення комплексного опору обмотки фази A до 80 % від номінального, що імітує міжвиткове замикання, призводить до спотворення годографа до еліптичної форми (рисунок 2.5*б*) зі збереженням розміру зображення. За формою еліпса можна визначити не тільки наявність дефекту, але і вид дефекту, його ступінь і пошкоджену фазу. Ступінь розвитку дефекту можна визначити за зміною діаметрів великої і малої осей еліпса, а номер пошкодженої фази — за нахилом великої осі.

З рисунку 2.5*б* та 2.5*в* випливає, що за зміни комплексного опору, в результаті появи міжвиткового замикання в номінальному режимі роботи двигуна і в режимі холостого ходу (2.5*в*), розміри годографів значно відрізняються один від одного, що показує масштабна сітка зображення. Це свідчить про те, що чутливість до одного і того ж дефекту в різних режимах роботи двигуна різна.

До недоліків даного методу слід віднести те що зменшення годографа вектора Парку в розмірі значно ускладнює виявлення дефектів типу міжвиткового замикання в режимі холостого ходу.

Для отримання найдостовірніших результатів діагностування обмоток статора електродвигуна необхідно здійснювати обробку статорних струмів великої тривалості за постійної частоти обертання і навантаження, що мало змінюється, близького до номінального.

Застосовуючи метод спектрального аналізу годографа вектора Парка струму для проведення діагностики міжвиткових замикань обмотки статора, слід враховувати вплив на отриманий результат параметрів мережі живлення, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів в приводі та ін., виділення яких потребує додаткових досліджень.

Можливість застосування методу годографа вектора Парка для діагностики обмотки асинхронного двигунів дистанційно, без зупинки роботи двигуна з використанням в повністю автоматизованих діагностичних системах, робить цей метод найперспективнішим для подальшого розвитку і застосування.

Для більш повного розгляду та аналізу відмов, що пов'язані з пошкодженням ізоляції доцільно буде проаналізувати вплив температури і вологості середовища експлуатації електричної машини на стан опору її ізоляції.

Опір ізоляції (R_{i3}) являє собою дуже мінливу величину і не є параметром електричної машини, а лише показує стан ізоляції в даний час. Вимір опору потрібний для перевірки можливості випробування електричної машини без ризику її пошкодження.

Найменше значення R_{i3} може бути оцінено з допомогою певних критеріїв. R_{i3} дуже сильно змінюється у процесі роботи та залежить в основному від двох факторів - температури та вологості, які знижують її значення, і якщо температуру можна виміряти, то вологість не піддається кількісній оцінці, а якісною оцінка вологості є вимірний результат. Вимірювати опір ізоляції слід мегаомметром, що складається із джерела живлення постійної напруги та ряду елементів.

Порівнюючи R_{i3} обмоток у процесі роботи, можна судити про допустиму її величину. Допустима температура, за якої проводяться вимірювання, повинна мати однакове значення: $T_1 = T_2 = \dots = T_n$, где n – наступний номер вимірювання, час вимірювання при цьому повинен

дорівнювати одній хвилині [4, 5, 6, 9]. При зниженні опору ізоляції більш ніж на 30%, порівняно з попередніми, воно вважається неприпустимим. Величина опору ізоляції, що вимірюється при температурі 75°C, повинна бути більшою, ніж визначена за виразом (2.14), але не менше 0,5 МОм

$$R_{iz} = \frac{U_{ном}}{1000 + P/100}, \quad (2.14)$$

де $U_{ном}$ – напруга електрообладнання, В;

P – потужність, кВт.

Це означає, що за температури електрообладнання 20°C R_{iz} має бути більше 4,7 МОм, тому необхідно зробити приведення допустимого значення R_{iz} (0,5 МОм) при 75° до температури 20°C. Це можна зробити за допомогою коефіцієнтів, наведених у таблиці 2.8

Коефіцієнти приведення R_{iz} до однієї температур

Таблиця 2.8

Різниця температур	5	10	15	20	25	30	35	40
Коефіцієнти приведення	1,23	1,5	1,8	2,25	2,75	3,4	4,15	5,1

Знаходимо різницю температур: $75 - 20 = 55^\circ\text{C}$. Якщо вона більша за 40°C , визначаємо значення коефіцієнтів приведення з таблиці 2.8 і приймаємо два або більше коефіцієнта. В даному випадку температуру 55°C ділимо на дві частини - 25°C і 30°C , для першої температури коефіцієнт приведення 2,75, для другої – 3,40. Загальний коефіцієнт буде становити 9,35. Тоді R_{iz} при 20°C дорівнюватиме 4,7 МОм. В іншому випадку вимірювання проводилися при 20°C і R_{iz} дорівнювало 0,5 МОм. Для цього випадку R_{iz} при 75°C дорівнюватиме 0,053 Мом, це менше допустимого значення. Приблизна оцінка R_{iz} для 75°C можлива з допомогою наступного правила: при вимірі R_{iz} нижче за робочу температуру його потрібно збільшувати на кожні 20°C різниці між робочою температурою і температурою, за якої виконувались виміри [1].

Наприклад: при температурі 20°C $R_{\text{із}}$ становить $4,8 \text{ МОм}$. Температура обмотки дорівнює 75°C , різниця температур $T = 75 - 20 = 55^{\circ}\text{C}$. За правилом у цьому значенні знаходяться 2 повні або 3 неповні температури по 20°C ($20 + 20 + 15 = 55$). Виходячи з цього отриманий результат вимірювання дорівнює

$$R_{\text{із}} = \frac{R_{20^{\circ}\text{C}}}{2 \times 2 \times 2} = \frac{4,8}{8} = 0,6 \text{ МОм} \quad (2.15)$$

Для більш чіткого розуміння, чому вимірювання $R_{\text{із}}$ виконуються за пропонованою методикою, розглянемо схеми заміщення, зображені на рисунках 2.6-2.7

Відповідно до методики, вимірюючи $R_{\text{із}}$ однієї фази необхідно заземлити дві інші фази. На рисунку 2.6 показано схему заміщення електричної ізоляції.

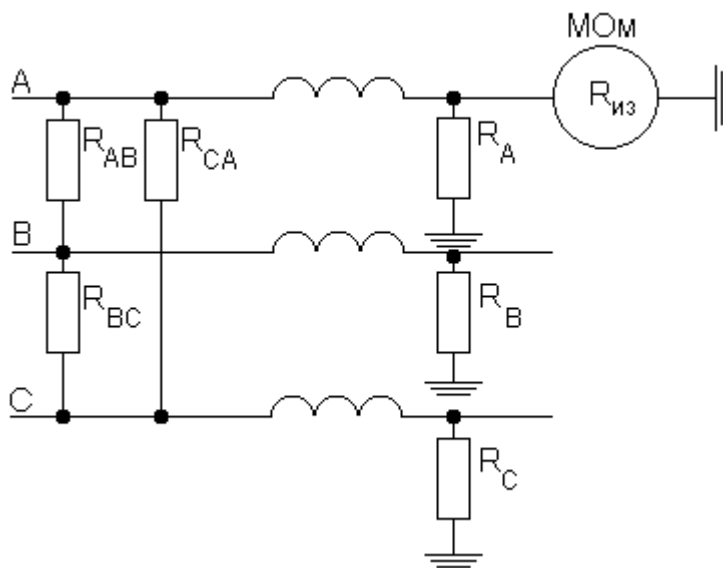


Рисунок 2.6 - Схема заміщення електричної ізоляції

При вимірюванні $R_{\text{із}}$ фази "А", заземливши при цьому фазу "С", побачимо, що схема, наведена малюнку 2.4, змінилася (рисунок 2.5).

