

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

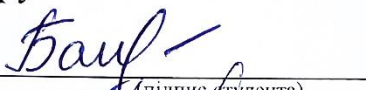
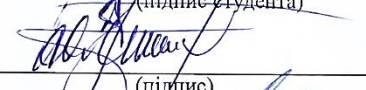
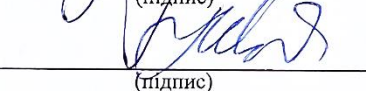
до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему: «Розробка теплової схеми заміщення електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б»

за освітньою програмою: «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент групи «ЕП20120»

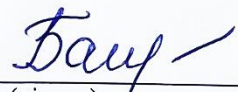
Керівник:	 (підпис студента)	/Олексій БАЯНОВСЬКИЙ/ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
Нормоконтролер:	 (підпис)	/доц. Дмитро УСТИМЕНКО/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
	 (підпис)	/доц. Оксана КАРЗОВА/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

_____	_____	//
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	_____	//
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	_____	//
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	_____	//
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент

  
(підпис)

Дніпро – 2023 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Ukrainian State University of Science and Technologies

Faculty «Energy and economics Process Control»  
Department «Electrical engineering and electromechanics»

Explanatory Note  
to Bachelor's Thesis

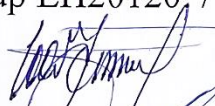

on the topic: «Development of the thermal replacing scheme for the DK-409 electric motor of the EK-7B compressor»

according to educational curriculum «Electromechanical automation systems and electric drive»

in the Speciality: «141 Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics»

Done by the student of the group EII20120; / Oleksii BAIANOVSKYI /

Scientific  
Supervisor:

\_\_\_\_\_  
/Dmytro USTYMENKO/

Normative  
controller:

\_\_\_\_\_  
/Oksana KARZOVA/

Supervisors

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

\_\_\_\_\_  
//  
(position, name, surname)

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

\_\_\_\_\_  
//  
(position, name, surname)

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

\_\_\_\_\_  
//  
(position, name, surname)

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

\_\_\_\_\_  
//  
(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»

Кафедра: «Електротехніка та електромеханіка»

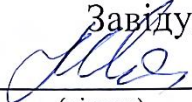
Рівень вищої освіти: бакалавр

Освітня програма: «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

Спеціальність: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТЕМ

 / Андрій МУХА/  
(підпис)

Дата 19.06.23

### ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студенту Баяновський Олексій Анатолійович

1. Тема роботи: «Розробка теплової схеми заміщення електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б»

Керівник роботи: Устименко Дмитро Володимирович, доцент  
затверджені наказом № 1083 ст від 24.10.2022

2. Строк подання студентом роботи: 19.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Електродвигун ДК-409 компресора ЕК-7Б

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

4.1 Аналітична частина: Вступ. Аналіз літературних джерел та нормативної документації з вказаного питання. Фактори, що впливають на надійність роботи електропривода компресора електропоїзда. Методи оцінки теплового стану електричної машини.

4.2 Основна частина: Розрахунок струмової навантаженості електродвигуна компресора в умовах важких пусків. Розробка теплової схеми заміщення двигуна ДК-409 та розрахунок величини перегріву його обмоток в умовах важких пусків. Оцінка отриманих результатів та розробка заходів по усуненню причин, що призводять до перевищення перегрівів обмоток їх допустимих значень.

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: Вимоги безпеки при експлуатації та ремонті компресорів.

4.4 Економічна частина: –

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1.

Сучасні підходи та методи до оцінки теплового стану електричної машини;

2. Аналіз причин передчасного виходу з ладу електродвигунів ДК-409 компресорів ЕК-7Б;

3. Теплова схема заміщення двигуна ДК-409 та розрахунок величини перегріву його обмоток в умовах важких пусків;

4. Технічні та організаційні заходи направлені на усунення причин, що призводять до перевищення перегрівів обмоток їх допустимих значень.


6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

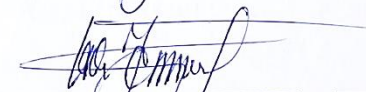
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Аналіз літературних джерел та нормативної документації з вказаного питання.	17.04.-23.04.2023	
2	Фактори, що впливають на надійність роботи електропривода компресора електропоїзда. Методи оцінки теплового стану електричної машини.	24.04.-07.05.2023	
3	Розрахунок струмової завантаженості електродвигуна компресора в умовах важких пусків.	08.05.-21.05.2023	
4	Розробка теплової схеми заміщення двигуна ДК-409 та розрахунок величини перегріву його обмоток в умовах важких пусків. Оцінка отриманих результатів та розробка заходів по усуненню причин, що призводять до перевищення перегрівів обмоток їх допустимих значень.	22.05.-04.06.2023	
5	Вимоги безпеки при експлуатації та ремонті компресорів.	05.06.-11.06.2023	
6	Загальні висновки. Бібліографічний список.	12.06.-18.06.2023	
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри.	19.06.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії.	26.06.2023	

Студент

  
(підпис)

Олексій БАЯНОВСЬКИЙ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

  
(підпис)

доц. Дмитро УСТИМЕНКО  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

№ рядка	Формат	Позначення	Назва	Кільк. арк.	№ екз.	Прим
1			<u>Документація загальна</u>			
2			Заново розроблена			
3	A4	6.141.200120.ПЗ	Пояснювальна записка	47		
4			Запозичена			
5			<u>Графічна частина</u>			
6			Заново розроблена			
7	A4	6.141.200120.01	Фактори, що впливають	1		
8			на надійність роботи			
9			електропривода			
10			компресора ЕК-7Б			
11	A4	6.141.200120.02	Теплова еквівалентна схема	1		
12			заміщення якоря ДК-409			
13	A4	6.141.200120.03	Оцінка величини перегріву	1		
14			ізоляції електродвигуна ДК-			
15			409 в неномінальних умовах			
16			роботи			
17	A4	6.141.200120.04	Рекомендації по підвищенню	1		
18			експлуатаційної надійності			
19			мотор-компресора ЕК-7Б			
20						
21						
22			Запозичена			
23			<u>Електронна частина</u>			
24						

					6.141.200120.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість кваліфікаційної роботи		
Розробив		Баяновський О.А.	<i>Баяновський</i>	19.06.			
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>Устименко</i>	20.06.			
Консульт.							
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>Карзова</i>	01.06.			
Зав. кафедр.		Муха А.М.	<i>Муха</i>	01.06.	Стад.	Аркуш	Аркушів
						5	47
					МОН України. УДУНТ Кафедра «ЕТЕМ» Група ЕП20120		

## РЕФЕРАТ

Дипломна бакалаврська робота на тему «Розробка теплової схеми заміщення електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б» складається з 5 розділів та містить: 47 сторінок основного тексту, 2 таблиці, 19 рисунків, 17 літературних джерел, додаток.

Мета роботи – створення теплової моделі якоря електродвигуна ДК-409 для оцінки його теплової завантаженості при роботі в неномінальних режимах.

В розділі 1 на основі статистики виходу з ладу виявлено фактори, що найбільше впливають на показники експлуатаційної надійності мотор-компресора. Найсуттєвішим, за кількістю відмов, виявився прогар обмотки якоря, до якого ймовірно призводять: недосконалість захисної апаратури, робота системи з невідповідною тривалістю включення, перевантаження електродвигуна ДК-409 надвисокими струмами в умовах важкого пуску.

Розділ 2 присвячений аналізу методів оцінки теплового стану електричної машини. Вибрано та обґрунтовано використання методу теплових схем.

В розділі 3 представлена теплова схема заміщення якоря електродвигуна ДК-409 та методика розрахунку перевищення температури обмотки якоря та сталі якоря над температурою охолоджуючого повітря в неномінальних умовах роботи. Наведені результати обчислень теплового стану електродвигуна при роботі в важких умовах пуску та роботі з невідповідним ТВ.

В розділі 4 надані рекомендації по усуненню причин, що призводять до критичних значень перегрівів ізоляції ДК-409.

Розділ 5 містить інформацію по вимогам безпеки при експлуатації та ремонті компресорів та компресорних установок.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** МОТОР-КОМПРЕСОР, МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕПЛОВА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, ТЕПЛОВИЙ ПОТІК, ІЗОЛЯЦІЯ, ПЕРЕГРІВ, ЕКВІВАЛЕНТНИЙ СТРУМ, ТЕПЛОВИЙ ЗАХИСТ.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕСОРА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА. ....	10
1.1 Компресор ЕК-7Б з приводним двигуном постійного струму ДК-409.....	10
1.2 Аналіз факторів, що впливають на показники експлуатаційної надійності мотор-компресора електропоїзда ЕР2.....	12
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ. ..	16
2.1 Підходи до моделювання технічних систем.....	16
2.2 Метод теплових схем для визначення значення перегріву обмотки електродвигуна компресора.....	19
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ДВИГУНА ДК-409 ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ТЕПЛОВОЇ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ.....	24
3.1 Еквівалентна теплова схема заміщення електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б .....	24
3.2 Методика розрахунку перевищення температури обмотки якоря та сталі якоря над температурою охолоджуючого повітря .....	29
3.3 Оцінка величини перегріву ізоляції двигуна ДК-409 в неномінальних умовах роботи.....	32
РОЗДІЛ 4 ЗАХОДИ ПО УСУНЕННЮ ПРИЧИН, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ПЕРЕВИЩЕННЯ ПЕРЕГРІВІВ ОБМОТОК ЇХ ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ.....	37
РОЗДІЛ 5 ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТІ КОМПРЕСОРІВ ТА КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК .....	40
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	46
СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ .....	48
ДОДАТОК А .....	49

					Пояснювальна записка			
						Літ.	Маса	Масштаб
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка теплової схеми заміщення електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б			1:1
Розробив		Баяновський О.А.	<i>Баяновський</i>	19.08				
Перевірив		Устименко Д.В.	<i>Устименко</i>	20.08				
Т. контр.						Арк. 7		Аркушів 47
Реценз.								
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>Карзова</i>	01.09	6.141.200120.ПЗ	Український державний університет науки і технологій, група ЕП20120		
Затвердив		Муха А.М.	<i>Муха</i>	01.09				

## ВСТУП

Економічний розвиток, рівень політичної і соціальної інтеграції на Європейському просторі 21 сторіччя залежать від наявності ефективних транспортних систем, які в змозі забезпечити стабільне економічне і соціальне зростання [1, 2]. Залізниці України мають значний потенціал, однак для того, щоб його реалізувати необхідно вжити термінових заходів по реструктуризації залізниць, підвищенню якості послуг, надійності рухомого складу та безпеки перевезень. Однією з ключових проблем залізниць є невідповідність стану існуючого парку рухомого складу сучасним вимогам і стратегії його подальшого розвитку. Враховуючи значний об'єм капіталовкладень для його заміни на новий доцільнішим було б впроваджувати стратегію поступового оновлення в поєднанні з модернізацією існуючого рухомого складу з метою підвищення його експлуатаційної надійності, безпеки і т. д.

Надійність транспортної системи визначається надійністю його окремих вузлів і механізмів. Виходячи з цього, питання надійної роботи допоміжних машин, до яких відносяться, в тому числі, мотор-компресори не втрачає своєї актуальності і дотепер.

Будь-яка електрична машина призначена для енергоперетворення, що супроводжується появою електромагнітного моменту, який є результатом взаємодії магнітного поля індуктора зі струмом якоря. Виходячи з цього електрична машина теоретично повинна представляти собою поєднання двох типів матеріалів: магніто- і струмопровідних. Однак для їх розділення потрібен третій тип матеріалу – електрична ізоляція. Під впливом температури зі спливанням часу вона втрачає свої електроізоляційні та механічні властивості: ізоляції «старіє», що може призводити до її електричного пробоя і відмови машини. Тому природно вимагати від ізоляції працювати при допустимій для неї температурі економічно доцільний до ремонту термін. Ця властивість ізоляції визначається її нагрівостійкістю, яка обмежує зростання потужності електричної машини [3].

					6.141.200120.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Якщо швидкість старіння ізоляції визначається в основному експлуатаційними умовами і якістю матеріалів, то на утворення місцевих дефектів впливає також рівень технології виробництва та ремонту.

Електропоїзди серій EP1, EP2, EP2T експлуатуються на залізницях вже досить довгий час. За цей термін допоміжні тягові машини, в тому числі й приводні електродвигуни компресорів, пройшли як мінімум декілька заводських ремонтів зі зміною ізоляції.

В рамках Дніпровського локомотивного депо накопичена статистична інформація, щодо виходу з ладу електродвигунів ДК-409 аналіз якої показує, що електричні машини працюють термін значно менший розрахункового та близько половини виходів з ладу припадає на прогар обмотки якоря [4]. Виходячи з цього при вивченні причин, що призводять до таких наслідків потрібно особливу увагу звернути на умови експлуатації та дотримання технології при ремонтів електродвигунів ДК-409 [4, 5].

Для дослідження причин прогару обмотки якоря необхідно мати можливість оцінити теплову навантаженість конструкції. Цю задачу можна вирішувати різними підходами – проведенням великої кількості стендових випробувань з узагальненням отриманої інформації, або використовуючи математичні моделі для опису електромеханічних та теплових процесів в системі. Реальне моделювання є найбільш адекватним, але його можливості з урахуванням особливостей реальних об'єктів обмежені, можливості ж математичного моделювання значно ширші, а точність визначається тими наближеннями які закладені в модель [7]. До того ж потрібно враховувати економічний аспект моделювання, який буде значно вигідніший для процесу математичного моделювання.

Враховуючи вищевикладене в рамках дипломної роботи стоїть задача створення математичної моделі електродвигуна ДК-409 з метою оцінки його теплової навантаженості та напрацювання рекомендацій по підвищенню експлуатаційної надійності електропривода компресора.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1

## ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕСОРА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА.

### 1.1 Компресор ЕК-7Б з приводним двигуном постійного струму ДК-409

Кожний вагон електропоїзда має власну пневматичну мережу, яка складається з двох основних ліній – напірної та гальмівної. На причіпних і головних вагонах встановлені компресори для створення і підтримання в напірній магістралі тиску стисненого повітря на рівні 6,5...8,0 кгс/см<sup>2</sup>.

