

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕТЕМ
 /Андрій МУХА/
(підпис)

Дата 22.12.2023

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Аналіз впливу напруги живлення на тепловий стан електродвигуна поршневого компресора ДК-406(ДК409)»

за освітньою програмою: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»

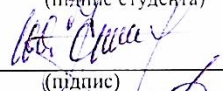
зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент
групи «ЕЕ2221»


(підпис студента)

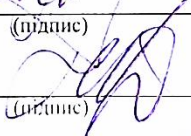
/Іван ГУРБІЧ/
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:


(підпис)

/доц. Дмитро УСТИМЕНКО/
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:


(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)

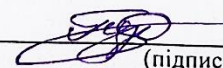
(підпис)

//

(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 «Management of energy and economic processes»
Department «Electrical engineering and electromechanics»

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: «Analysis of the effect of supply voltage on the thermal state of the DK-406(DK409) piston compressor electric motor»
according to educational curriculum «Energy and electromechanical systems in transport»
in the Speciality: «141 Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics»

Done by the student of the group EE2221:  /Ivan HURBICH/

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)

//

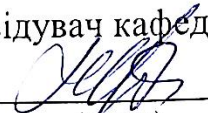
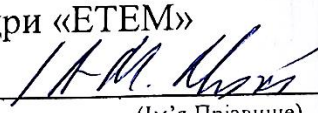
(position, name, surname)

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: магістр
Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
Спеціальність: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри «ЕТЕМ»

 (підпис)  (Ім'я Прізвище)

«01» 02 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
студенту Гурбіч Іван Сергійович

1. Тема роботи: «Аналіз впливу напруги живлення на тепловий стан електродвигуна поршневого компресора ДК406 (ДК409)»

Керівник роботи: Устименко Дмитро Володимирович, доцент
затверджені наказом № 56 ст від 18.01.2023

2. Строк подання студентом роботи: 04.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Електродвигун ДК-406(409) компресора ЕК-7Б

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

4.1 Аналітична частина: Вступ. Аналіз літературних джерел та нормативної документації зі вказаного питання. Актуальні підходи до аналізу теплового стану електричних машин. Оцінка факторів, що впливають на теплову навантаженість мотор-компресора.

4.2 Основна частина: Математична модель мотор-компресора та результати моделювання роботи системи при коливаннях напруги живлення. Теплова модель електродвигуна ДК-406 (ДК-409) та аналіз його теплового стану в залежності від величини напруги живлення.

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. Оцінка факторів, що впливають на тепловий стан електродвигуна. Методи оцінки теплової навантаженості машини;

2. Електрична схема увімкнення двигуна ДК-406(409) компресора ЕК-7Б. Аналіз умов та режиму його роботи;

3. Математична модель мотор-компресора і результати моделювання;

4. Теплова модель електродвигуна ДК-406(409) та аналіз його теплового стану в залежності від величини напруги живлення. Напрямки по покращенню умов експлуатації моро-компресора електрорухомого складу.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та нормативної документації зі вказаного питання.	13.11.2023	10%
2	Актуальні підходи до аналізу теплового стану електричних машин. Оцінка факторів, що впливають на теплову навантаженість мотор-компресора.	17.11.2023	15%
3	Математична модель мотор-компресора та результати моделювання роботи системи при коливаннях напруги живлення.	22.11.2023	25%
4	Теплова модель електродвигуна ДК406 (ДК409) та аналіз його теплового стану в залежності від величини напруги живлення.	28.11.2023	35%
5	Вимоги безпеки при експлуатації та ремонті компресорів.	30.11.2023	10%
6	Загальні висновки та додатки.	03.12.2023	5%
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	04.12.2023	-
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	18.12.-31.12.2023	-

Студент


(підпис)

Іван ГУРБІЧ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

доц. Дмитро УСТИМЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення	Назва	Кільк. арк.	№ екз.	Прим
1			<u>Документація загальна</u>			
2			Заново розроблена			
3	A4	7.141.190040.ПЗ	Пояснювальна записка			
4			Запозичена			
5			<u>Графічна частина</u>			
6			Заново розроблена			
7	A4	7.141.190040.01	Фактори, що впливають			
8			на працездатність			
9			електропривода компресора			
10	A4	7.141.190040.02	Електромеханічна модель			
11			електропривода			
12			компресора ЕК-7Б			
13	A4	7.141.190040.03	Теплова модель якоря			
14			(ротора) електродвигуна			
15			ДК-406(409)			
16	A4	7.141.190040.04	Аналіз теплового стану			
17			ДК-406(409) в залежності			
18			від величини напруги			
19			живлення та температури			
20			навколишнього середовища			
21						
22						
23			Запозичена			
24			<u>Електронна частина</u>			

					7.141.190040.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість кваліфікаційної роботи		
Розробив		Гурбін І.С.		25.12.			
Осн. керів.		Устименко Д.В.		27.12.			
Консульт.							
Н. контр.		Карзова О.О.		27.12.			
Зав. кафед.		Муха А.М.		27.12.	Стад.	Аркуш	Аркушів
						5	64
					МОН України, УДУНТ Кафедра «ЕТЕМ» Група ЕТ2221		

РЕФЕРАТ

Дипломна магістерська робота на тему «Аналіз впливу напруги живлення на тепловий стан електродвигуна поршневого компресора ДК-406(ДК409)» складається з 4 розділів та містить: 64 сторінок основного тексту, 4 таблиці, 22 рисунки, 22 літературних джерела, 2 додатки.