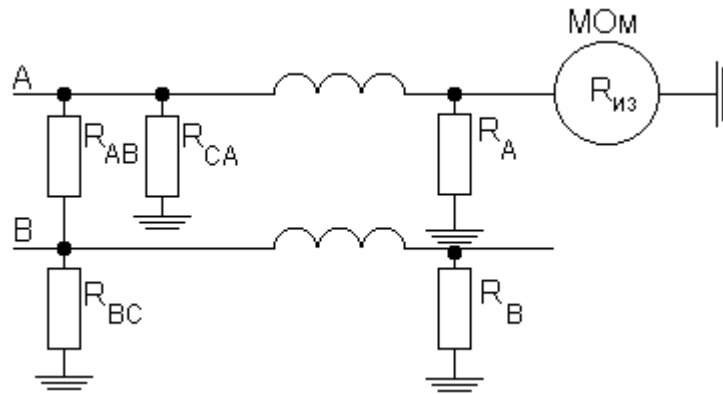


Рисунок 2.7 - Схема заміщення електричної ізоляції при заземленій фазі "С"

Для схеми, показаної на малюнку 2.7, складаємо еквівалентну схему заміщення, використовуючи яку буде дуже зручно проводити розрахунки (рисунок 2.8).

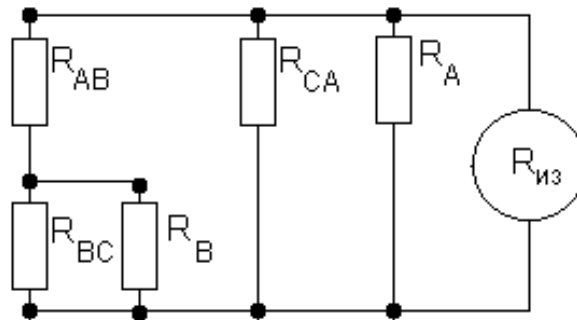


Рисунок 2.8 - Схема заміщення з еквівалентним опором

Запишемо значення еквівалентного опору для цієї схеми:

$$R_E = \frac{R_A \times R_{AC} \times (R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_B \times R_{AB})}{(R_A + R_{AC}) \times (R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_{AB} \times R_B) + R_A \times R_{AC} \times (R_B + R_{BC})} \quad (2.16)$$

Аналізуючи отриманий вираз, визначаємо, коли він дорівнює 0.

Така умова буде дотримуватися, коли вираз у чисельнику дорівнює нулю:

$R_A \times R_{AC} \times (R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_B \times R_{AB}) = 0$, і відповідно, коли дорівнюють нулю R_A та R_{AC} . Вираз за дужками буде дорівнювати нулю тільки в тому випадку, якщо одночасно будуть дорівнювати нулю R_B і R_{BC} .

Якщо тільки $R_B = 0$, тоді

$$R_E = \frac{R_A \times R_{AC} \times R_{AB} \times R_{BC}}{(R_A + R_{AC}) \times R_{AB} \times R_{BC} + R_A \times R_{AC} \times R_{BC}} \quad (2.17)$$

Якщо тільки $R_{AB} = 0$, тоді

$$R_E = \frac{R_A \times R_{AC} \times R_B \times R_{BC}}{(R_A + R_{AC}) \times R_B \times R_{BC} + R_A \times R_{AC} \times (R_B + R_{BC})} \quad (2.18)$$

Якщо тільки $R_{BC} = 0$, тоді

$$R_E = \frac{R_A \times R_{AC} \times R_B \times R_{AB}}{(R_A + R_{AC}) \times R_{AB} \times R_B + R_A \times R_{AC} \times R_B} \quad (2.19)$$

Дані рівняння свідчать, що за результатами проведених вимірів можна зробити помилкові висновки та припустити наявність несправності (пробита ізоляція на корпус фази "В", див. рівняння (2.17), і $R_{із}$ між фазами "А" та "В" і "В" та "С" дорівнює нулю, рівняння (2.18) та (2.19).

Прийнявши, що у електромашин з нормальним $R_{із}$ опори $R_A = R_{AC} = R_B = R_{BC} = R_{AB} = R$, отримаємо такі рівняння:

$$R_E = \frac{3}{8} \times R \quad \text{або} \quad R = \frac{8}{3} \times R_E = 2,7R_E. \quad (2.20)$$

Отже, вимірюючи $R_{із}$ однієї фази, ми визначаємо еквівалентне $R_{із}$ інших фаз щодо корпусу. Для правильного висновку про стан параметрів ізоляції електричної машини потрібно дотримуватися наступних правил правил:

- послідовність вимірювань повинна зберігатися для кожного незалежного ланцюга, інші ланцюги повинні з'єднуватися з корпусом;
- з'єднання ланцюгів з корпусом електричної машини має тривати більше 15 секунд при потужності до 1000 кВт, не менше 60 секунд при потужності понад 1000 кВт та більше 180 секунд при застосуванні мегаомметра на 2500 В [1, 2].

Ступінь зволоження та стан ізоляції визначаються такими методами:

- за значенням коефіцієнта абсорбції K_{ab} ;
- по відношенню C_2/C_{50} ;
- по відношенню $\Delta C/C$.

Розглянемо ці методи більш детально.

Коефіцієнт абсорбції пов'язаний із зволоженістю ізоляції, і відповідно свідчить про її якість у поточний момент. У нормальному стані ізоляції

коефіцієнт абсорбції повинен бути більшим або дорівнює 1,3. Якщо ізоляція суха, коефіцієнт абсорбції виявиться вище 1,4. Волога ізоляція має коефіцієнт абсорбції близький до 1, це сигналом до того, що ізоляцію слід висушити. Необхідно також пам'ятати, що температура навколишнього середовища впливає на коефіцієнт абсорбції, і в момент випробувань температура повинна бути в межах від +10°C до +35°C. Зі зростанням температури коефіцієнт абсорбції зменшиться, і з зниженням — збільшиться.

Коефіцієнтом абсорбції (K_{ab}) називається коефіцієнт діелектричного поглинання, що визначає зволоженість ізоляції, і дозволяє вирішити питання про те, чи потребує гігроскопічна ізоляція того чи іншого обладнання сушіння. Випробування полягає у вимірі за допомогою мегомметр опору ізоляції через 15 секунд і через 60 секунд з моменту початку перевірки:

$$K_{ab} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (2.21)$$

де R_{60} - опір ізоляції через 60 секунд,

R_{15} - опір через 15 секунд.

Суть вимірювання в тому, що електрична ізоляція характеризується електроємністю, і напруга мегомметра, прикладена до ізоляції, поступово заряджає цю ємність, насичуючи ізоляцію, тобто виникає струм абсорбції між щупами мегомметра. Для проникнення струму в ізоляцію потрібен час, і цей час тим більший, чим більший розмір ізоляції і чим вища її якість. Чим вище якість, тим більше перешкоджає ізоляція проходженню струму абсорбції при проведенні вимірювань. Так, що більш зволожена ізоляція, то коефіцієнт абсорбції менший.

У сухої ізоляції коефіцієнт абсорбції буде сильно більше одиниці, оскільки струм абсорбції спочатку різко встановлюється, потім поступово знижується, і опір ізоляції через 60 секунд, який покаже мегомметр, виявиться більше приблизно на 30%, ніж воно було через 15 секунд з моменту початку виміру. Волога ізоляція покаже коефіцієнт абсорбції

близький до 1, оскільки струм абсорбції, встановившись, не сильно змінить своє значення ще через 45 секунд.

При необхідності виміряти коефіцієнт абсорбції у обладнання з робочою напругою до 500 вольт застосовують мегомметр на 500 вольт.