Для обертання валу компресора ЕК-7Б (рис. 1) застосовують електродвигун компресора. На електропоїзді ЕР2 встановлено електродвигун ДК-409 [8].

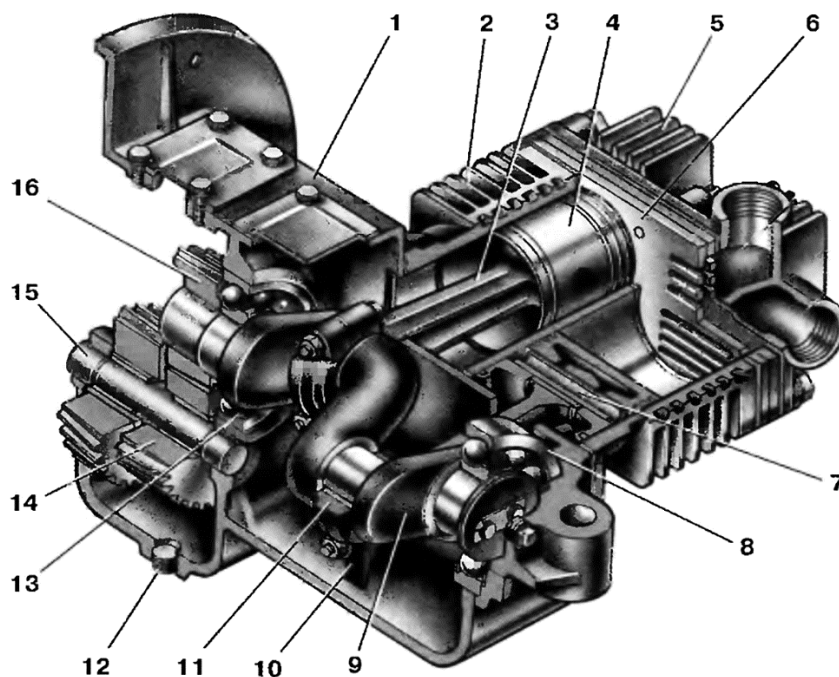


Рисунок 1 – Компресор ЕК-7Б:

1 – корпус компресора; 2 – блок циліндрів; 3 – шатун; 4 – поршень; 5 – кришка блоку циліндрів;  
6 – плита; 7 – поршневий палець; 8 – передній підшипник; 9 – колінчатий вал; 10 – розбризкувач; 11 – крика шатуна; 12 – пробка маслозливного отвору; 13 – задній підшипник;  
14 – блок проміжних зубчатих коліс; 15 – ексцентрикова вісь; 16 – шестерінка колінчатого валу.

В лівій порожнині корпусу 1 (картера) компресора знаходиться двоступеневий редуктор, а в правій – встановлений на двох шарикопідшипниках 8, 13 колінчатий вал 9. До фланця картера прикріплений блок циліндрів 2, в яких переміщуються

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

поршні 4. На кожний поршень встановлені два верхніх компресійних кільця і два нижніх маслознімних. Між блоком циліндрів 2 і кришкою 5 блоку розміщена плита 6 (проміжна частина), в якій встановлені самопідтискні стрічкові клапани (шість нагнітальних і шість всмоктуючих). Кришка 5 всередині має перегородку, що відділяє порожнину всмоктування від порожнини нагнітання [8].

В картері компресора залите мастило для змащування деталей, що труться. Контроль за рівнем мастила здійснюється контрольною лінійкою (щупом).

Електродвигун ДК-409 постійного струму, послідовного збудження, з чотирма головними полюсами, додаткових полюсів немає. Корпус електродвигуна литий, круглий; з середини до нього на шпильках закріплені головні полюси. Сердечники головних полюсів набрані з окремих ізолюваних сталених листів, що скріплені під пресом заклепками. Котушки збудження виготовлені з ізолюваного круглого проводу ПДБ [8]. Сердечник якоря набирають з окремих листів електротехнічної сталі. Обмотка якоря хвилева, укладена в 39 пазах. В кожному пазі розміщено сторони семи шестивиткових секцій, виготовлених з такого ж проводу, що і обмотки головних полюсів. Схема з'єднання обмоток електродвигуна компресора ілюструється рис. 2 [8].

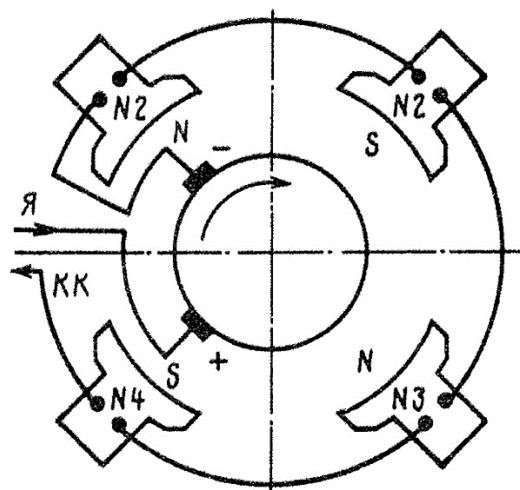


Рисунок 2 – Схема з'єднання обмоток електродвигуна компресора

Колектор ДК-409 має 273 пластини, затиснений між двома втулками (конусна і натискна) і затягнутий гайкою.

Вентилятора електродвигун не має, оскільки працює в повторно-короткочасному режимі (S3), тобто має природне охолодження.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Технічні дані електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні дані двигуна ДК-409

Параметр	Значення
Номинальна напруга, В	1500
Номинальний струм, А	4,65
Номинальна потужність, кВт	5
Частота обертання, об/хв	1020
Число головних полюсів	4
Опір обмоток двигуна при 20°C	19,76
Спосіб охолодження	природне

## 1.2 Аналіз факторів, що впливають на показники експлуатаційної надійності мотор-компресора електропоїзда ЕР2

Статистика виходів з ладу електродвигунів ДК-409 по Дніпровському локомотивному депо наведена на рис. 3 [4].



Рисунок 3 – Статистика виходу з ладу електродвигунів ДК-409

Аналіз діаграми рис. 3 показує, що найбільший відсоток (45%) виходів з ладу

електродвигунів компресорів відбувається по причині прогару обмотки якоря (тепловий пробій ізоляції якірної обмотки). Враховуючи це першочергова увага повинна приділятися експлуатаційним причинам, що впливають на стан ізоляції.

Ймовірними причинами, що призводять до виходу з ладу електричного двигуна через прогар обмотки якоря може бути [9]:

- недосконалий тепловий захист електродвигуна компресора;
- робота мотор-компресора з невідповідною тривалістю включення (ТВ);
- перевантаження електродвигуна компресора надвисокими струмами (в тому числі струмами короткого замикання);

Спостереження показали, що в зимових умовах, за від'ємних температур, перші декілька запусків мотор-компресора тривають значно довше унормованої тривалості, тобто фактично має місце певне перевантаження струмом якірної обмотки [4]. На електропоїздах EP1 та EP2 для захисту силового кола компресора від струмів в діапазоні 4,65...30 А передбачено теплове реле ТРВ-8,5, коли струм сягає 35 А і більше – спрацьовує реле перевантаження Р-103. Вивчаючи роботу теплового реле ТРВ-8,5 експериментально встановлено, що в деяких випадках, ТРВ-8,5 при струмі 10 А спрацьовує аж через 1050 секунд, а це однозначно призведе до перегріву ізоляції ДК-409 [4]. Більше того під час огляду технічного стану систем захисту двигунів мотор-компресорів електропоїздів EP1 та EP2 неодноразово фіксувались випадки експлуатації ТРВ-8,5 з невідповідними налаштуваннями, а інколи ці реле були взагалі відсутні [4]. Безумовно, це сприяє інтенсивному зношуванню ізоляційних матеріалів електродвигуна, і як наслідок, передчасному виходу з ладу двигуна.

Згідно технічних даних поршневого компресора ЕК-7Б він працює в повторно-короткочасному режимі (S3) з тривалістю ввімкнення  $TВ=50\%$  при тривалості циклу 10 хв. (час роботи  $t_p$  дорівнює часу паузи  $t_n$  і складає 300 с, значення еквівалентного струму під час пуску при 20°C складає 9,62 А.)

На рис. 4 представлено осцилограми напруги і струму при роботі мотор-компресора. Тривалість  $t_p=363$  с., що на 63 с. перевищує нормативне значення. Тобто фактичне значення тривалості вмикання ТВ складе 60,5%, що також призводить до перевантаження електродвигуна по теплу.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

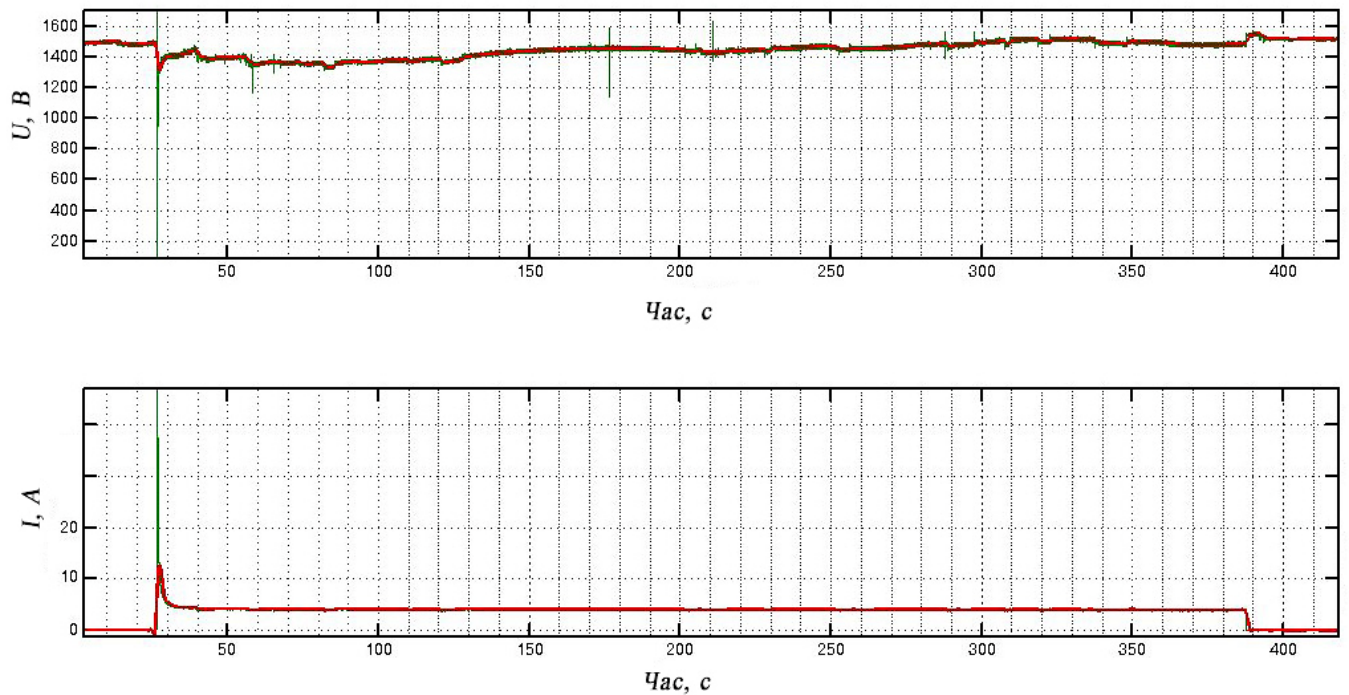


Рисунок 4 – Осцилограми напруги та струму при роботі мотор-компресора

Експериментальні дослідження поршневого компресора Е-500 (електровози ВЛ-60), який має аналогічну конструкцію до компресора ЕК-7Б, при різних температурах навколишнього середовища показали значне (в рази) збільшення величини початкового моменту опору в механізмі при зниженні температури нижче нуля, навіть при застосуванні зимового типу мастила [10].

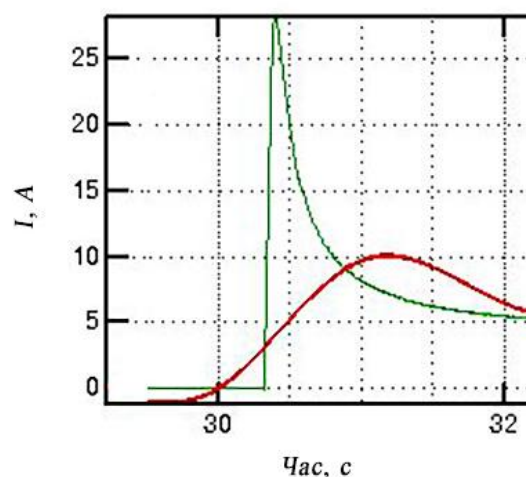


Рисунок 5 – Осцилограма струму на етапі пуску компресора

Початковий момент опору у механізмі є наслідком роботи сил тертя спокою в підшипниках, ущільнювачах, циліндрі, кривошипно-шатунному механізмі, а також

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

в зоні контакту поршня з технологічним середовищем. Момент статичного опору зменшується з розворотом валу в результаті руйнування складових, обумовлених зміною в'язкості мастила в картері та зміною стану середовища, з яким контактує поршень. Тобто за низьких температур умови запуску компресора є вкрай важкими.

Осцилограма струму електродвигуна ДК-409 на етапі пуску компресора (рис. 5) отримана при температурі навколишнього середовища +20°C. Пікова величина струму сягає значення близько 27 А, що в 5,8 рази перевищує його номінальне значення. Враховуючи досвід отриманий для компресора Е-500 можна припустити, що зимовий пуск ЕК-7Б буде супроводжуватись значними короткочасними перевантаженнями за струмом (в 10 і більше разів), що також є причиною пришвидшеного старіння ізоляції.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

#### 2.1 Підходи до моделювання технічних систем

Моделлю називається представлення об'єкта, системи чи поняття в деякій абстрактній формі, що є зручною для наукового дослідження [11].