Мета роботи – аналіз впливу зміни напруги живлення електродвигуна ДК-406(ДК409) та температури навколишнього середовища на його тепловий стан шляхом комп'ютерного математичного моделювання.

Перший розділ присвячений статистиці виходу з ладу мотор-компресора ЕК-7Б, виявленню факторів, що найбільше впливають на втрату працездатності механізмом. Критичним фактором є прогар обмотки якоря. Ймовірними причинами поломок можуть бути: невідповідність фактичної тривалості увімкнення унормованій величині через відхилення напруги живлення від номінального значення та перевантаження струмом якоря двигуна в холодний період.

В розділ 2 представлена електромеханічна модель компресора та результати моделювання роботи системи при зміні напруги та температури навколишнього середовища.

В розділі 3 представлена теплова схема заміщення якоря електродвигуна ДК-406(409). Наведені результати обрахунків величини перегріву обмотки якоря електродвигуна при роботі з неномінальною напругою живлення (різною тривалістю увімкнення) та підвищеним моментом опору, який викликаний загусанням мастила в картері компресора за низьких температур.

В розділі 4 розглядаються питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОТОР-КОМПРЕСОР, МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕПЛОВА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, ТЕПЛОВИЙ ПОТІК, ІЗОЛЯЦІЯ, ПЕРЕГРІВ, НАПРУГА.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3MICT

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРИЧИН, ЩО ПРИВОДЯТЬ ДО ПЕРЕДЧАСНОГО ВИХОДУ З ЛАДУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕСОРА ЕК-7Б	11
1.1 Особливості конструкції та умов експлуатації поршневого компресора ЕК-7Б	11
1.2 Оцінка факторів, що впливають на працездатність електродвигуна ДК-406 (ДК-409) компресора ЕК-7Б.....	14
1.3 Методи аналізу теплового стану електричних машин.....	16
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МОТОР-КОМПРЕСОРА ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ПРИ КОЛИВАННЯХ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ	19
2.1 Аналіз та вибір середовища для комп'ютерного моделювання.....	19
2.2 Застосування системи MathCAD у завданнях моделювання електромеханічних систем	20
2.3 Математична модель електромеханічної системи компресора ЕК-7Б з електродвигуном ДК-406(409).....	22
2.4 Дослідження динаміки роботи поршневого компресора методом комп'ютерного моделювання в середовищі MathCAD.....	31
РОЗДІЛ 3 ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДК-406(409) ТА АНАЛІЗ ЙОГО ТЕПЛОВОГО СТАНУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВЕЛИЧИНИ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ	42
3.1 Теплова модель електродвигуна ДК-406(409).....	42
3.2 Аналіз впливу зміни напруги живлення на тепловий стан ДК-406(409)	47

					Пояснювальна записка				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз впливу напруги живлення на тепловий стан електродвигуна поршневого компресора ДК406 (ДК409)	Літ.		Маса	Масштаб
Розробив	Гурбіч І.С.			15.12.					1:1
Перевірив	Устименко Д.В.			27.11.					
Т. контр.									
Реценз.									
Н. контр.	Карзова О.О.			28.12	7.141.190040.ПЗ	Арк. 7		Аркушів 64	
Затвердив	Муха А.М.			28.12		Український державний університет науки і технологій, група ББ2221			

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

.....	54
4.1 Шкідливі виробничі фактори, що присутні при роботі з компресором та засоби захисту від них.....	54
4.2 Дії працівників депо в надзвичайних ситуаціях, що виникли під час ремонту чи обслуговування компресора ЕК-7Б.....	57
4.3 Вимоги пожежної безпеки на електропоїздах та депо де вони проходять ремонт та обслуговування	58
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	62
СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ.....	65
ДОДАТОК А.....	66
ДОДАТОК Б	70

ВСТУП

Транспортна система будь-якої країни світу є важливою галуззю, економічний розвиток держави неможливий без ефективного її функціонування [1]. В Україні транспортна діяльність дає суттєвий внесок у створення валової доданої вартості (ВДВ) – за даними Державної служби статистики України, її частка в середньому складає біля 13 %, а вартість основних засобів виробництва – 35 % від загальної вартості виробничого потенціалу країни, середньооблікова кількість штатних працівників галузі складає понад 900 тис. осіб [2]. Також потрібно мати на увазі, що транспорт в державі окрім чисто економічних функцій виконує ще і оборонні, соціально-політичні та культурні функції.