С момента подачи высокого напряжения от щупов измерительного прибора производят отсчет времени 15 и 60 секунд, и фиксируют значения сопротивления R_{15} и R_{60} . Во время подключения измерительного прибора, оборудование, которое подвергается проверке, должно быть обязательно заземлено, а напряжение с его обмоток должно быть снято.

Для измерения коэффициента абсорбции обмоток машин между собой и между обмотками и корпусом, проводят поочередно измерения сопротивлений R_{15} и R_{60} для каждой из независимых цепей, а остальные цепи при этом соединяют между собой и с корпусом машины. Предварительно измеряют температуру цепи, подвергаемой проверке, она должна желательнo соответствовать температуре при номинальном режиме работы машины, и не должна быть ниже 10°C , в противном случае обмотку следует прогреть прежде чем проводить замеры.

Значення найменшого опору ізоляції R_{60} при робочій температурі обладнання обчислюють за такою формулою:

$$R_{60} = \frac{U_H}{\left(1000 + \frac{P_H}{100}\right)}, \quad (2.22)$$

де U_H - номінальна напруга обмотки у вольтах;

P_H - номінальна потужність в кіловатах для машин постійного струму або кіловольт-амперах для машин змінного струму.

Далі розглянемо метод визначення вологості ізоляції, який називають "ємність - частота". Він ґрунтується на тому, що ємність сухої ізоляції при зміні частоти фактично не змінюється на відміну вологої. Вимірювання ємності проводять за частоти 2 Гц та 50 Гц. Вимірюючи ємність ізоляції на частоті 50 Гц, ми бачимо тільки геометричну ємність, яка має однакове

значення у сухій та вологій ізоляції, при вимірюванні ємності на частоті 2 Гц починає проявлятися ємність абсорбції вологої ізоляції, у сухій ізоляції вона має менше значення, і через цього ізоляція заряджається повільніше. Схема вимірювання ємностей C_2 та C_{50} за допомогою приладу ПКВ-7А представлена на рисунку 2.9.

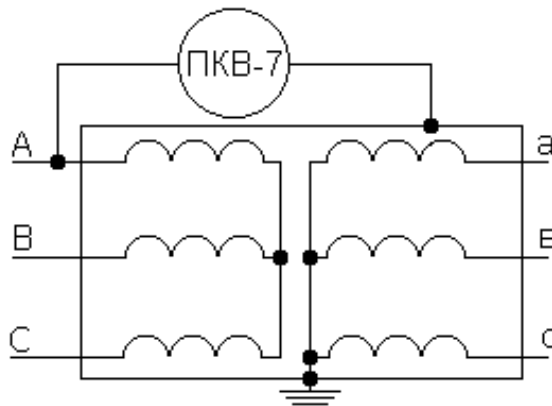


Рисунок 2.9 - Вимірювання вологості ізоляції за допомогою приладу ПКВ-7А

Якщо отримане у процесі вимірювання відношення ємностей на різних частотах відповідає рівнянню $C_2/C_{50} = 2$, то ізоляція вважається вологою, а якщо це рівняння дорівнює 1, то ізоляція є сухою. Для вимірювання використовуються прилади типу ПКВ. Використовувати прилад контролю вологості потрібно при опорі ізоляції понад 14 МОм та температурі від 9 до 32 °С. При порушенні цих умов помилка вимірів може перевищувати 10%.

Визначати вологість ізоляції також можна за приростом ємності за 1 секунду ($\Delta C/C$). Для цього потрібно зарядити ізоляцію, а потім при її розряді виміряти ємність об'єкта "С" та приріст ємності " ΔC " протягом однієї секунди за рахунок ємності абсорбції, яка виявляє себе за 1 секунду у вологій ізоляції і не виявляє коли ізоляція є сухою. Відношення $\Delta C/C$ є функцією температури і дозволяє характеризувати зволоженість ізоляції.

Застосування розглянутих вище методів діагностування ізоляції дозволяє ефективно та раціонально експлуатувати електрообладнання.

Висновки до розділу 2

1. В даному розділі були розглянуті типові відмови електричних машин та причини, які призводять до їх виникнення.
2. Проаналізовані методи, що застосовуються для виявлення цих відмов на ранніх стадіях їх розвитку. Використання цих методів дозволить певною мірою запобігти передчасним відмовам та продовжити термін експлуатації авіаційних електричних машин які є джерелами електричного струму турбогвинтового двигуна.
3. Запропонована перспективна діагностична модель стартер-генераторів постійного струму з використанням теорії нечіткої логіки. Вона дозволяє оцінювати і прогнозувати технічний стан СТГ шляхом накопичення усієї інформації, яка є в наявності використовуючи при цьому досвід персонала.

РОЗДІЛ 3

ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

3.1. Роль діагностики в оцінці технічного стану електрообладнання турбогвинтового двигуна

Останнім часом у всіх областях техніки велика увага приділяється питанню діагностики технічного стану різних машин, механізмів, виробів.

Особливо широкого застосування методи діагностики знайшли в авіаційній галузі.

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.

3.2. Управління технічним станом електрообладнання джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна

Отже, 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.

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.

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 кожну 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 електроустановки, 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 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.

При цьому необхідно врахувати, 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.

Виходячи з вище зазначеного, основним завданням прогнозування слід вважати 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 електричних машин.

При цьому необхідно взяти до уваги те, 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.

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 регламентною 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.

В даний час із збільшенням кількості, удосконалюванням конструкції електрообладнання, а також з урахуванням останніх досягнень вимірювальної 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.

3.3. Принципи та напрями прогнозування відмов головних вузлів джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна

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» відносне, так як стрибкоподібної зміни параметрів технічних пристроїв передуює 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 напрямки кількісної оцінки надійності виробів на основі результатів їх випробувань і експлуатації: констатація рівня надійності і проектування надійності. Констатація рівня надійності ґрунтується на результатах досвіду (дані експлуатації). Для групи однотипних виробів може бути оцінена вірогідність безвідмовної роботи, середній час напрацювання повністю.

Оцінка надійності стає такою, що прогнозує, коли на основі аналізу фізичних процесів, вивчення закономірностей, яким підпорядковуються 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 середньо-квадратична оцінка терміну служби всієї партії в цілому. Перевагою методу індивідуального прогнозування є можливість оцінки надійності (технічного стану) кожного конкретного виробу.

В електричних машинах найбільш детально досліджені і мають ряд практичних співвідношень для прогнозування відмов наступні важливі питання - розрахунок довговічності ізоляції обмотки і стану підшипників.

На даному етапі слід розглянути 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.

Особливу увагу потрібно звернути на те, 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. 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:

$$k_{зал} = (P_{гp} - P_{в}) / (P_{гp} - P_{н}), \quad (3.1)$$

де $P_{гp}$ – граничне значення параметра;

$P_{н}$ – номінальне значення параметра;

$P_{в}$ – вимірне значення параметра.

Якщо у процесі експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу визначається виразом:

$$k_{зал} = (P_{в} - P_{гp}) / (P_{н} - P_{гp}) \quad (3.2)$$

Для нової ізоляції електрообладнання $k_{зал} = 1$, а для тої, що повністю вичерпала свій ресурс $k_{зал} = 0$.

Проаналізувавши дані, 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 прогнозування 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 напрацюванням) або параметричним (за величинами параметрів, які контролюються). Число і діапазон зміни параметрів у кожному класі залежить від особливостей конструкції та умов роботи елемента електрообладнання, який діагностується.

Наведемо для приклада опис декількох найпростіших методів прогнозування, які достатньо легко пристосовувати для прогнозування ресурсу роботи електрообладнання і які не вимагають використання складного математичного апарату.