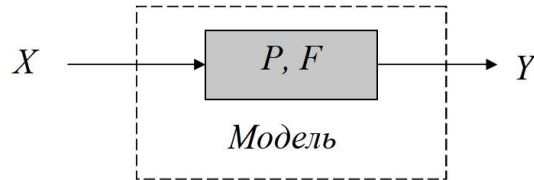


Рисунок 6 – Загальна структура моделі

В загальному випадку модель має структуру, зображену на рис. 6. Тут  $X$  – множина вхідних змінних системи,  $Y$  – множина вихідних змінних системи,  $P$  – множина параметрів,  $F$  – функція, функціонал, алгоритм або формальне представлення залежності змінних  $Y$  від змінних  $X$ .

Усі моделі можуть бути класифіковані на кілька видів за різними ознаками, насамперед – на матеріальні та абстрактні (рис. 7) [7].



Рисунок 7 – Види моделей

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Матеріальні моделі це, як правило, натурні масштабні моделі, макети, креслення і т. д., що виконанні з певних матеріалів і володіють частково/повністю властивостями об'єкта моделювання. Дослідження таких моделей, як і самих об'єктів, вимагає значного об'єму експериментів, лабораторних випробувань, що пов'язано з неабиякими затратами часу і матеріальних цінностей.

Абстрактні моделі існують в уяві дослідника та представляються у вигляді формул, знаків, схем і т. д. Виділяють два основні типи абстрактних моделей – образні та знакові, і похідні від них – образно-знакові.

До знакових моделей відносяться математичні моделі. Математична модель об'єкта – сукупність замкнених систем рівнянь, кожне з яких устанавлює з певним ступенем наближення кількісні зв'язки між окремими елементами й параметрами об'єкта, здатна замінити цей об'єкт для вивчення та одержання інформації. Перед розробником математичної модель стоїть досить складна задача витримати компроміс між простотою моделі та повнотою опису.

Враховуючи розвиток електронних засобів для обрахунків математичні моделі набувають широкого поширення в якості засобу моделювання в різних галузях і для різних задач, а враховуючи незначні матеріальні затрати та значну економію часу на сьогодні є чи не найрозповсюдженим видом моделей.

Залежно від характеру використаного математичного апарату можна виокремити два основні розділи математики – класичну та прикладну.

Група методів прикладної математики значно ширша за номенклатурою і частіше використовується інженерами-практиками.

Вибір методу математичного моделювання безпосередньо залежить від ступеня деталізації об'єкта, закону функціонування елементів системи і зовнішніх дій. Залежно від ступеня деталізації опису складних систем та їх елементів можна вирізнити три основні рівні моделювання:

1) структурне моделювання систем із застосуванням моделей і спеціалізованих мов моделювання, теорій множин, алгоритмів, формальних граматики, графів, масового обслуговування, статистичного моделювання;

2) логічне моделювання функціональних систем, моделі яких зображують у вигляді логічних рівнянь і будують, застосовуючи дво- або багатозначну алгебру логіки;

3) кількісне моделювання (аналіз) принципів схем елементів складальних систем, моделі яких зображують у вигляді систем нелінійних алгебричних або інтегродиференціальних рівнянь і досліджують, застосовуючи методи функціонального аналізу, теорії диференціальних рівнянь, математичної статистики.

Процес моделювання з урахуванням можливих повернень до попередніх етапів моделювання може бути представлено алгоритмом (рис. 8).

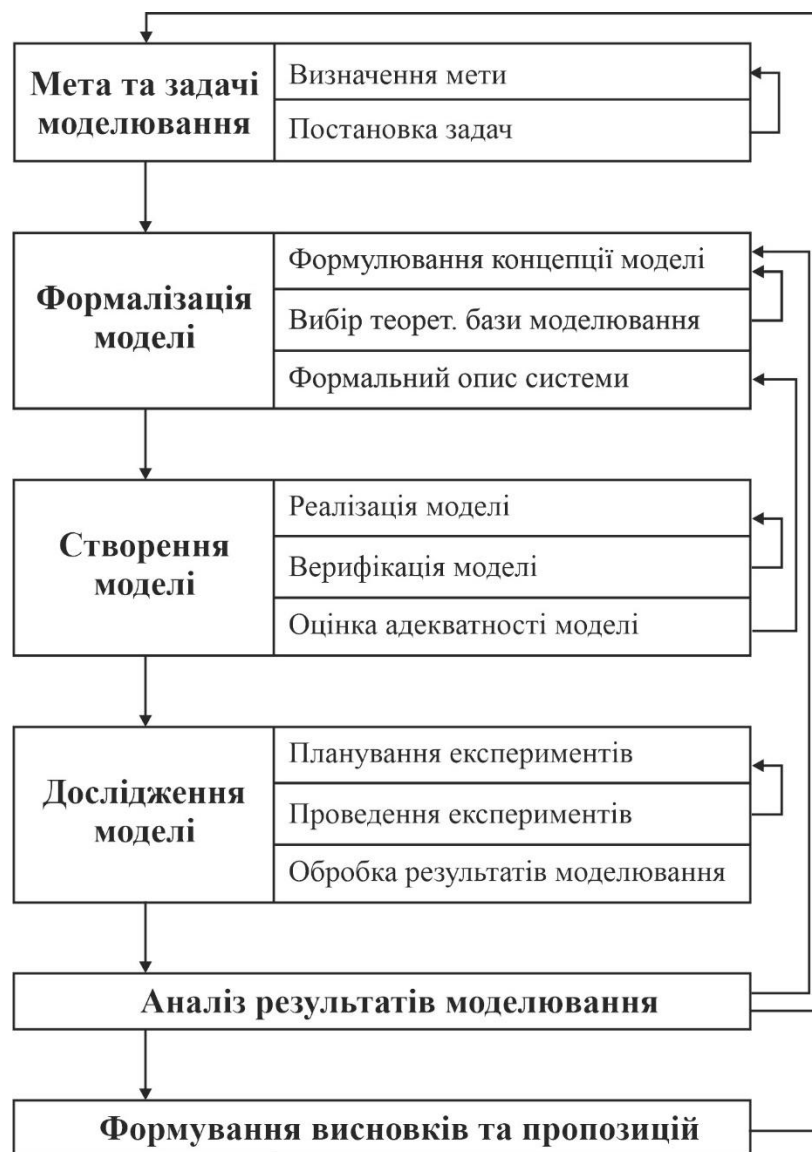


Рисунок 8 – Процес моделювання

## 2.2 Метод теплових схем для визначення значення перегріву обмотки електродвигуна компресора

Метод теплових схем, як і метод температурних полів, дозволяє визначити перегрів обмотки. Він ґрунтується на поданні елементів машини у вигляді вузлів (джерел теплоти) з тепловиділенням у них, усередненим по всьому об'єму елемента [3].

Метод теплових схем порівняно простий у математичному відношенні і часто використовується в реальних практичних розрахунках. Метод оснований на використанні теплових опорів, що з'єднуються в теплову мережу, яка імітує реальні шляхи передачі теплових потоків в машині, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом, основу на однаковій формі основного закону теплопровідності (закон Фур'є).

Теплові процеси в машині описуються наступним рівнянням нагрівання [3]:

$$Qdt - S\alpha\tau dt = mcd\tau, \quad (1)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу;

$S$  – площа поверхні з якої віддається тепло;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, що враховує в цілому відведення теплоти (розсіяння) в навколишнє середовище променевипусканням і конвекцією, зростає з ростом перегріву;

$\tau$  – перегрів тіла;

$m$  – маса тіла;

$c$  – питома теплоємність тіла;

$d\tau$  – величина, на яку підвищилась температура тіла за час  $dt$ .

Недолік методу полягає у тому, що він дає не повну картину температурного поля, а тільки деякі середні значення температури для окремих елементів машини.

З часом процес нагрівання сповільнюється, нарешті коли  $d\tau = 0$ , тіло досягає кінцевого перегріву:

$$\tau_{\text{кінц}} = \frac{Q}{S\alpha}. \quad (2)$$

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Теорія нагрівання електричних машин і метод теплових схем були розроблені й проваджені в практику О. О. Алексєєвим. Згідно з рівнянням теплового балансу (1) в сталій тепловій рівновазі, коли  $d\tau = 0$ , вся енергія теплових втрат передається у навколишнє середовище, причому течія йде в напрямку спадання теплового потенціалу. Таким чином, при визначенні середнього перегріву обмотки електричної машини треба враховувати:

1. перепад температури по товщині ізоляції;
2. перепад температури від поверхні ізоляції до охолоджуючого повітря;
3. підігрів цього повітря.

Температурний перепад по товщині ізоляції зв'язаний з тепловим потоком  $Q$  наступним рівнянням [3]:

$$Q = S\lambda \frac{\Theta_{\text{гар}} - \Theta_{\text{хол}}}{\beta} = S\lambda \text{grad}\Theta, \quad (3)$$

де  $\Theta_{\text{гар}}$  – температура внутрішнього шару ізоляції;

$\Theta_{\text{хол}}$  – температура зовнішнього шару ізоляції;

$\beta$  – товщина ізоляційного шару;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності (питома теплопровідність).

Порівнюючи значення коефіцієнтів теплопровідності міді ( $\lambda_{\text{Cu}} = 300 \dots 350 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}}$ ) та шаруватої ізоляції ( $\lambda_{\text{із}} = 0,12 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}}$ ), остання в 2700 разів гірше проводить теплоту. Тому навіть незначні прошарки повітря в ізоляції різко погіршують її теплопровідність і одночасно діелектричні властивості.

Розв'язок (3) з урахуванням виразу для щільності теплового потоку  $B = Q/S$  дозволив отримати величину перепаду температур по товщині ізоляції в наступній формі:

$$\Theta_{\beta} = B \frac{\beta}{\alpha} = \frac{Q\beta}{S\lambda}. \quad (4)$$

Вираз (4) є аналогічним по структурі виразу для визначення спаду електричного потенціалу в електротехніці, це, по аналогії, дозволило ввести поняття теплового опору для потоку теплової енергії:

$$R = \frac{\beta}{S\lambda}, \text{ або } \Theta_{\beta} = QR. \quad (5)$$

Теплорозсіювання з поверхні, що обдувається, відбувається інтенсивніше ніж без обдування, а отже змінюється тепловіддача і її коефіцієнт [3]:

$$\alpha_{об} = \alpha(1 + k_{об}\sqrt{v}), \quad (6)$$

де  $v$  – швидкість повітря, яке обдуває поверхню;

$k_{об}$  – коефіцієнт інтенсивності обдування.

Згідно з формулою Ньютона тепловий опір тепловіддачі з поверхні, що обдувається  $R_{об} = \frac{1}{S\alpha_{об}}$ , і по аналогії з виразом (5) величина перегріву поверхні, що обдувається:

$$\Theta_v = QR_{об} = \frac{Q}{S\alpha_{об}}. \quad (7)$$

Повітря рухаючись зі швидкістю  $v$  над нагрітою поверхнею, що віддає тепло, нагрівається від температури  $\Theta_1$  до  $\Theta_2$  далі до  $\Theta_3$  (рис. 9) [12].

Перегрів вентилярованої поверхні над температурою навколишнього середовища [3]:

$$\tau = \frac{\Theta_v}{1 - 0,5a}, \quad (8)$$

де  $a$  – коефіцієнт підігріву повітря.

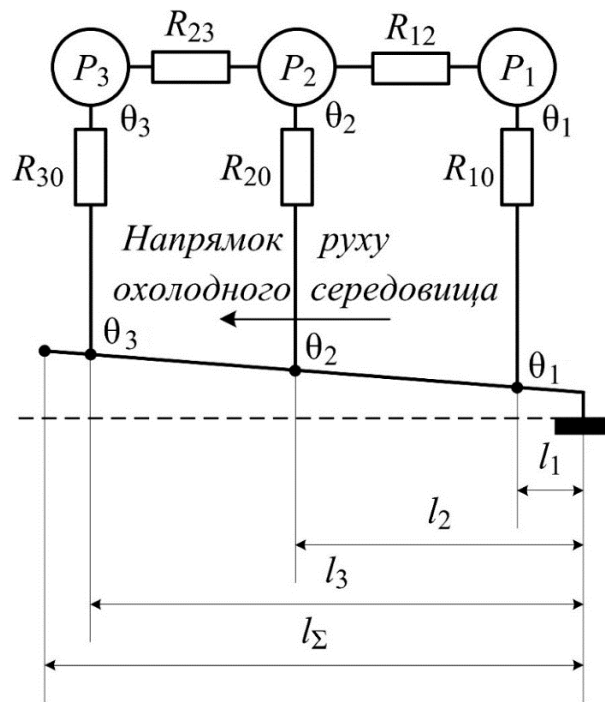


Рисунок 9 – Еквівалентна теплова схема з трьома елементами

Коефіцієнт підігріву повітря [3]:

$$a = \frac{S\alpha_{об}}{0,5S\alpha_{об} + 1100 \cdot v} \quad (9)$$

Вираз (9) показує, що коефіцієнт  $a$  залежить лише від параметрів вентилязованого тіла і при даній витраті повітря є величина стала. При збільшенні швидкості  $v$  значення  $a$  зменшується, оскільки падає кількість теплоти, яка виноситься одиницею об'єму повітря, а загальна кількість теплоти, що забирається, при збереженні перегріву зростає. Значення коефіцієнта  $a$  приймають для незалежної вентиляції  $0,2 \dots 0,25$ , а для самовентиляції –  $0,35 \dots 0,4$  [3].