Метод лінійного прогнозування. В його основу покладено припущення, що у процесі експлуатації зовнішні впливи на ізоляцію електрообладнання, яка діагностуються, 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 межове і номінальне значення параметра. Напрацювання об'єкта діагностування до настання граничного стану $t_{зал}$ визначають за формулою:

$$t_{зал} = t \times \frac{k_{зал}}{1 - k_{зал}}, \quad (3.3)$$

де t - напрацювання від початку експлуатації до моменту діагностування, год.;

$k_{зал}$ - коефіцієнт залишкового ресурсу, який визначається із формул (3.1) або (3.2).

Цей 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. Визначення терміну безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання, яка діагностуються, 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:

$$t_{gap} = (P_{gp} - P_{\epsilon}) / (P_{\epsilon} - P_{\epsilon-1}) t_0 k_0, \quad (3.4)$$

де t_{gap} – гарантований ресурс безвідмовної роботи,

P_{gp} – граничне значення параметра;

P_{ϵ} , $P_{\epsilon-1}$ – виміряна величина параметра відповідно при даному і попередньому діагностуванні;

t_0 – період між даними і попередніми діагностуванням, год. 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:

$$t_{cp1-2} = (P_2 - P_1) / (t_2 - t_1); \quad (3.5)$$

$$t_{cp2-3} = (P_3 - P_2) / (t_3 - t_2). \quad (3.6)$$

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:

$$k_0 = P_{\theta-1} / P_{\theta}. \quad (3.7)$$

У випадках зменшення параметра при роботі об'єкта діагностування зі зростаючою інтенсивністю, коригуючий коефіцієнт визначають за формулою:

$$k_0 = (P_{\text{поч}} + P_{\text{гр}} - P_{\theta-1}) / P_{\text{поч}}, \quad (3.8)$$

де $P_{\text{поч}}$ – початкове значення параметру.

Таким чином, для підвищення достовірності даних при прогнозуванні ресурсу ізоляції електрообладнання за допомогою багатоступінчатого 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 пробою 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 котушок з пазів, де ізоляція випробовує 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.

Дія вібрації – вібраційне старіння на виспні 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. У цих випадках найбільш суттєвими причинами, що викликають поступове руйнування ізоляції, є механічні навантаження. З рівняння Ходвінка для швидкості продавлювання плівки:

$$\frac{dh}{dt} = F_1 \times \psi \times h^{F_2} \times \frac{k_f^n}{\theta_0^{F_3}}, \quad (3.9)$$

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;

та виразу:

$$\tau = \frac{F_1}{\psi \times k_f^n}, \quad (3.10)$$

для розрахунку часу повного продавлювання або довговічності (τ , год.) може бути отриманий коефіцієнт зниження довговічності:

$$k_\tau = k_m^n, \quad (3.11)$$

З урахуванням цього може бути отримане розрахункове значення k_m , при якому термін служби ізоляції знижується вдвічі:

$$k_m = \sqrt[n]{2} \quad (3.12)$$

Тоді контроль за вібраційним старінням ізоляції може здійснюватися на основі значень індексу:

$$C_i = \frac{k_m}{n\sqrt{2}} \quad (3.13)$$

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.

Отже, 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, 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:

$$n \times T_{pm} = \left(\frac{C}{Q'}\right)^k \quad (3.14)$$

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:

$$k_t = \frac{1}{n \times T_{pm.m}} \times \left(\frac{C}{Q'}\right)^k \quad (3.15)$$

Отриманий коефіцієнт дає можливість спрогнозувати час роботи підшипникових вузлів під навантаженням.

Для розрахунку підшипників на заданий ресурс застосовують ідею зниження контактних напружень σ_H зі зростанням числа циклів N контактного навантаження, що має математичний вираз у вигляді:

$$\sigma_H^m \times N = const \quad (3.16)$$

Оскільки величина N пропорційна числу обертів n підшипника, а його довговічність L вимірюється мільйонами обертів ($L = 10^6 \times n$), то вираз (3.16) може бути поданий як:

$$\sigma_H^m \times L = const \quad (3.17)$$

Переходячи від напружень у контактні σ_H до радіальної сили F_r , що викликала ці напруження, одержимо вираз наступного вигляду:

$$F_r^p \times L = const \quad (3.18)$$

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 внутрішньогокільця при імовірності безвідмовної роботи 90 %.

З урахуванням поняття динамічної радіальної вантажності вираз (3.18) має вигляд:

$$F_r^p \times L = C_r^p \times 1 = const \quad (3.19)$$

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 і при звичайних умовах експлуатації визначається виразом:

$$L_0 = \left(\frac{C_r}{F_r}\right)^p, \quad (3.20)$$

де p – показник ступеня: для кулькових підшипників $p = 3$, для роликопідшипників $p = 10/3$.

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 (3.20) варто використовувати:

$$L_0 = \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^p, \quad (3.21)$$

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 передбачен так званий відкорегований ресурс $L_{0.p}$:

$$L_{0.p} = a_1 \times a_2 \times a_3 \times L_0 \quad (3.22)$$

де a_1 – коефіцієнт, що корегує ресурс залежно від рівня надійності підшипника ($a_1 = 1$ при $L_0 = 90\%$);

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:

$$L_{p.n} = \frac{10^6 \times L_{\sigma}}{60 \times n}, \quad (3.23)$$

де $L_{p.n}$ - розрахунковий ресурсу підшипників в годинах роботи.

Підсумовуючи розглянуті вище питання показують деякі напрями та можливості розрахунку та прогнозування відмов вузлів та елементів електричних машин. Подальше проведення досліджень і розробок з розвитку питань прогнозування дозволить підвищити надійність електроустаткування і звести до мінімуму раптові відмови.

Висновки до розділу 3

1. Розглянута роль діагностики в оцінці технічного стану системи електроживлення турбогвинтового двигуна.
2. 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 електричних машин.
3. Розглянуті основні методи прогнозування і оцінки працездатності технічного стану електричних машин, які вказують на існування взаємозв'язків між якістю перетворення енергії, станом ізоляції, підшипників і довговічністю електричної машини в цілому.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Вплив на навколишнє середовище небезпечних та шкідливих факторів під час проведення діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака

Навколишнє середовище уявляє собою систему зв'язаних між собою природних об'єктів та явищ, в якій проходить праця, життя та відпочинок людини.

Охорона навколишнього середовища це система законодавчих актів і заходів, спрямованих на зниження впливу шкідливих і виробничих факторів на:

- ґрунт;
- водоймища;
- атмосферу;
- рослинність;
- тваринний світ;
- людей.

Охорона навколишнього середовища є дуже важливим питанням, яке з кожним роком привертає до себе все більше уваги. Розмах природоохоронних заходів зростає з кожним роком. Їх важливою метою є більш економне та раціональне використання природних ресурсів, більш ефективна охорона природи.

Закон України про охорону навколишнього середовища визначає головні принципи охорони довкілля:

- обов'язковість дотримання екологічних стандартів, пріоритетність вимог екологічної безпеки, нормативів і лімітів використання природних ресурсів;

- гарантування екологічного безпечного середовища для життя і здоров'я людини;
- екологізація матеріального виробництва на засадах комплексного вирішення питань охорони навколишнього середовища.

Гарантією екологічних прав громадян виступає екологічна експертиза. В Україні передбачена державна, громадська та деякі інші види екологічних експертиз, які мають здійснюватися в процесі законотворчої, інвестиційної, керівної та господарської діяльності, що впливає на навколишнє природне середовище.

Об'єктами екологічної експертизи є:

- проекти схем розвитку й розміщення галузей господарства;
- техніко-економічні обґрунтування;
- документація для створення нової техніки;
- матеріали та продукція, реалізація яких може призвести до порушень екологічної безпеки.

У процесі експлуатації та під час проведення діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака на персонал, що обслуговує їх, може вплинути електричний струм, тобто відбутися ураження ним.

Електричний струм – це впорядкований рух електричних зарядів. Доторкнувшись до провідника, що знаходиться під напругою, людина включає себе в електричний ланцюг, якщо він погано ізольований. У цьому випадку через тіло людини проходить електричний струм.

Проходячи через організм людини, електричний струм справляє на нього термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію.

Термічна дія струму спричиняє опіки окремих ділянок тіла, нагрівання кровоносних судин, серця, мозку та інших органів, через які проходить струм, що призводить до виникнення в них функціональних розладів.

Електролітична дія струму характеризується розкладом крові та інших органічних рідин, що викликає суттєві порушення їх фізико-хімічного складу.

Механічна дія струму супроводжується ушкодженнями (розриви, розшарування тощо) різноманітних тканин організму внаслідок електродинамічного ефекту.

Електричний струм, проходячи через організм, подразнює живі тканини, викликаючи в них відповідну реакцію – збудження, яке є одним з основних фізіологічних процесів і характеризується тим, що живі утворення переходять зі стану відносного фізіологічного спокою в стан специфічної для них діяльності. Так, якщо електричний струм проходить безпосередньо через м'язову тканину, то збудження, зумовлене подразнюючою дією струму, проявляється у вигляді мимовільного скорочення м'язів. Це так звана пряма, або безпосередня, подразнююча дія струму на тканини, по яких він проходить.

Існують різні види ураження електричним струмом, які умовно поділяють на місцеві та загальні. Місцеві електротравми викликають місцеве ушкодження організму – електричний опік, металізацію шкіри, механічні пошкодження, викликані мимовільними скороченнями м'язів під дією струму і електрофтальмія (запалення зовнішніх оболонок очей під дією електричної дуги). Загальні електротравми, які частіше називають електричними ударами, викликають порушення звичайної діяльності життєво важливих органів чи призводять до ураження всього організму.

У разі ураження людини електричним струмом основним фактором є сила струму, що проходить через тіло людини. При цьому ступінь негативного впливу на організм людини збільшується зі зростанням струму.

Розрізняють декілька характерних видів струму:

- відчутний струм;
- невідпускаючий струм;
- фібриляційний струм;

– безпечний струм.

Відчутний струм – малий струм, який людина починає відчувати в середньому близько 1,1 мА при змінному струмі частотою 50 Гц і близько 6 мА при постійному струмі. Ця дія обмежується при змінному струмі слабким свербінням і легким пощипуванням (поколюванням), а при постійному струмі – відчуттям нагріву шкіри на ділянці, що доторкається до струмоведучих частин. Найменше значення відчутного струму називається пороговим відчутним струмом.

Невідпускаючий струм – струм, що викликає у разі проходження через тіло людини непереборні судорожні скорочення м'язів руки, в якій затиснутий провідник, а його найменше значення називається пороговим невідпускаючим струмом. При змінному струмі (50 Гц) величина цього струму перебуває в межах 20-25 А, при постійному струмі невідпускаючих струмів, власне кажучи, немає, оскільки при певних значеннях струму людина може самостійно розтиснути руку, в якій затиснутий провідник, і таким чином відірватися від струмоведучої частини. Однак у момент відриву виникають болісні скорочення м'язів, аналогічні за характером і больовим відчуттям тим, які спостерігаються при змінному струмі.

Фібриляційний струм – змінний струм 50 мА і більше, проходячи через тіло людини шляхом «рука – рука» або «рука – ноги», діє як подразник на м'язи серця. Це небезпечно для життя людини, оскільки через 1-3 с з моменту замикання кола через людину може настати фібриляція або зупинка серця. При цьому припиняється кровообіг і, відповідно, в організмі виникає нестача кисню. Це, в свою чергу, швидко призводить до припинення дихання.

Безпечним струмом можна вважати такий струм, який протягом тривалого часу (декілька годин) може проходити через людину, не завдаючи їй шкоди і не викликаючи ніяких відчуттів, і який набагато менший порогового відчутного струму.

Огляд нещасних випадків внаслідок дії електричного струму на людей показує, що тривалість проходження струму через організм істотно впливає на наслідок ураження: чим триваліша дія струму, тим більша вірогідність тяжкого або смертельного наслідку. Така залежність пояснюється тим, що із збільшенням часу дії електричного струму опір тіла зменшується, а сила струму істотно збільшується. Крім того, з часом виснажуються сили організму, що протистоять дії на нього електрики.

Ступінь ураження електричним струмом залежить від площі контакту людини зі струмоведучими частинами а також від температури, вологості і тиску повітря. Зі збільшенням температури і вологості зменшується загальний опір тіла людини, зі збільшенням атмосферного тиску небезпека ураження зменшується.

4.2 Методи і засоби захисту навколишнього середовища від небезпечних та шкідливих факторів, які виникають при проведенні діагностичних робіт

Під час експлуатації під час проведення діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна транспортного літака за допомогою стенду можливе ураження персоналу електричним струмом. Тому, повинні бути застосовані методи та засоби захисту задля уникнення цього.

У якості засобів і методів захисту від ураження електричним струмом застосовують:

- ізоляцію струмоведучих частин (нанесення на них діелектричного матеріалу – пластмас, гуми, лаків, фарб, емалей);
- подвійну ізоляцію – на випадок ушкодження робочої;
- ізоляцію робочого місця;
- заземлення чи занулення корпусів електроустановок, котрі можуть бути під напругою при пошкодженні ізоляції;
- захисне відключення;

- попереджувальну сигналізацію (звукову, світлову) при появі напруги на корпусі установки, написи, плакати, знаки;
- засоби індивідуального захисту.

В електроустановках застосовують наступні види ізоляції:

- робоча ізоляція – електрична ізоляція струмоведучих частин (проводів, шин), що забезпечує запобігання коротких замикань в електроустановці і захист людини від ураження електричним струмом;
- додаткова ізоляція – електрична ізоляція неструмоведучих у нормальному стані частин електроустановки, передбачена додатково до робочої ізоляції струмоведучих частин, для захисту людини у разі пошкодження чи пробою робочої ізоляції;
- подвійна ізоляція – електрична ізоляція, що складається з робочої та додаткової ізоляції;
- посилена ізоляція – поліпшена робоча ізоляція з такою ж ступінню захисту від ураження електричним струмом, як і в подвійній ізоляції.

Захисне відключення – це швидкодіюче автоматичне відключення всіх фаз ділянки мережі, що забезпечує безпечне для людини поєднання струму і часу його проходження при замиканні на корпус, а також зниження рівня ізоляції нижче певної межі. Функція пристроїв захисного відключення, які мають швидкодію від 0,03 до 0,2 с, полягає в обмеженні не величини струму, що проходить через тіло людини, а часу його протікання. Крім того, пристрої захисного відключення захищають електроустановки від загорань, що можуть бути викликані погіршенням ізоляції.

Сигналізація і знаки безпеки застосовуються на додаток до інших засобів захисту. Найчастіше вони використовуються для попередження про наявність напруги на електроустановці або неприпустимому наближенні до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою.

Засоби індивідуального електрозахисту призначені для захисту людини, яка ними користується, від ураження електричним струмом, впливу електричної дуги та електромагнітного поля. Вони поділяються на основні та

додаткові. До основних відносяться засоби захисту, ізоляція яких довго витримує робочу напругу електроустановки і які дозволяють доторкатися до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою (діелектричні рукавички, інструмент з ізолюючими рукоятками і покажчики напруги). До додаткових відносяться засоби захисту, які самі по собі не можуть при робочій напрузі забезпечити захист від ураження, а застосовуються спільно з основними засобами (діелектричні чоботи, ізолюючі підставки).