Сумісний розв'язок рівнянь (6), (7) і (8) дає кінцевий вираз для визначення перегріву вентиляваної поверхні [3]:

$$\tau = \frac{Q}{Sa(1 + k_{об}\sqrt{v}) \cdot (1 - 0,5a)} \quad (10)$$

В (10) коефіцієнт тепловіддачі [3]:

$$\alpha_{\text{вент}} = \alpha(1 + k_{\text{об}}\sqrt{v}) \cdot (1 - 0,5a), \quad (11)$$

а тепловий опір

$$R_{\text{вент}} = \frac{1}{S\alpha_{\text{вент}}}. \quad (12)$$

Шуканий перегрів обмотки електричної машини може бути інтерпретований як різниця потенціалів, тому можна зобразити схему заміщення теплової системи.

Для вирішення цієї задачі немає необхідності визначати усі складові теплового потоку, достатньо правильно встановити шляхи відводу теплоти, теплові опори, відповідні цим шляхам, скласти схему заміщення і знати величину  $Q$ .

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ДВИГУНА ДК-409 ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ТЕПЛОВОЇ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ

### 3.1 Еквівалентна теплова схема заміщення електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б

Оскільки дані статистики (рис. 3) показують, що через руйнування ізоляції виходить з ладу, в основному, обмотка якоря ДК-409, а не полюсів, то еквівалентну теплову схему заміщення створено для якоря електродвигуна. При її створенні прийняті наступні допущення:

- температура усього об'єму міді якоря однакова;
- температура осердя якоря, включаючи й зубці, також однакова у всьому об'ємі;
- відводом тепла через клини, які призначені для закріплення обмотки в пазах, із-за їх малої теплопровідності, нехтуємо;
- теплопровідність сталевих бандажів приймаємо рівною безкінечності, що означає – відвід тепла від лобових з'єднань обмотки через бандажі відбувається без перепаду тепла в них.

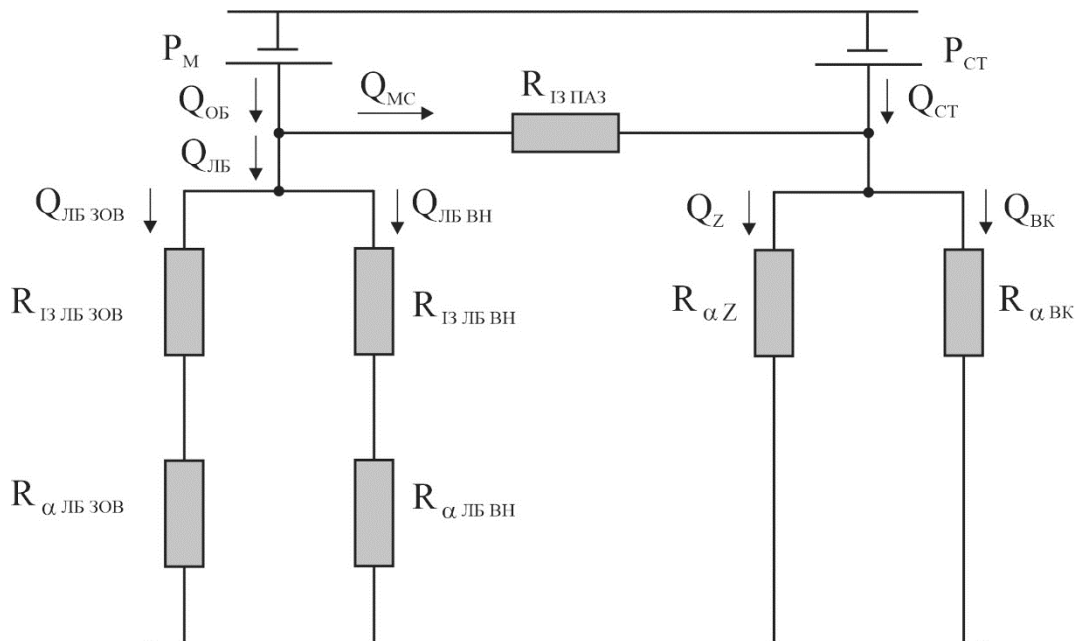


Рисунок 10 – Загальна схема протікання теплових потоків в якорі ДК-409

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Температура повітря, яке охолоджує як зовнішні, так і внутрішні поверхні якоря електродвигуна однакова. Загальна схема протікання теплових потоків показана на рис. 10 [13].

Якір електричної машини має два джерела теплових потоків: обмотка якоря з втратами в ній  $p_m$  та сталеве осердя якоря із втратами  $p_{ст}$ . Як правило, мідь обмотки нагрівається до більш високої температури, ніж сталь осердя.

Тепловий потік  $Q_{об} = p_m$  ділиться на дві складові:

$$Q_{об} = Q_{лб} + Q_{мс} \quad (13)$$

Перша складова  $Q_{лб}$  передається повітрю, яке охолоджує, через поверхні лобових з'єднань обмотки; друга складова  $Q_{мс}$  переходить із міді обмотки через пазову ізоляцію з опором  $R_{ізпаз}$  у сталь осердя якоря.

Потік від лобових з'єднань  $Q_{лб}$  у свою чергу також ділиться на дві складові:

$$Q_{лб} = Q_{лбзов} + Q_{лбвн} \quad (14)$$

де  $Q_{лбзов}$  – потік, який проходить скрізь ізоляційне покриття зовнішньої поверхні лобових з'єднань (тепловий опір  $R_{ізлбзов}$ ) і який передається з цієї поверхні охолоджуючому повітрю. Тепловий опір цієї охолоджуючої поверхні  $R_{\alpha лбзов}$ ;

$Q_{лбвн}$  – потік, який проходить скрізь ізоляційний шар із внутрішнього боку лобових з'єднань (тепловий опір його  $R_{ізлбвн}$ ) і передається з нього повітрю, яке охолоджує. Тепловий опір цієї охолоджуючої поверхні  $R_{\alpha лбвн}$ .

Тепловий потік  $Q_{мс}$ , який проходить від міді обмотки в сталеве осердя, складається з власним тепловим потоком якоря  $Q_{ст} = p_{ст}$ . Сумарний тепловий потік  $Q_{ст} + Q_{мс}$  віддається охолоджуючому повітрю двома шляхами: з поверхні зубців якоря, які мають тепловий опір  $R_{\alpha z}$  в об'ємі  $Q_z$  та з поверхні внутрішніх вентиляційних каналів, які мають тепловий опір  $R_{\alpha вк}$  у розмірі  $Q_{вк}$ . Таким чином,

$$Q_{ст} + Q_{мс} = Q_z + Q_{вк} \quad (15)$$

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Величину теплового опору  $R_\alpha$  поверхні, яка охолоджується, з урахуванням виразу (12) визначають за формулою:

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha_v \cdot S}, \quad (16)$$

де  $\alpha_v$  – коефіцієнт теплорозсіювання у повітрі, яке рухається, Вт/°С·см<sup>2</sup>;

$S$  – поверхня нагрітого тіла, з якої відводиться тепло шляхом конвекції, см<sup>2</sup>.

Коефіцієнт  $\alpha_v$  визначається за формулою (6) і визначає значення сталого перевищення температури у відповідності з виразом (10). По аналогії з формулою закону Ома для електричних кіл вираз (10) можна подати наступним чином:

$$\tau = Q \cdot R_\alpha. \quad (17)$$

Тепловий опір ізоляції  $R_{i3}$  визначається формулою [3]:

$$R_{i3} = \frac{\delta_{i3}}{\lambda_{i3} \cdot S}, \quad (18)$$

де  $\delta_{i3}$  – товщина ізоляції;

$\lambda_{i3}$  – питома теплопровідність ізоляційного матеріалу.

Питома теплопровідність теплового кола аналогічна питомій електропровідності електричного кола.

Знаючи розміри і характер поверхонь з яких віддається тепло, а також матеріал і товщини ізоляційних покриттів, характер та ефективність системи вентиляції електродвигуна, враховуючи схему теплових потоків в якорі (рис. 11), використовуючи формули (16) та (18) визначають значення теплових опорів:

- поверхонь з яких віддається тепло ( $R_{\alpha_{лбзов}}$ ,  $R_{\alpha_{лбвн}}$ ,  $R_{\alpha_z}$ ,  $R_{\alpha_{вк}}$ );
- шарів ізоляції ( $R_{i3_{паз}}$ ,  $R_{i3_{лбзов}}$ ,  $R_{i3_{лбвн}}$ ).

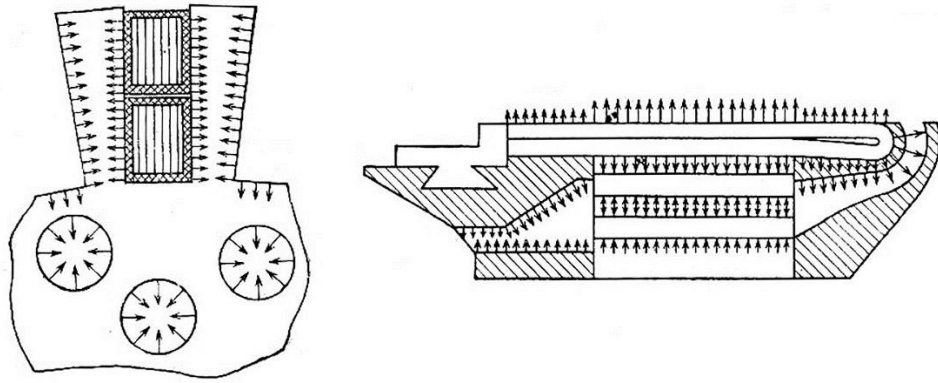


Рисунок 11 – Схема теплових потоків в якорі електродвигуна

Наступним етапом є розрахунок опорів тепловому потоку зовнішньої ( $R_{\text{лбзов}}$ ) та внутрішньої ( $R_{\text{лбвн}}$ ) поверхонь лобових з'єднань:

$$\begin{cases} R_{\text{лбзов}} = R_{\text{ізлбзов}} + R_{\alpha\text{лбзов}} \\ R_{\text{лбвн}} = R_{\text{ізлбвн}} + R_{\alpha\text{лбвн}} \end{cases} \quad (19)$$

На основі вищевикладеного матеріалу схема (рис. 10) перетворюється до вигляду рис. 12.

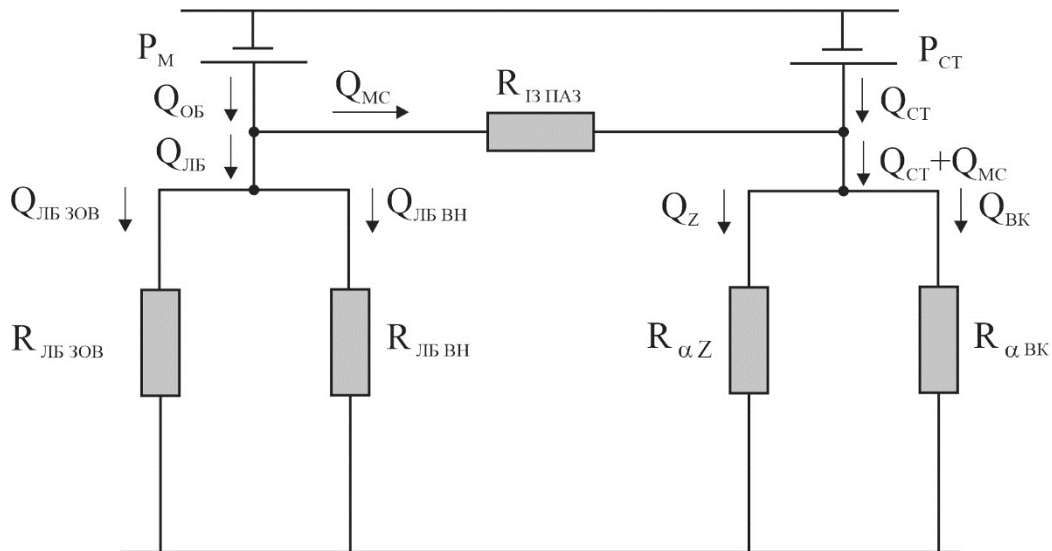


Рисунок 12 – Еквівалентна тепла схема якоря двигуна ДК-409

Опори  $R_{\text{лбзов}}$  та  $R_{\text{лбвн}}$ , які увімкнуті паралельно, дають результуючий опір:

$$R_{\text{лб}} = \frac{R_{\text{лбзов}} \cdot R_{\text{лбвн}}}{R_{\text{лбзов}} + R_{\text{лбвн}}}, \quad (20)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

$R_{лб}$  – загальний опір тепловому потоку  $Q_{об}$ .

Аналогічно визначається, загальний опір тепловому потоку  $Q_{ст} + Q_{мс}$ , який віддається сталевому осерддю якоря:

$$R_{ст} = \frac{R_{\alpha z} \cdot R_{\alpha BK}}{R_{\alpha z} + R_{\alpha BK}} \quad (21)$$

З урахуванням виразів (20) та (21) еквівалентна теплова схема якоря двигуна ДК-409 прийме вигляд рис. 13.

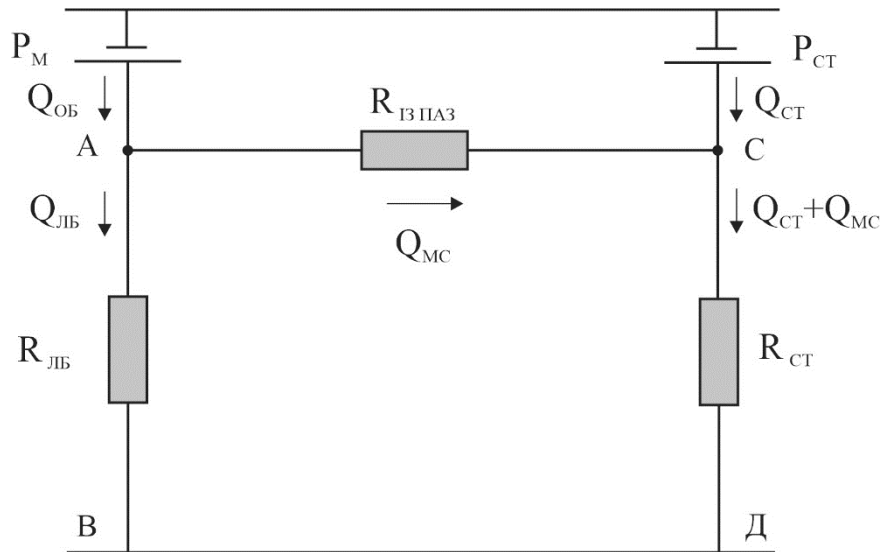


Рисунок 13 – Еквівалентна теплова схема якоря двигуна ДК-409 (компактний варіант)

В схемі рис. 13 тепловий потік  $Q_{лб}$ , проходячи через тепловий опір  $R_{лб}$ , зумовлює перепад температури між обмоткою над температурою охолоджуючого повітря, який дорівнює:

$$\tau_{обм} = Q_{лб} \cdot R_{лб} \quad (22)$$

Перевищення температури сталі осердя над температурою охолоджуючого повітря дорівнює:

$$\tau_{ст} = (Q_{ст} + Q_{мс}) \cdot R_{ст} \quad (23)$$

Крім того, спад теплового потенціалу на ділянці АВ дорівнює спаду потенціалу на ділянці СД, тобто:

$$Q_{\text{лб}} \cdot R_{\text{лб}} = Q_{\text{мс}} \cdot R_{\text{ізпаз}} + (Q_{\text{ст}} + Q_{\text{м}}) \cdot R_{\text{ст}} \quad (24)$$

Рівняння (13), (22), (23) та (24) утворюють систему:

$$\begin{cases} Q_{\text{об}} = Q_{\text{лб}} + Q_{\text{мс}} \\ \tau_{\text{обм}} = Q_{\text{лб}} \cdot R_{\text{лб}} \\ \tau_{\text{ст}} = (Q_{\text{ст}} + Q_{\text{мс}}) \cdot R_{\text{ст}} \\ Q_{\text{лб}} \cdot R_{\text{лб}} = Q_{\text{мс}} \cdot R_{\text{ізпаз}} + (Q_{\text{ст}} + Q_{\text{мс}}) \cdot R_{\text{ст}} \end{cases} \quad (25)$$

У системі (25) маємо чотири невідомих:  $Q_{\text{лб}}$ ,  $Q_{\text{мс}}$ ,  $\tau_{\text{обм}}$ ,  $\tau_{\text{ст}}$ . Розв'язок цієї системи дозволяє знайти значення перевищення температури  $\tau_{\text{обм}}$  та  $\tau_{\text{ст}}$ . Обмежуючим є значення перевищення температури обмотки  $\tau_{\text{обм}}$ .

### 3.2 Методика розрахунку перевищення температури обмотки якоря та сталі якоря над температурою охолоджуючого повітря

Для того аби розв'язати систему рівнянь (25) необхідно попередньо визначити величини теплових опорів  $R_{\text{лб}}$ ,  $R_{\text{ст}}$ ,  $R_{\text{ізпаз}}$ , а також величини теплових потоків  $Q_{\text{об}} = p_{\text{м}}$  і  $Q_{\text{ст}} = p_{\text{ст}}$ .

Маючи геометричні розміри та конфігурацію поверхонь з яких віддається тепло, матеріал і товщину ізоляційних покриттів, а також характер і показники ефективності системи вентиляції, використовуючи вирази (16), (18) визначають величини теплових опорів  $R_{\text{лб}}$ ,  $R_{\text{ст}}$ ,  $R_{\text{ізпаз}}$ .

Втрати в міді обмотки якоря можуть бути отримані з наступної залежності [14]:

$$p_{\text{м}} = \left( \frac{I}{2 \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{N \cdot l_{\text{пр}}}{4600 \cdot S_{\text{пр}}}, \quad (26)$$

де  $I$  – струм навантаження, А;

$a$  – число пар паралельних віток обмотки;

$N$  – число провідників обмотки якоря;

$l_{\text{пр}}$  – довжина половини витка обмотки, см;

$S_{\text{пр}}$  – площа поперечного перерізу провідника, мм<sup>2</sup>.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарні втрати в сталі якоря машини при будь-якій частоті та індукції виражаються у вигляді [14]:

$$P_{ст} = P_{[1/50]} \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^\beta \cdot B^2 \cdot G_{ст}, \quad (27)$$

де  $P_{[1/50]}$  – питомі втрати при  $B = 1$  Тл і  $f = 50$  Гц, Вт/кг;

$f$  – частота перемагнічування сталі, Гц;

$\beta$  – показник степені, рівний для слабо легованих сталей  $\beta = 1,5$ ;

$B$  – розрахункова індукція в якорі машини, Тл;

$G_{ст}$  – маса якоря машини, кг.

Відомо, що методом теплових схем можна підрахувати перегріву тільки в стаціонарних режимах роботи електричної машини. Тобто, отриманий перегрів обмотки якоря  $\tau_{обм}$  в результаті розв'язання системи рівнянь (25) являється кінцевим при тривалій роботі машини із струмом навантаження  $I$ .

Найбільший інтерес представляють перехідні режими роботи двигуна і відповідно характер теплових процесів в цих режимах. Залежність, що дозволить визначити величину перегріву певної частини електричної машини на протязі заданого проміжку часу:

$$\tau_t = \tau_{кн} \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_я}\right)} \right) + \tau_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_я}\right)}, \quad (28)$$

де  $\tau_{кн}$  – кінцевий перегрів даної частини машини, °С;

$T_я$  – постійна часу нагрівання якоря двигуна, хв.;

$t$  – час перехідного процесу, хв.;

$\tau_0$  – початковий перегрів даної частини машини, °С.

Оскільки розрахунок величини перегріву якорної обмотки електричної машини досить трудомісткий процес, то доцільно його автоматизувати з допомогою спеціальних математичних програм на ЕОМ.

Розроблена відповідна програма та алгоритм (рис. 14), що дозволяє визначити величину перегріву  $\tau_t$ , якірної обмотки електричного двигуна ДК-409 в перехідному режимі його роботи.



Рисунок 14 – Алгоритм визначення величини перегріву якірної обмотки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 3.3 Оцінка величини перегріву ізоляції двигуна ДК-409 в неномінальних умовах роботи

Під номінальними умовами роботи будемо вважати струм електродвигуна  $I_{\text{ном}} = 4,65$  А; напругу живлення  $U_{\text{ном}} = 1500$  В (напруга в контактній мережі теж повинна бути номінальною), тривалість ввімкнення  $TВ=50\%$  при тривалості циклу  $t_{\text{ц}}=10$  хв – згідно з паспортними даними компресора ЕК-7Б, а час роботи  $t_p$  дорівнює часу паузи  $t_{\text{п}}$  і складає 300 с, значення еквівалентного струму під час запуску при температурі навколишнього середовища  $+20^{\circ}\text{C}$  складає 9,62 А [13].

До неномінальних режимів роботи електродвигуна компресора віднесемо пуск та робота при зниженій температурі навколишнього середовища; збільшення часу роботи в циклі, тобто збільшення тривалості ввімкнення ТВ.

Відомо, що температура навколишнього середовища впливає на механічні характеристики компресора, а саме призводить до суттєвого збільшення моменту опору при старті, а значить і до підвищення струму в його електродвигуні [10]. Експериментальні дослідження поршневого компресора типу Е-500 (подібний за конструкцією і умовами роботи до компресора ЕК-7Б) показали, що із зниженням температури навколишнього середовища момент опору при першому старті може збільшитись в два і більше рази у порівнянні з пусковим моментом для температури навколишнього середовища  $+20^{\circ}\text{C}$  [10].

Таким чином, збільшення моменту опору в компресорі призводить до збільшення значення еквівалентного струму в якірній обмотці двигуна, а відповідно створює передумови до перегріву ізоляції обмотки якоря електродвигуна. В табл. 2 наведені розрахунки значень перегрівів ізоляції якірної обмотки електродвигуна ДК-409 наприкінці пуску в умовах знижених температур навколишнього середовища, значення еквівалентних струмів взяті з джерела [5]. Тривалість важкого пуску береться в діапазоні від 2 секунд до 8 секунд при тривалості нормального пуску 1,2 секунди [13].

Аналізуючи результати розрахунків (табл. 2) можна бачити, що важкий пуск тривалістю 8 секунд при температурі навколишнього середовища  $-10^{\circ}\text{C}$  дає значення перегріву ізоляції якірної обмотки  $127,2^{\circ}\text{C}$ . Враховуючи, що в електродвигуні ДК-409 використовуються ізоляційні матеріалу класу

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагрівостійкості В (допустиме значення перегріву складає 120°C), то маємо перевищення допустимого значення перегріву на 127,2°C–120°C=7,2°C.

Таблиця 2 – Результати розрахунків величини перегріву ізоляції якірної обмотки ДК-409 в умовах знижених температур навколишнього середовища

Величина		Значення перегріву ізоляції наприкінці пуску, °C		
		0	–10	–20
Температура навколишнього середовища, °C		0	–10	–20
Значення еквівалентного струму, А		26,95	27,13	28,2
Тривалість пуску, с	2	31,8	32,2	34,8
	4	63,3	64,12	69,3
	6	94,5	95,8	103,5
	8	125,5	127,2	137,42

Строк служби ізоляції класу В, може бути визначено емпіричною формулою [15]:

$$T_B = 8 \cdot 10^5 \cdot e^{-0,094 \cdot \tau}, \quad (29)$$

де  $T_B$  – термін служби ізоляції, що вимірюється роками;

$\tau$  – перегрів ізоляції, °C.

Нормативний строк експлуатації ізоляції електродвигуна ДК-409 складає 10 років [16]. Тоді для перегріву в 127,2°C у відповідності з виразом (29) будемо мати розрахунковий строк експлуатації ізоляції 5,1 роки, що майже вдвічі менше нормативного.

Як зазначалось вище, також до порушень теплових умов роботи ізоляції електродвигуна може призводити збільшення часу роботи в циклі, тобто збільшення тривалості ввімкнення ТВ. Причин, що призводять до збільшення значення ТВ може бути декілька: значні втрати стисненого повітря в пневмосистемі; значний знос механічної частини компресора.

З використанням теплової моделі були розраховані та побудовані графіки зміни перегріву в часі (рис. 15, 16 та 17)  $\tau = f(t)$  для ТВ=60, 70 та 80% та температури навколишнього середовища +20°C.

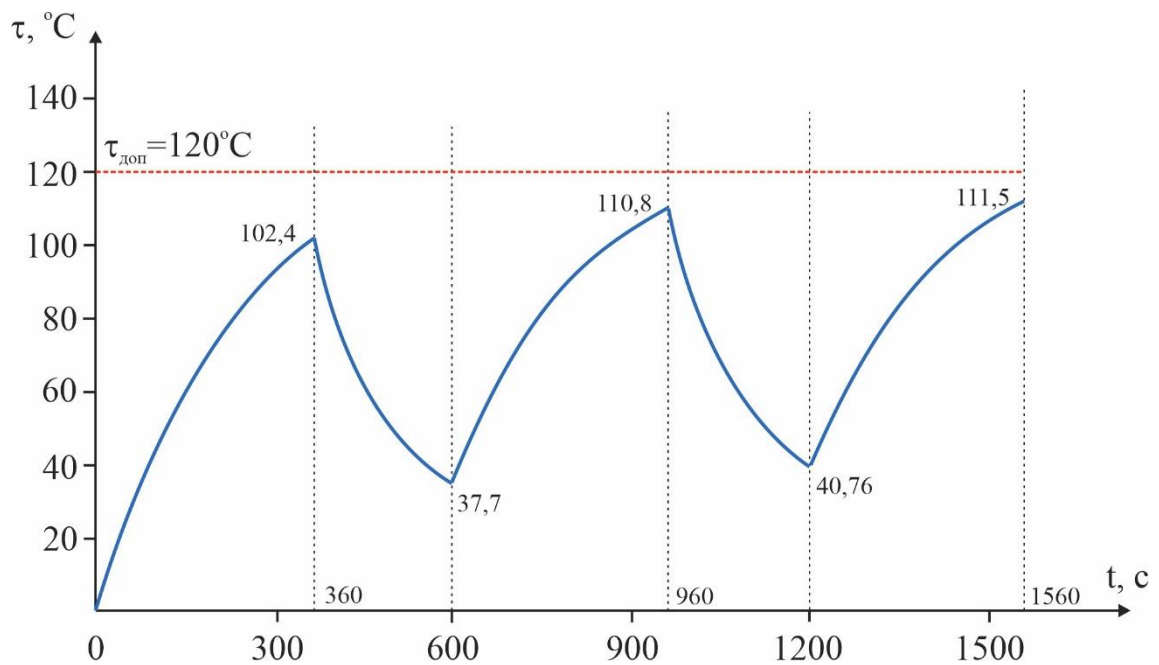


Рисунок 15 – Графік перегріву ізоляції якоря електродвигуна ДК-409 при роботі з ТВ=60%

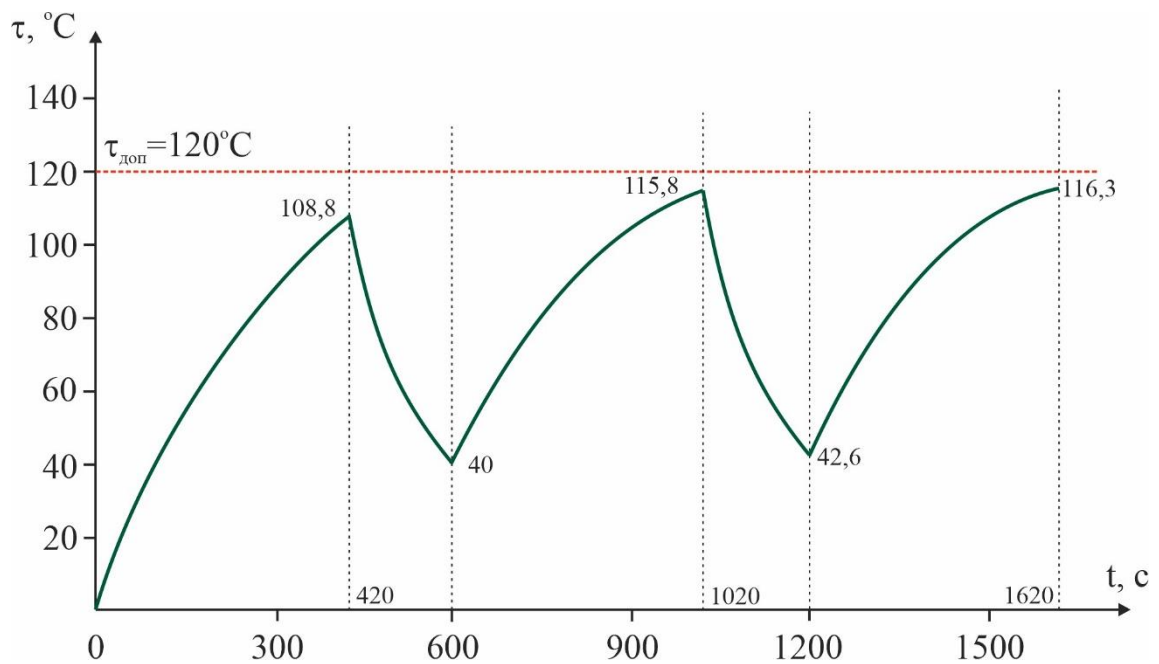


Рисунок 16 – Графік перегріву ізоляції якоря електродвигуна ДК-409 при роботі з ТВ=70%

Збільшення тривалості ввімкнення з нормативного значення ТВ=50% до ТВ=60, 70 %, попри перевантаження не призводить до критичних перегрівів ізоляції електродвигуна. Однак, коли величина тривалості ввімкнення сягає ТВ=80% електродвигун в другому циклі нагрівання-охолодження отримує величину перегріву ізоляції якоря на рівні 123,3°C, що на 3,3°C перевищує

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

допустиме значення для даного класу ізоляційних матеріалів. Причому, в наступних циклах ситуація з перегрівом тільки погіршується (рис. 17).