Захисне заземлення – електричне з'єднання з землею неструмоведучих частин електроустановок, які можуть опинитися під напругою. Воно здійснюється приєднанням електроустановок до природних і штучних заземлювачів. У якості природних заземлювачів використовуються будь-які електропровідні елементи конструкції будівель і споруд. До штучних заземлювачів відносяться спеціальні електроди (металеві стержні), які забиваються в ґрунт.

4.3 Розрахунок контуру захисного заземлення

При проведенні діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна за допомогою перевірного стенду у лабораторії повинно бути захисне заземлення, тому що, захисному заземленню підлягають металеві неструмоведучі частини обладнання, які у результаті несправності ізоляції можуть опинитися під напругою і до яких можливий дотик обслуговуючого персоналу.

Розрахуємо необхідне контурне заземлення, адже воно забезпечує більш високу ступінь захисту. Розрахунок контуру у лабораторії зводиться до визначення числа вертикальних заземлювачів та довжини сполучувальної смуги. За правилами опір контуру заземлення не повинен перевищувати 4 Ом для напруги живлення до 1000 В.

Розраховуємо питомий опір ґрунту:

$$\rho_{роз} = \rho \times \psi, \quad (4.1)$$

де ρ - табличне значення питомого опору ґрунту, $\rho = 50 \text{ Ом} \times \text{м}$;

ψ - коефіцієнт сезонності, $\psi = 1,7$.

$$\rho_{\text{роз}} = 50 \times 1,7 = 85 \text{ Ом} \times \text{м.}$$

Розраховуємо опір розтікання струму вертикального заземлювача R_g , Ом, за формулою:

$$R_g = \frac{\rho_{\text{роз}}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (4.2)$$

де l – довжина вертикального заземлювача $l=3$ м, d - діаметр металеврго стрижня $d=0,05$ м, t – відстань від поверхні землі до середини заземлювача, яка обчислюється за формулою :

$$t = h_g + \frac{l}{2}, \quad (4.3)$$

де h_g - глибина закладання заземлювачів (приймається за 0,8 м):

$$t = 0,8 + 1,5 = 2,3.$$

Тоді опір одного вертикального заземлювача R_g становить:

$$R_g = 85/2 \times 3,14 \times 3 \times (\ln 2 \times 3/0,05 + 0,5 \times \ln 4 \times 2,3 + 3/4 \times 2,3 - 3) = 23,58 \text{ Ом}$$

Визначаємо необхідна кількість вертикальних заземлювачів:

$$n_g = \frac{R_d}{R_g \times \eta_g}, \quad (4.4)$$

де R_d - необхідний нам опір контуру заземлення $R_d \leq 4$ Ом, η_g - коефіцієнт використання вертикального заземлювача $\eta_g = 0,61$.

$$n_g = 23,58/2,44 \approx 10.$$

Далі визначається довжина з'єднувальної стрічки горизонтального заземлювача l_c , м:

$$l_c = 1,05 \times L_g \times (n_g - 1) \quad (4.5)$$

де L_g - відстань між вертикальними заземлювачами, приймається за $L_g = 3$ м :

$$l_c = 1,05 \times 3 \times 9 = 28,35 \text{ м}$$

Визначаємо опір розтіканню струму горизонтального заземлювача (з'єднувальної стрічки) R_Γ , Ом:

$$R_\Gamma = \frac{\rho_{\text{роз}}}{2\pi \times l_c} \ln \frac{l_c}{d \times h_e}, \quad (4.6)$$

де d – еквівалентний діаметр смуги шириною b , $d = 0,95b$, $b = 0,15$ м.

$$R_\Gamma = 85/178 \times 5,5 = 2,63 \text{ Ом}$$

Розраховуємо результуючий опір контуру заземлення з урахуванням з'єднувальної смуги:

$$R_3 = \frac{R_B \times R_\Gamma}{R_B \times \eta_\Gamma + R_\Gamma \times n_e \times \eta_e}, \quad (4.7)$$

де η_Γ - коефіцієнт використання горизонтального заземлювача $\eta_\Gamma = 0,34$.

$$R_3 = 62/8 + 16 \approx 2,6 \text{ Ом.}$$

Отже, на підставі проведених розрахунків з'ясовано, що розрахований опір $R_3 = 2,6$ Ом менший, аніж необхідний опір захисного заземлення $R_d = 4$ Ом. Тому даний заземлювальний контур задовольняє вимогам і є безпечним для використання.

Висновки до розділу 4

У даному розділі було розглянуто вплив на навколишнє середовище джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна. Небезпечним фактором як при роботі, так і при їх обслуговуванні на стенді перевірки являється електричний струм. Тому, щоб уникнути ураження електричним струмом персоналу, необхідне впровадження комплексів заходів та засобів захисту, які зведуть можливе ураження до мінімуму. Зокрема було проведено розрахунок захисного заземлення лабораторії, де проводиться перевірка системи повітряних сигналів, і з'ясовано, що заземлювальний контур задовольняє вимогам і є безпечним для використання.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз умов праці на робочому місці

Суб'єктом охорони праці виступає інженер з діагностики й обслуговування джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна. Робоче місце інженера – стенд для діагностики технічного стану джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна, який розташовується у лабораторії перевірки працездатності системи електропостачання (СЕР).

5.1.1. Організація робочого місця

Робоче місце інженера розташовується у лабораторії, а саме за стендом діагностики й обслуговування джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна. Дане приміщення має розміри: ширина кімнати – 4 метри, довжина – 5 метрів та висота 3 метри. Розміри дозволяють розмістити все необхідне обладнання та устаткування для виконання обслуговування і діагностики обладнання.

Робоче місце оснащено каркасом зі стендом, столом, стільцем, полицею для розміщення необхідної документації (керівництва з технічної експлуатації систем та приладів, керівництва з користування стендом перевірки), а також тумбою для монтажного комплекту стенду діагностики та інших необхідних інструментів. Стенд складається з вимірювача вихідних параметрів, який розташовується на каркасі стенду, струмоведучих кабелів для живлення електричних машин та подачі електроживлення на стенд у цілому, а також шлангів для подачі тиску для продування колекторів електричних машин.

Висота розташування панелі стенда не перевищує 950 мм, що дозволяє працювати сидячи. Колірне фарбування панелі стенда дозволяє швидше орієнтуватися на ній.

Освітлення робочого місця складається з природного та штучного. Також використовується настільна лампа.

Для проведення діагностики джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна інженер перевіряє правильність та надійність з'єднання усіх елементів стенду між собою та з об'єктом перевірки, потім вмикає електроживлення необхідної напруги, і відповідно до методичних вказівок документації, починає перевірку. Дані перевірки заносяться до спеціального журналу обліку параметрів для подальших розрахунків і аналізу отриманих даних.

5.1.2. Перелік шкідливих та небезпечних виробничих чинників

Шкідливі та небезпечні виробничі чинники класифікуються згідно з гігієнічними нормативами ГН 3.3.5-8-6.6.1-2002 «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». На інженера під час роботи за його робочим місцем, та в лабораторії в цілому, впливають наступні шкідливі та небезпечні виробничі чинники:

- виробничий шум;
- недостатнє природнє та штучне освітлення;
- електричний струм;
- підвищена чи понижена температура в приміщенні;
- понижена циркуляція повітря.

5.2. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників

Проаналізуємо наведені вище шкідливі та небезпечні виробничі чинники.

5.2.1. Виробничий шум

У даній лабораторії основним джерелом шуму являється діагностуємо електрична машина, який виробляє гучний шум під час роботи перевірконого стенду.

Для оцінки та аналізу шумів весь слуховий діапазон частот ($f = 16 \dots 20000$ Гц) розбивають на смуги – октави – смуга частот, у якої

відношення верхньої частоти до нижньої дорівнює двом. Характеристикою кожної смуги є середньгеометрична частота. Значення середньгеометричної частоти для восьми стандартизованих октавних смуг дорівнюють: 31,5, 63, 125, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

Норми шуму на робочих місцях регламентуються згідно з ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». При нормуванні шуму враховується характер роботи та умови технологічного процесу.

Згідно з допустимими рівнями звукового тиску на робочих місцях, які приведені в таблиці 5.1, взятої з ДСН 3.3.6.037-99, робоче місце інженера відноситься до категорії робочих місць у приміщеннях лабораторій з шумним устаткуванням. Основним джерелом шуму, як уже раніше зазначалося, є електрична машина. По рівню шуму електричні двигуни, відповідно до ДСТУ 16372, розділені на п'ять класів (від 0 до 4). При цьому електричні машини, що діагностуються відносяться до першого класу:

1 - двигуни постійного і змінного струму загальнопромислового призначення, до яких не пред'являють вимоги по обмеженню рівня шуму, а також машини, що розроблені до 1985 р. і доопрацювання яких до класу 2 недоцільне. Рівні шуму, відповідні класу 1, приведені в табл. 5.1

Таблиця 5.1 – Рівні шуму, що відповідають діагностуємим ЕМ класу 1

Номінальна потужність, кВт	Середнє граничне значення рівня шуму, дБ, електричних машин класу 1, зі ступенем захисту IP44 та IP22, з номінальною частотою обертання, об/хв.
Від 11 до 22	78 (86)

Вона у середньому має рівень звукового тиску 80 дБ. Даний рівень потрібно зменшити, для чого буде проведено розрахунок, оскільки лабораторія має відносно невеликі розміри, і у результаті багаторазового відбиття рівень шуму зростає на декілька децибел.

Таблиця 5.2 - Допустимі рівні звукового тиску на робочих місцях

Робочі місця	Рівні звукового тиску, дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц								Рівень звуку (шуму), дБА
	31,5	63	125	500	1000	2000	4000	8000	
Робота, що вимагає зосередження, робота з підвищеними вимогами до процесів спостереження та дистанційного керування виробничими циклами: робочі місця за пультами у кабінах нагляду та дистанційного керування без мовного зв'язку по телефону; у приміщеннях лабораторій з шумним устаткуванням, шумними агрегатами обчислювальних машин	103	91	83	73	70	68	66	64	75

5.2.2. Природне та штучне освітлення

Освітлення лабораторії складається з природного та штучного. Природне освітлення здійснюється через світлові отвори, тобто вікна, у зовнішніх стінах приміщень. Нормативне значення коефіцієнта природного освітлення складає 1,2. Але в даній лабораторії фактичне значення освітлення дещо менше, ніж нормативне, адже є всього одне вікно з південного боку. Відповідно, якість природного освітлення не завжди буде достатньою. Тому, в залежності від погодних умов, потрібно буде ще й застосовувати штучне освітлення.

Згідно з ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення», штучне освітлення поділяється на робоче, аварійне, охоронне, чергове. Аварійне освітлення поділяється на освітлення безпеки і евакуаційне.

Нормативне значення освітленості робочих поверхонь при штучному освітленні лабораторії складає 300-500 лк. Для забезпечення даного рівня освітленості слід використовувати такі джерела світла, які мають найбільші світловіддачу та термін служби. Оскільки фактичне значення освітленості лабораторії складає 280-290 лк, то для поліпшення цього показника слід використовувати світлодіодні лампи, котрі мають велику світловіддачу при використанні малої потужності. Під час роботи інженера за стендом слід використовувати настільну лампу.

5.2.3. Електробезпека

При роботі, обслуговуванні і ремонті стенда можливе ураження електричним струмом. Загалом стенд живиться напругою постійного струму 27 В, змінного струму напругою 115 В 400 Гц.

Місцями ураження електричним струмом при роботі зі стендом є:

- оголені ділянки струмоведучих кабелів між блоками стенду;
- штепсельні роз'єми кабелів;
- струмопровідні неструмоведучі елементи блоків чи сам каркас стенду, що опинилися під напругою у результаті порушення ізоляції кабелів.

Також можливе ураження електричним струмом внаслідок несправності розеток, вимикачів чи випадкового дотику до оголених чи з порушеною ізоляцією проводів іншого обладнання у лабораторії.

5.2.4. Пожежна безпека

Основними причинами виникнення пожежі при обслуговуванні і ремонті стенда являються:

- неправильний монтаж електропроводки;
- самозаймання паливо-мастильних речовин при неправильному збереженні;
- електричні елементи, що нагріваються.

Для попередження пожежі, вибуху, коротких замикань у стенді здійснений правильний вибір елементів електричних ланцюгів, що запобігають можливість іскріння, короткого замикання. Забезпечено систему

електрозахисту застосуванням автомата захисту мережі для автоматичного відключення стенда захищаючи тим самим проводку від небезпечних перевантажень і коротких замикань.

У стенді пожежну безпеку створюють електричні елементи: резистори, конденсатори, діоди, реле. Вони нагрівають навколишнє повітря і близько розташовані деталі і провідники. Усе це може привести до загоряння цих елементів, руйнування ізоляції і коротких замикань. Для запобігання цього застосовано важкозаймисті ізоляційні елементи.

У даній лабораторії у разі виникнення пожежі для гасіння застосовується один ручний переносний вогнегасник ВВК-5. Він має у якості вогнегасної речовини двоокис вуглецю (вуглекислий газ). При гасіння пожежі вуглекислим газом не ушкоджуються електронні схеми.

Існує два основних типи пожежної сигналізації: безадресна (порогова) та адресно-аналогова системи пожежної сигналізації. Для даної лабораторії оберемо безадресну систему, адже приміщення має невеликі розміри. Для безадресної системи пожежної сигналізації необхідні датчики диму та теплові датчики, які встановлюються на стелі приміщення.

У даному приміщенні під час виникнення пожежі евакуація здійснюється через входні двері, а далі через найближчий вихід з корпусу. Загалом є два основних виходи та декілька евакуаційних. Вибирається той вихід, який найближчий і найбезпечніший.

5.3 Розрахунок захисної перегородки для захисту від виробничого шуму

Електрична машина на стенді для діагностики джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна під час своєї роботи має досить високий рівень звукового тиску, доцільно зробити розрахунок для звукоізоляційної перегородки з шаром звукопоглинального матеріалу (ЗПМ), в яку її буде поміщено.

Розрахунок проводиться у восьми октавних смугах частот. Загальна звукоізоляція перегородки з шаром звукопоглинального матеріалу (ЗПМ) R_c визначається за формулою:

$$R_c = R + \Delta R, \quad (5.1)$$

де R – звукоізоляція перегородки;

ΔR – додаткова звукоізоляція за рахунок шару ЗПМ, дБ визначається за формулою:

$$\Delta R = 8,7 \beta \cdot \delta + 20 \lg((m_n + m_{nc})/m_n), \quad (5.2)$$

де β – коефіцієнт затухання, $1/м$;

δ – товщина шару ЗПМ, $м$;

m_n – поверхнева густина матеріалу перегородки, $кг/м^2$;

m_{nc} – поверхнева густина шару ЗПМ, $кг/м^2$ знаходиться за формулою:

$$m_{nc} = \rho \cdot \delta, \quad (5.3)$$

де, ρ – об'ємна густина ЗПМ, $\rho = 20 кг/м^3$;

δ – товщина шару ЗПМ, $м$.