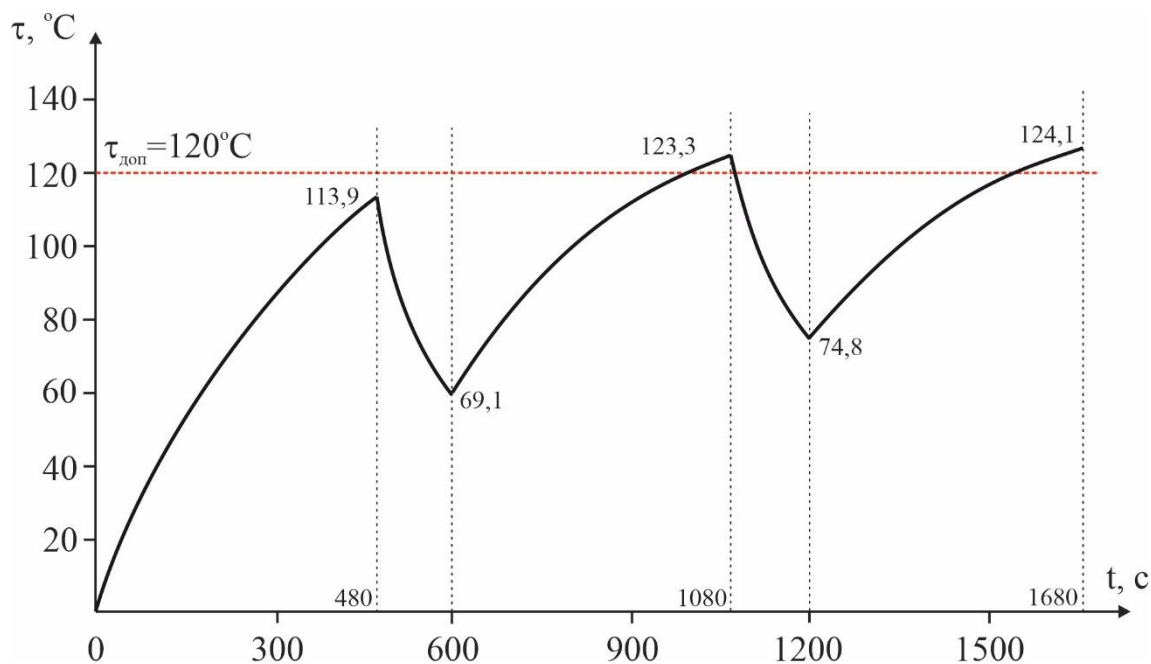


Рисунок 17 – Графік перегріву ізоляції якоря електродвигуна ДК-409 при роботі з ТВ=80%

Але найнебезпечнішою може виявитись ситуація, коли умови важкого пуску та збільшення ТВ поєднуються. На рис. 18 наведено графік зміни перегріву в часі  $\tau = f(t)$  для ТВ=60% та температури навколишнього середовища  $-20^{\circ}\text{C}$ .

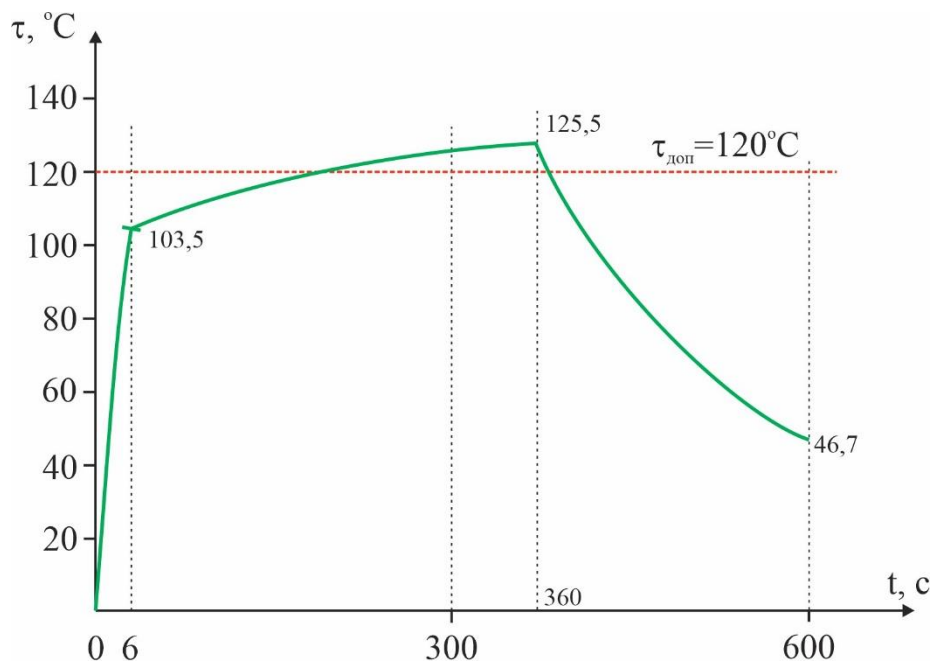


Рисунок 18 – Графік перегріву ізоляції якоря електродвигуна ДК-409 при роботі з ТВ=60% та температурі навколишнього середовища  $-20^{\circ}\text{C}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

В цьому випадку незначне підвищення ТВ в поєднанні з пуском при температурі навколишнього середовища  $-20^{\circ}\text{C}$  гарантовано дає зменшення строку експлуатації ізоляції до 6,8 років.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

## РОЗДІЛ 4

### ЗАХОДИ ПО УСУНЕННЮ ПРИЧИН, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ПЕРЕВИЩЕННЯ ПЕРЕГРІВІВ ОБМОТОК ЇХ ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ

Недоліком типової схеми захисту силових кіл мотор-компресора є нечітке і ненадійне спрацювання теплових реле ТР2 (типу ТРК-8,5) з одного боку і можливість перегріву ізоляції обмоток якоря при певних умовах з другого боку. Реле ТРК-8,5 дає команду на розмикання кола живлення двигуна компресора, якщо через нього протікає струм 12...15 А. При струмі 12 А теплове реле спрацьовує через 60 секунд, при струмі 30 А – через 2,5 секунди. При певних умовах пуску компресора (наявність суттєвого нагріву ізоляції під час попередніх пусків, досить низька температура навколишнього середовища, тощо) ізоляція класу В, яка застосовується у двигунах типу ДК-409 (ДК-406) може мати перегрів більше допустимого значення, що призводить до суттєвого зменшення терміну служби вказаних двигунів.

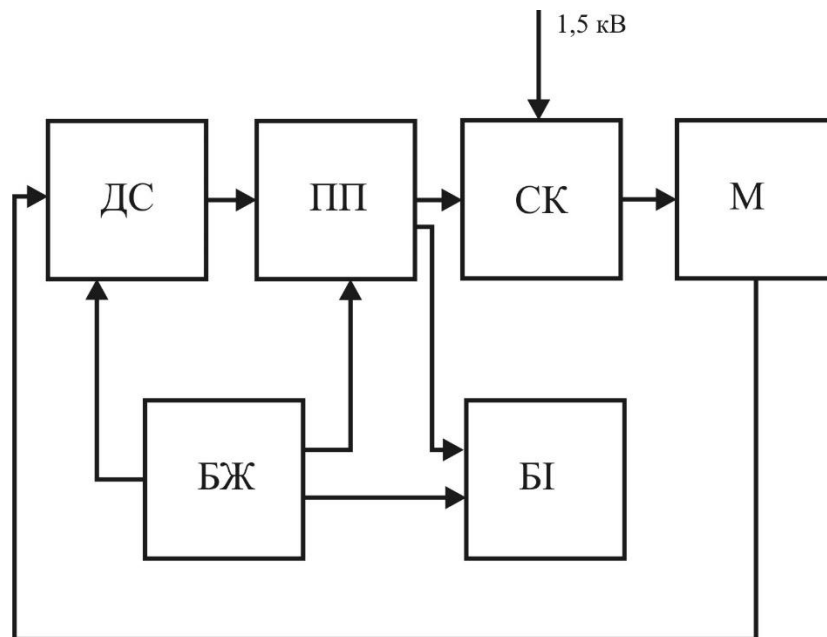


Рисунок 19 – Структурна схема уніфікованого пристрою захисту двигуна компресора

Сучасна елементна база дозволяє розробити захист, який зможе забезпечити відключення електродвигуна при його перевантаженні за будь-який заданий проміжок часу з найменшим відхиленням. Структурна схема такого уніфікованого пристрою захисту показана на рис. 19.

До складу структурної схеми (рис. 19) входить: датчик струму (ДС), пристрій порівняння (ПП), силовий ключ (СК) і електродвигун компресора (М). Датчик струму перетворює струм силового кола в напругу, що надалі використовується для порівняння з табличними значеннями апроксимації. Пристрій порівняння призначений для визначення граничних режимів роботи захисту в цілому:

1. перевантаження по максимальному струмі – максимальний захист;
2. перевантаження тривалим струмом – тепловий захист.

Електроживлення реалізується за допомогою блоку живлення (БЖ). Блок індикації (БІ) призначений для сигналізації режимів роботи блоку живлення та пристрої порівняння. Датчик струму повинен забезпечити гальванічну розв'язку силових кіл і кіл керування. Силовий ключ забезпечує відпрацьовування керуючого сигналу, який поступає від вузла порівняння, тобто у випадку спрацьовування по граничному режимі (максимальний або тепловий захист). Силовий ключ відключає мотор-компресор від живлячої напруги.

Уніфікований блок захисту заміняє собою два захисних реле якірного кола мотор-компресора: реле перевантаження компресора РПК типу Р-103 (з механізмом повернення Р-102) і теплового реле ТР2 типу ТРК-8,5.

Відмітимо, що реле РПК та ТР2, які здійснюють захист кола якоря двигуна компресора відповідно від струмів к.з. та струмів перевантаження за конструкцією є електромеханічні пристрої.

Реле РПК складається із двох частин: високовольтної (реле типу Р-103), яка контролює струм перевантаження, та низьковольтної (реле типу Р-102), яка виконує функції механізму повернення. Обидві частини працюють у сполученні одна з одною по виконанню своїх функцій. Реле Р-103 являє собою конструкцію клапанного типу, на магнітопроводі якого встановлена силова котушка, ввімкнена послідовно із електричним колом, яке захищається. Ізоляційна планка, яка закріплена на якорі і розрахована на повну напругу силового кола (1,5 кВ), діє на низьковольтну частину. При проходженні по силовій котушці струмів перевантаження якір реле притягується до осердя, планка вдаряє по упору та повертає валик механізму повернення. Валик, повертаючись, визволяє від зачіпки якір низьковольтного реле, на якому закріплені блок-контакти. Відбувається їх

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

замикання або розмикання. При виключенні струму у силовому колі якір реле Р-103 відпадає та займає вихідне положення. Для відновлення реле достатньо короткочасно подати напругу на його котушку. При цьому якір притягується та запирає зачіпку. У верхній частині панелі біля кожного реле знаходиться прапорець-сигналізатор, який при спрацюванні реле виходить із зачеплення та опускається. Регулювання уставки реле здійснюється зміною натягу пружини з допомогою регулювальних гайки та гвинта.

Теплове реле ТР2 (типу ТРВ-8,5) має звичайну для теплових реле (на базі біметалічної пластини) конструкцію.

Недоліки вказаних пристроїв очевидні: багато складових частин, які переміщуються; значні габарити, вага, а саме головне, з точки зору захисту електричних кіл від перевантажень та перегріву ізоляції, – відносно великий час спрацювання.

Тому пропонується уніфікований блок захисту на сучасній напівпровідниковій елементній базі, який виконує вищевказані функції реле РПК та ТР2, але не має вказаних недоліків, а головне значно збільшує швидкодію захисту.

Окрім удосконалення пристроїв захисту мотор-компресора суттєво покращити ситуацію з тепловим перевантаженням електричного двигуна ДК-409 можна підвищивши клас ізоляції обмотки якоря, наприклад, перейшовши від класу В до ізоляційних матеріалів класу нагрівостійкості F.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## РОЗДІЛ 5

### ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТІ КОМПРЕСОРІВ ТА КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК

Причини аварій при експлуатації компресорних установок.