Розрахуємо поверхневу густину шару ЗПМ, взявши полотно із супертонкого скловолокна. Товщина шару складає $40 мм$. За формулою (5.3) маємо:

$$m_{nc} = 20 \times 0,04 = 0,8$$

Розраховуємо додаткову звукоізоляцію за рахунок шару ЗПМ, знаючи, що коефіцієнт затухання для полотна із супертонкого скловолокна складає $9 1/м$, товщина $40 мм$, поверхнева густина матеріалу перегородки (ДСП) – $12 кг/м^2$, а поверхнева густина шару ЗПМ складає $0,8 кг/м^2$. За формулою (5.2) маємо:

$$\Delta R = 8,7 \times 9 \times 0,04 + 20 \lg\left(\frac{12 + 0,8}{12}\right) = 3,632 \text{ дБ}$$

Розрахуємо загальну звукоізоляцію ДСП з шаром полотна із супертонкого скловолокна, якщо звукоізоляція перегородки (ДСП) дорівнює $26 дБ$. Отже, за формулою (5.1):

$$R_c = 26 + 3,632 \approx 30 \text{ дБ.}$$

Отже, на підставі розрахунку пропонується використати звукоізоляційний корпус, який конструктивно складається зі стінок з ДСП з шаром полотна із супертонкого скловолокна, звукоізоляція котрого складає 30 дБ.

Висновок до п'ятого розділу

У результаті розгляду основних шкідливих та небезпечних виробничих чинників, які впливають на інженера з діагностики та обслуговування джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна за його робочим місцем, визначено що основний шкідливий чинник – шум, який створюється під час роботи стенду електричною машиною. На підставі розрахунку пропонується використати звукоізоляційний корпус з ДСП з шаром звукопоглинального матеріалу (полотно із супертонкого скловолокна), в який буде поміщено електричну машину. Даний корпус дозволить за попередніми розрахунками зменшити рівень звукового тиску від електричної машини з 80 дБ до 50 дБ, що є цілком прийнятним результатом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В цій кваліфікаційній роботі було розглянуто призначення транспортного турбогвинтового літака і основні задачі, які виконує літак.

На прикладі легкого транспортного літака Ан-26 було зроблено огляд джерел живлення електричного струму турбогвинтового двигуна. Були розглянуті типові відмови електричних машин та причини, які призводять до їх виникнення завдяки яким був зроблений аналіз надійності основних елементів системи електропостачання (СЕР).

Було проаналізовано методи, що застосовуються для виявлення зазначених відмов на ранніх стадіях їх розвитку. Використання цих методів дозволяє певною мірою запобігти передчасним відмовам та подовжити термін експлуатації авіаційних електричних машин які є джерелами електричного струму турбогвинтового двигуна.

Запропонована перспективна діагностична модель стартер-генераторів постійного струму з використанням теорії нечіткої логіки. Вона дозволяє оцінювати і прогнозувати технічний стан СТГ шляхом накопичення усієї інформації, яка є в наявності використовуючи при цьому досвід персонала.

Розглянуто роль діагностики в оцінці технічного стану системи електроживлення турбогвинтового двигуна і визначено, що основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів електричних машин і апаратів. При цьому 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 електричних машин.

Також були озглянуті основні методи прогнозування і оцінки працездатності технічного стану електричних машин, які вказують на існування взаємозв'язків між якістю перетворення енергії, станом ізоляції, підшипників і довговічністю електричної машини в цілому.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Круглов В. В. Нечеткая логика, искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
3. Потапов В. Н. Диагностирование авиационных электрических машин / В. Н. Потапов. – М.: Транспорт, 1989. – 101 с.
4. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин / О. Д. Гольдберг. – М.: Высш.шк., 2000. – 255 с.
5. Котеленец Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. - М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
6. Куприн В. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов / В. В. Куприн, К. Д. Рунов, И. М. Синдеев. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1975. – 318 с.
7. Шейников А. А. Диагностика коллекторных электрических машин по параметрам входного (выходного) напряжения / А. А. Шейников, В. Р. Вашкевич, А. А. Санько // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2010. - № 4. – С. 96 – 102.
8. Шейников А. А. Спектральная оценка качества коммутации коллекторных электрических машин постоянного тока / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов, В. Р. Вашкевич // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2011. - № 2. – С. 103 – 108.
9. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання. Навч. посіб. / В. А. Матвійчук, О. Є.Рубаненко, І.О. Гунько – Вінниця: ВНАУ, 2020. –138 с.
10. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О. В. Губаревич. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.

11. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Учебн. пособие. / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев - СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. - 159 с.

12. Губаревич О. В. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. / О. В. Губаревич, и С. М. Голубева // Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету». Серія «Електро-техніка і енергетика», № 1 (21), с. 55-63, 2019.

13. Грабко В. В. «Математическая модель для диагностирования состояния изоляции работающей мощной электрической машины по ее тепловому портрету»/ В. В. Грабко, и В. В. Грабко - Наукові праці ВНТУ, № 1, 2008. - 178 с.

14. Титко А. И. «Новые методы диагностики асинхронных двигателей»/ А. И. Титко, В. М. Андриенко, А. В. Худяков, и М. С. Гуторова //Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 37, 2014. – С. 58-61.

15. Пономарев В. А. «Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей»/ В. А. Пономарев, И. Ф. Суворов // Читинский государственный университет, Новости электротехники, № 2 (68), 2011.

16. Сидельников Л. Г. «Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации»/ Л. Г. Сидельников, и Д. О. Афанасьев //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело, № 7, 2013. - С. 127-137.

17. Худий Є. Г. «Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин»/ Є. Г. Худий, І. І. Пельтек //Вестник НТУ «ХПИ»: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика, № 28, 2010. - С. 549-550.

18. Петухов В. С. «Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения»/ В.С. Петухов //Новости электротехники, № 1 (50), 2008. - С. 33-37.

19. Goolak S. “Development of mathematical model of induction motor for vehicles” / S. Goolak , O. Gubarevych, E. Yermolenko, M. Slobodyanyuk, and O. Gorobchenko //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, no. 2/2 (104), 2020. - P. 24-35.

20. Pustovetov M. “Induction Electrical Machine Simulation at Three-Phase Stator Reference Frame: Approach and Re-sults,” / M. Pustovetov //Electromechanical Devices and Machines. IntechOpen, 50 p., 2019.

21. Пястолов А.А Эксплуатация и ремонт электроустановок : учебник для вузов / А.А. Пястолов. – Москва : Колос, 1983. – 326 с.

22. Помогаев Ю.М. Надежность систем электроснабжения : учебник для вузов / Ю.М. Помогаев, В.В. Картавец, В.И. Серебровский. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2014. – 143 с.

23. Ермолин Н. П. Надежность электрических машин./ Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин – Л., 1976. – 248с.

24. Черный А.П. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография./ А.П. Черный, Д.И. Родькин, А.П. Калинов, О.С. Воробейчик – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.

25. Руссов В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Руссов. – Пермь, 2012. – 252 с.

26. Ясинський Ю.О., Немчинов А.О., Нікішин О.М. Прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання з урахуванням якості споживає - мої електроенергії / Системи обробки інформації. – 2010, випуск 9 (90) Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

27. Синягин Н. Н. Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики. / Н. Н. Синягин, Н. А.

Афанасьев, С. А. Новиков – М.: Энергия, 1978. – 408 с.