При експлуатації компресорних установок може статися вибух, основними причинами якого є [17]:

- Неправильний монтаж, незадовільне обслуговування і утримання;
- Перегрівання стінок компресора внаслідок значного підвищення температури стисненого повітря;
- Порушення роботи системи змащування, низька якість мастильних речовин, загоряння і вибух парів змащувальних речовин, самоспалахування газоповітряної суміші;
- Перевищення допустимого тиску;
- Засмоктування забрудненого повітря;
- Накопичення нагару, відкладання окислів заліза на холодних частинах системи;
- Несправність контрольного манометра, запобіжних клапанів та інших приладів безпеки;
- Виникнення зарядів статичного струму на корпусі при інтенсивному витрачанні стисненого повітря.

Найбільш поширеною причиною аварій компресорів є підвищення розрахункового тиску і температури, що призводить до зміни структури металу, порушення його механічної цілісності, а відтак і до вибуху.

Контроль і регулювання величини тиску стисненого повітря у компресорі здійснюється запобіжними клапанами, які встановлюються на всіх ступенях стиснення і автоматичним регулятором тиску, який при перевищенні допустимого тиску переводить компресор на холостий хід.

Запобіжні клапани автоматично знижують тиск до нормального і випускають надлишок повітря в атмосферу. Тиск повітря (при робочому від 3 до 60 атм.) регулюється так, щоб не перевищувати робочий понад 15 %. Запобіжні клапани

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевіряються під тиском один раз на місяць. Один раз на 6 місяців випробовуються всі манометри контрольним манометром, який у свою чергу перевіряється один раз на рік.

Вимоги безпеки при обслуговуванні компресорних установок [17].

Усім робітникам, що обслуговують компресорні установки, видається інструкція з безпечної їх експлуатації. До обслуговування компресорних установок допускаються особи не молодші 18 років, які мають посвідчення на право їх експлуатації, відповідний стан здоров'я та знання з питань промислової і пожежної безпеки.

Перед початком роботи машиніст зобов'язаний впевнитись у справності установки, перевірити систему змащування, охолодження і здійснити пуск відповідно до Інструкції.

Перед пуском компресора у роботу необхідно встановити продувальні крани холодильника і повітрозбірника, а також роздавальний вентиль у положення «Відкрито». Включивши двигун перевірити роботу компресора на холостому ходу, закрити спочатку роздавальний вентиль, а потім продувні крани. Після цього за допомогою роздавального вентиля або продувних кранів відрегулювати робочий тиск повітря у повітрозбірнику (ресивері).

При роботі компресорних установок обслуговуючий персонал веде щозмінний запис про витрату компресорного масла. Витрата масла для змащування циліндрів і сальників контролюється кожну зміну. Вона не має перевищувати величину, вказану у заводській інструкції.

Зберігають масло у приміщенні компресорної установки тільки у спеціальному оцинкованому посуді з написом «Чисте компресорне масло» у кількості, що не перевищує тижневої потреби.

Обслуговуючий персонал під час роботи компресорної установки має контролювати [17]:

- тиск і температуру повітря після кожного ступеня стиснення та після холодильників;
- безперервність надходження у компресори і холодильники охолодженої води;

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- тиск, температуру і рівень масла у системі змащування.

У журналі роботи машиніст має записувати час пуску і зупинки компресора, причину зупинки, проведені періодичні перевірки запобіжних клапанів і манометрів, спуск конденсату і масла і т. ін.

Журнал роботи перевіряється і щодобово підписується особою, яка відповідає за безпечну експлуатацію компресорної установки. На кожную компресорну установку, що знаходиться у роботі, має бути заведена технічна документація відповідно до Правил та інших регламентів.

Компресорну установку негайно зупиняють у випадках, якщо:

- манометри на будь-якому ступені компресії показують тиск, що перевищує допустиму межу;
- манометр системи змащування механізму руху показує тиск, нижчий від допустимої нижньої межі;
- раптово припинилася подача води для охолодження;
- відчутні стуки, удари в компресорі або в двигуні, чи виявлені інші несправності, що можуть призвести до аварії;
- температура стисненого повітря вища за гранично допустиму норму, встановлену паспортними даними;

Усувати будь-яку несправність, виявлену на контрольно-вимірювальних приладах, дозволяється тільки у присутності особи, яка несе повну відповідальність за безпечну експлуатацію компресорної установки.

Операції необхідно виконати перед початком роботи компресорів [17].

Перед початком роботи необхідно перевірити стан і надійність кріплення арматури, захисного заземлення, контрольно-вимірювальних і сигнальних приладів, а також наявність і справність пломб на запобіжних клапанах, манометрах та іншій апаратурі, яка має бути опломбованою.

Кожний запобіжний клапан компресорної установки має бути відрегульований і опломбований, мати пристрій для його примусового відкривання під час роботи, натяжні гайки пружинних запобіжних клапанів також мають бути опломбованими. Вантаж важільних запобіжних клапанів після регулювання закріплюють,

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

закривають металевими, кожухами і опломбовують. Після регулювання запобіжних клапанів необхідно скласти відповідний акт.

Відносна вологість повітря, що засмоктується у компресор, не може перевищувати 60%. До подачі повітря у циліндри компресора, його необхідно очистити від пилу, бризок масла, водяної пари і інших забруднень. Потрапляння забрудненого повітря у компресор веде до тертя, що утворює заряд статичного струму. Довжина іскри при цьому може досягати 20 мм. Захистом від статичного струму передбачено влаштування заземлення.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В роботі проведений аналіз факторів, що впливають на надійність роботи електропривода компресора ЕК-7Б. Встановлено, що найбільший відсоток виходів з ладу електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б відбувається по причині прогару обмотки якоря (тепловий пробій ізоляції якірної обмотки). Ймовірними причинами цього є

- недосконалий тепловий захист електродвигуна компресора;
- робота мотор-компресора з невідповідною тривалістю включення (ТВ);
- перевантаження електродвигуна компресора надвисокими струмами.

Одним з найрозповсюдженіших підходів по вивченню процесів в технічних системах є їх моделювання. Серед усіх видів моделей на сьогоднішній день група методів прикладної математики найчастіше використовується інженерами-практиками.

В роботі для оцінки теплового стану електричної машини використано метод теплових схем, який ґрунтується на подані елементів машини у вигляді вузлів (джерел теплоти) з тепловиділенням у них, усередненим по всьому об'єму елемента.

Автором розроблено теплову схему заміщення якоря електродвигуна ДК-409, яка покладена в основу методики розрахунку перевищення температури обмотки якоря та сталі якоря над температурою охолоджуючого повітря.

За результатами моделювання встановлено, що в неномінальних умовах роботи мотор-компресора можливе перевищення допустимої величини перегріву ізоляції якірної обмотки, що призводить до скорочення строку експлуатації ізоляції майже у два рази. Отримані результати корелюються з даними статистики виходу з ладу мотор-компресорів на прикладі Дніпровського локомотивного депо.

Враховуючи отримані результати, для підвищення надійності роботи електропривода мотор-компресора, можна рекомендувати:

- модернізацію пристроїв захисту з використанням сучасної мікроелектроніки (запропонована структура уніфікованого пристрою захисту);

					6.141.200120.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

- перехід до застосування ізоляційних матеріалів в обмотці якоря більш високого класу нагрівостійкості, наприклад класу F.

Розглянуті вимоги безпеки при експлуатації та ремонті компресорів та компресорних установок.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фришев С.Г., Мельник І.І., Бондар С.М. Загальний курс транспорту: Навч. Посібник. – К.: Вища освіта, 2006.- 162 с.
2. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України; Стратегія від 30.05.2018 № 430-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#n13>
3. Безрученко В.М. Тягові електричні машини електрорухомого складу / В.М. Безрученко, В.К. Варченко, В.В. Чумак. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
4. Вплив умов експлуатації на надійність двигунів компресорів електропоїздів постійного струму [Текст] / Л. В. Дубинець та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. № 18 – С. 29-31.
5. Краснов, Р.В. Оцінка впливу перегріву ізоляції електродвигуна компресора електропоїзда постійного струму EP-1, EP-2 при неномінальних режимах роботи на термін її служби [Текст] / Р.В. Краснов // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2011.– Вип. 86. – С. 167-171.
6. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навчальний посібник. – Київ: НАУ, 2017. – 392 с.
7. Математичне моделювання новітніх технологічних систем.: Монографія/ Матвійчук В.А., Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А. – Вінниця: 2021. – 193 с.
8. Цукало П. В., Єрошкін Н. Г. Електропоїзда EP2 і EP2P. – М: Транспорт, 1986. – 359 с.
9. Устименко, Д. В. Аналіз впливу зміни режиму роботи на ступінь нагріву ізоляції обмотки якоря електродвигуна поршневого компресора / Д. В. Устименко, Р. В. Краснов, А. В. Мазур // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 42. – С. 138–141.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Краснов Р. В. Аналіз роботи існуючого захисту електродвигунів ДК-409 компресорів електропоїздів ЕР1, ЕР2. Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2014. – Вип. 37. – С. 103–108.
11. Стеценко І. В. Моделювання систем: навч. посіб. [Електронний ресурс, текст] / І.В. Стеценко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2010. – 399 с.
12. Теплові розрахунки електричних машин: навч. посібник / М. О. Осташевський, О. М. Петренко, О. Ю. Юр'єва – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. – 450 с.
13. Краснов Р. В. Дослідження впливу пуску та роботи електродвигуна (ДК-409) компресора (ЭК-7Б) при номінальних параметрах на нагрівання ізоляції якоря / Р. В. Краснов, А. В. Шаповалов // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 1. – С. 82–84.
14. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів: Ви-во Львівської політехніки, 2011. – 464 с.
15. Вольдек А. И. Електричні машини [Текст] / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
16. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ – 0063: Затв. і введено в дію наказом Міністерства транспорту України від 27.02.2003 р. № 53Ц. – К.: Мін-во трансп. та зв'язку України, 2003. – 281 с.
17. Москальова В.М. Основи охорони праці: Підручник. – К.: ВД «Професіонал», 2005. – 672с.

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

- 1) Фактори, що впливають на надійність роботи електропривода компресора ЕК-7Б;
- 2) Теплова еквівалентна схема заміщення якоря ДК-409;
- 3) Оцінка величини перегріву ізоляції електродвигуна ДК-409 в неномінальних умовах роботи;
- 4) Рекомендації по підвищенню експлуатаційної надійності мотор-компресора ЕК-7Б;

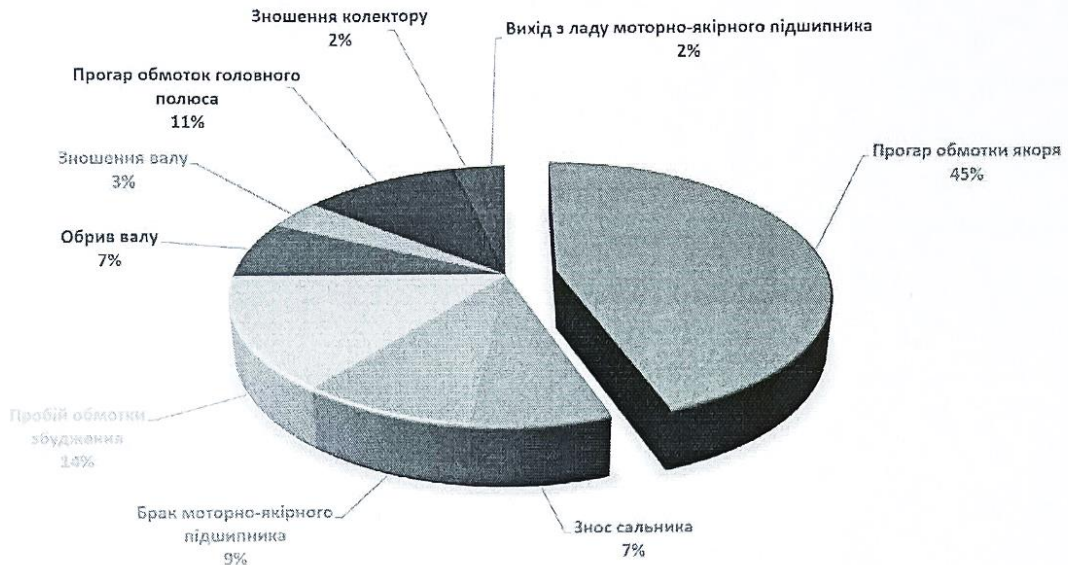
					6.141.200120.ПЗ	Лист
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

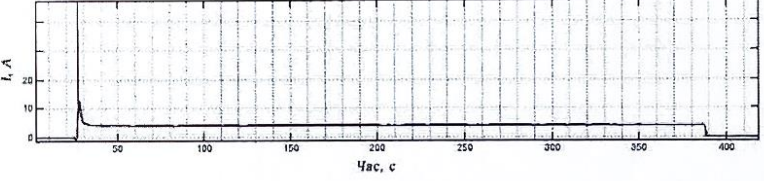
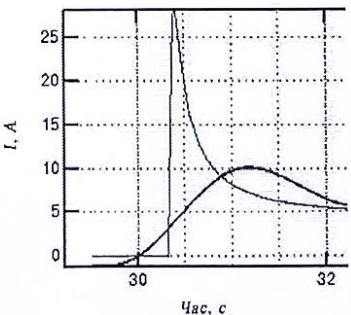
**ДОДАТОК А**  
**Графічні роботи**

					6.141.200120.ПЗ	Лист
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					Фактори, що впливають на надійність роботи електропривода компресора ЕК-7Б			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
					Додаток А 6.141.200120.01	Стад.	Аркуш	Аркушів
Зав. кафед.	Муха А.М.						50	53
Н. контр.	Карзова О.О.					Український державний університет науки і технологій, група ЕП20120		
Осн. керів.	Устименко Д.В.							
Розробив	Баяновський О.А.							

## Статистика виходу з ладу електродвигунів ДК-409 компресора ЕК-7Б



Ймовірні причини, що призводять до виходу з ладу електричного двигуна через прогар обмотки якоря	
1	<p>Недосконалий тепловий захист електродвигуна компресора</p> <p>Для захисту силового кола компресора від струмів в діапазоні 4,65...30 А передбачено теплове реле ТРВ-8,5, коли струм сягає 35 А і більше – спрацьовує реле перевантаження Р-103. Експериментально встановлено, що в деяких випадках, ТРВ-8,5 при струмі 12 А спрацьовує аж через 1050 секунд, при нормативних 60 секундах</p>
2	<p>Робота мотор-компресора з невідповідною тривалістю включення (ТВ)</p> <p>Нормативне значення <math>T_B=50\%</math> при тривалості циклу 10 хв. (час роботи <math>t_p</math> дорівнює часу паузи <math>t_{п}</math> і складає 300 с.)</p>  <p>На експериментально отриманій осцилограмі струму тривалість робочого періоду <math>t_p=363</math> с., що на 63 с. перевищує нормативне значення.</p>
3	<p>Перевантаження електродвигуна компресора надвисокими струмами при роботі в неномінальних режимах</p>  <p>Пікова величина струму сягає значення близько 27 А, що в 5,8 рази перевищує його номінальне значення. Враховуючи досвід отриманий для компресора Е-500 можна припустити, що зимовий пуск ЕК-7Б буде супроводжуватись значними короткочасними перевантаженнями за струмом (в 10 і більше разів)</p>

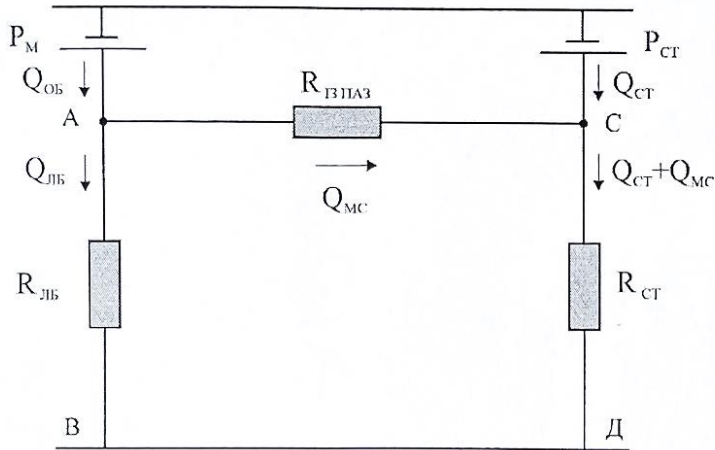
Фактори, що впливають на надійність роботи електропривода компресора ЕК-7Б				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.		Муха А.М.	<i>[Signature]</i>	08.06
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>[Signature]</i>	08.06
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>[Signature]</i>	20.06
Розробив		Баяновський О.А.	<i>[Signature]</i>	19.06

Додаток А  
6.141.200120.01

Стад.	Аркуш	Аркушів
	50	53

Український державний університет науки і технологій, група ЕП20120

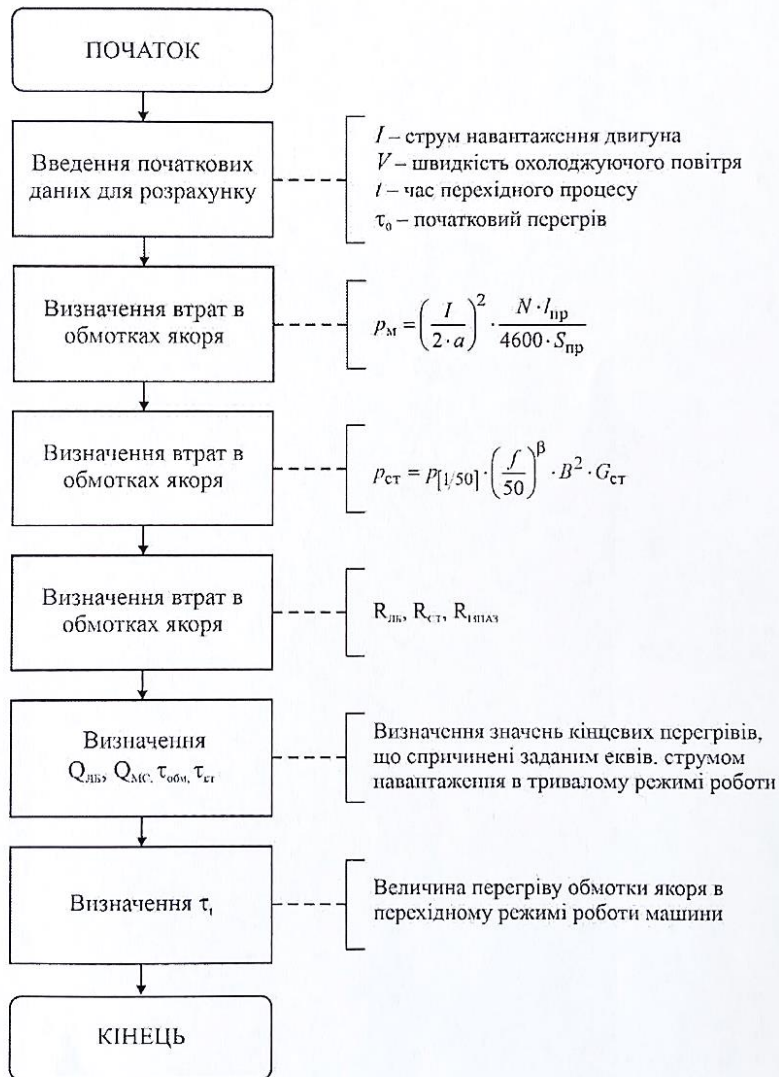
## Еквівалентна теплова схема якоря електродвигуна ДК-409



$$\begin{cases} Q_{об} = Q_{лб} + Q_{мс} \\ \tau_{обм} = Q_{лб} \cdot R_{лб} \\ \tau_{ст} = (Q_{ст} + Q_{мс}) \cdot R_{ст} \\ Q_{лб} \cdot R_{лб} = Q_{мс} \cdot R_{изпаз} + (Q_{ст} + Q_{мс}) \cdot R_{ст} \end{cases}$$

Розв'язок цієї системи дозволяє знайти значення перевищення температури  $\tau_{обм}$  та  $\tau_{ст}$ . Обмежуючим є значення перевищення температури обмотки  $\tau_{обм}$ .

### Алгоритм визначення величини перегріву якорної обмотки



Теплова еквівалентна схема заміщення якоря ДК-409				
Змп.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.	Муха А.М.		<i>[Signature]</i>	<i>[Date]</i>
Н. конгр.	Карзова О.О.		<i>[Signature]</i>	<i>[Date]</i>
Осн. керів.	Устименко Д.В.		<i>[Signature]</i>	20.08.
Розробив	Баяновський О.А.		<i>[Signature]</i>	19.08.

Додаток А 6.141.200120.02	Стад. Аркуш Аркушів
	51      53
Український державний університет науки і технологій, група ЕП20120	

Результати розрахунків величини перегріву ізоляції якірної обмотки ДК-409 в умовах знижених температур навколишнього середовища

Величина	Значення перегріву ізоляції наприкінці пуску, °C			
Температура навколишнього середовища, °C	0	-10	-20	
Значення еквівалентного струму, А	26,95	27,13	28,2	
Тривалість пуску, с	2	31,8	32,2	34,8
	4	63,3	64,12	69,3
	6	94,5	95,8	103,5
	8	125,5	127,2	137,42

Нормативний строк експлуатації ізоляції електродвигуна ДК-409 складає 10 років. Тоді для перегріву в 127,2°C у відповідності з виразом:

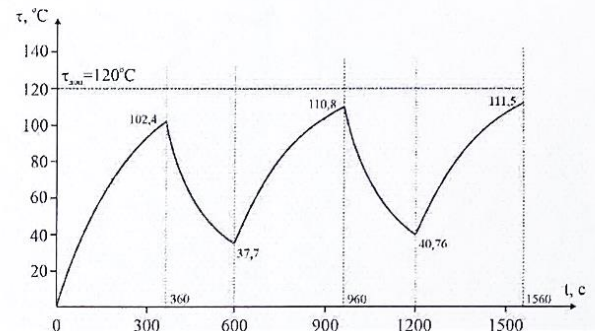
$$T_B = 8 \cdot 10^5 \cdot e^{-0,094 \cdot \tau}$$

маємо розрахунковий строк експлуатації ізоляції 5,1 роки, що майже вдвічі менше нормативного.

Графіки  $\tau = f(t)$  для ТВ=60, 80%

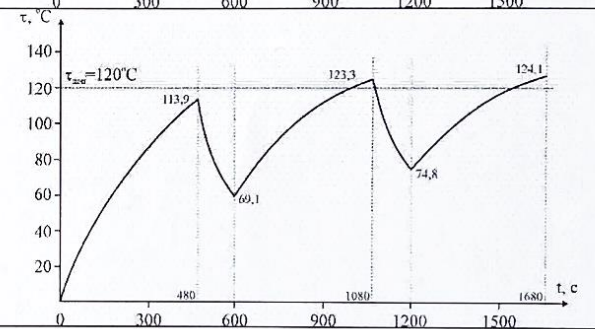
ТВ=60%

Величина перегріву не перевищує допустимого значення



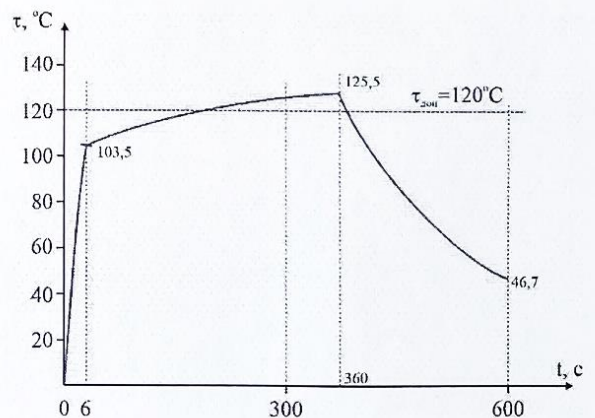
ТВ=80%

Величина перегріву ізоляції якоря на рівні 123,3°C, що на 3,3°C перевищує допустиме значення для даного класу ізоляційних матеріалів



ТВ=60% та температура навколишнього середовища -20°C

В цьому випадку незначне підвищення ТВ в поєднанні з пуском при температурі навколишнього середовища -20°C гарантовано дає зменшення строку експлуатації ізоляції до 6,8 років



Оцінка величини перегріву ізоляції електродвигуна ДК-409 в ненормальних умовах роботи

Змц.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.		Муха А.М.	<i>[Signature]</i>	19.06
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>[Signature]</i>	19.06
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>[Signature]</i>	19.06
Розробив		Баяновський О.А.	<i>[Signature]</i>	19.06

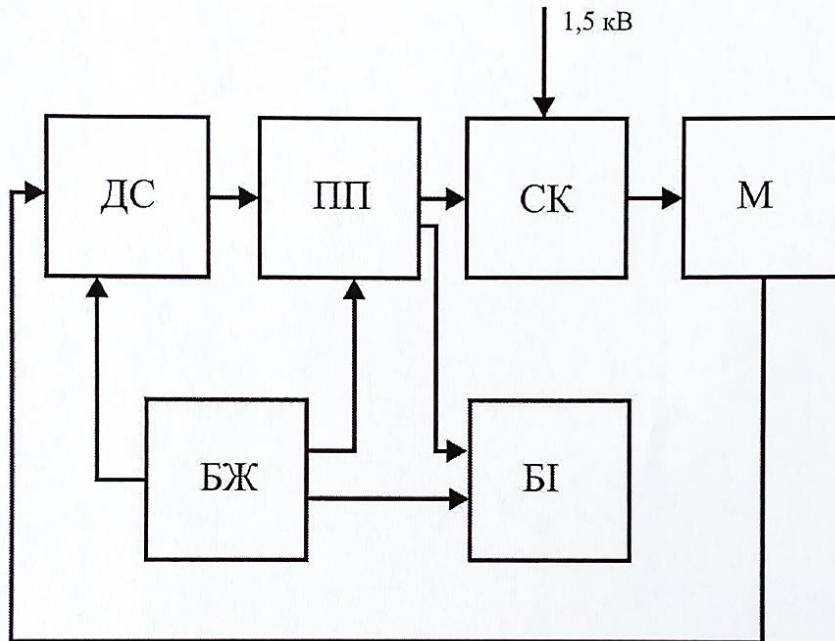
Додаток А  
6.141.200120.03

Стад.	Аркуш	Аркушів
	52	53
Український державний університет науки і технологій, група ЕП20120		

Рекомендовані заходи по усуненню причин, що призводять до перевищення перегрівів обмоток їх допустимих значень

1	Модернізація пристроїв захисту з використанням сучасної мікроелектроніки (запропонована структура уніфікованого пристрою захисту)
2	Перехід до застосування ізоляційних матеріалів в обмотці якоря більш високого класу нагрівостійкості, наприклад класу F

Структурна схема уніфікованого пристрою захисту двигуна компресора



До складу структурної схеми входить:

- датчик струму (ДС);
- пристрій порівняння (ПП);
- силовий ключ (СК);
- електродвигун компресора (М);
- блок живлення (БЖ);
- блок індикації (БІ).

					Рекомендації по підвищенню експлуатаційної надійності мотор-компресора ЕК-7Б		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
			<i>[Signature]</i>		Стад.	Аркуш	Аркушів
Зав. кафедр.	Муха А.М.		<i>[Signature]</i>			53	53
Н. контр.	Карзова О.О.		<i>[Signature]</i>		Додаток А 6.141.200120.04 Український державний університет науки і технологій, група ЕП20120		
Осн. керів.	Устименко Д.В.		<i>[Signature]</i>	20.06			
Розробив	Баяновський О.А.		<i>[Signature]</i>	19.06			