В трійку лідерів по вантажообігу України попадають: залізничний транспорт – 70 %, морський транспорт – 17 %, автомобільний транспорт – 10 % [2]. Рівень розвитку транспортної системи держави та його ефективність – одна з найважливіших ознак технологічного прогресу суспільства.

В структурі залізничного транспорту виділяють електрифіковані та не електрифіковані ділянки. Частка електрифікованих ділянок від загальної експлуатаційної довжини залізниць становить 45%, при цьому частка електротяги у загальному вантажообігу складає 89,7%. За абсолютною довжиною електрифікованих залізниць Україна займає 10 місце серед країн світу і 6 – серед країн Європи. Оптимальним для країн з розвинутою залізничною інфраструктурою є електрифікація 50...60% загальної довжини залізничних мереж країни з виконанням ними 90...95% загального обсягу перевезень [3]. Це автоматично ставить надійність та безвідмовність роботи систем електрифікованої залізничної тяги на перше місце як в процесі створення нових зразків так і під час модернізації уже існуючих.

Відповідними локомотивними депо Придніпровської залізниці накопичена статистична інформація, щодо експлуатації електропоїздів серій EP1, EP2, EP2T, яка показує передчасний вихід з ладу більшості компресорів типу ЕК-7Б з приводним електродвигуном ДК-406 (ДК-409) [4]. Основною причиною аварійного виходу з ладу є прогар обмотки якоря. Оскільки компресор виконує надважливу

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функцію живлення стисненим повітрям системи електропневматичних гальм електропоїзда, то аварія такого типу призводить до виведення рухомого складу з експлуатації. Ремонт пов'язаний з тривалим простоєм електропоїзда в депо, а відтак до зниження ефективності використання основних ресурсів залізниці. Крім того аварії такого типу пов'язані з безпекою руху.

Враховуючи вище викладене, питання дослідження умов роботи електроприводу компресора ЕК-7Б електропоїзда, встановлення причин та факторів, що призводять до передчасного виходу з ладу електричного двигуна ДК-406 (ДК-409), а також розробка напрямків вирішення проблеми безумовно є актуальною задачею.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРИЧИН, ЩО ПРИВОДЯТЬ ДО ПЕРЕДЧАСНОГО ВИХОДУ З ЛАДУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕСОРА ЕК-7Б

1.1 Особливості конструкції та умов експлуатації поршневого компресора ЕК-7Б

Кожний вагон електропоїздів серій EP1, EP2, EP2T, EP2P має власну пневматичну мережу, яка складається з двох основних ліній – напірної та гальмівної. На причіпних і головних вагонах встановлені компресори типу ЕК-7Б для створення і підтримання в напірній магістралі тиску стисненого повітря на рівні 6,5...8,0 кгс/см² [5]. Компресор ЕК-7Б це одноступінчастий двоциліндровий поршковий апарат горизонтального виконання, який на електропоїздах серії EP1, EP2 приводиться в рух від електричного двигуна постійного струму послідовного збудження ДК-406(409), а на електропоїздах серії EP2T, EP2P – від трифазного асинхронного електродвигуна 548А.

Електродвигун ДК-406(409) отримує живлення від динамотору ДК-604В, який складається з дільника напруги і генератора керування. Дільник напруги дозволяє отримати напругу 1,5 кВ, яка і подається на привідний електродвигун ДК-406(409) компресора ЕК-7Б. Дільник напруги представляє собою двоколекторну електричну машину постійного струму і відрізняється загальною магнітною системою з загальним сердечником якоря в пазах якого розміщені дві обмотки, що мають виводи на власні колектори. Особливістю з'єднання обмоток дільника напруги в тому, що дві самостійні якірні обмотки лежать в загальних пазах але не мають електричного з'єднання при цьому маючи загальну магнітну систему. Основний магнітний потік, що збуджує машину, утворюється трьома обмотками: двома обмотками послідовного збудження (кожна має з'єднання зі «своєю» якірною обмоткою), і обмоткою незалежного збудження [5]. Враховуючи топологію якірних обмоток потенціал середньої точки дільника напруги завжди рівний половині напруги контактної мережі. Таким чином, якір ДК-406(409) завжди отримує напругу, що рівна половині від напруги в контактній мережі, а також така

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

схема живлення дозволяє значно послабити вплив коливання напруги контактної мережі на роботу приводного двигуна компресора.

Номінальні паспортні дані електродвигуна ДК-406(409) компресора ЕК-7Б наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Номінальні паспортні дані двигуна ДК-406(409)

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	1,5
Номінальний струм, А	4,65
Номінальна потужність, кВт	5
Частота обертання валу, об/хв	1020
Число пар головних полюсів	2
Опір обмоток двигуна при 20°C, Ом	19,76
Спосіб охолодження	Природне, машина має закрите виконання

Електродвигун ДК-406(409) має послідовну систему збудження з двома парами головних полюсів, додаткових полюсів немає. В круглому корпусі, на внутрішній його стороні, закріплені головні полюси. Котушки головних полюсів виготовлені з ізолюваного круглого проводу марки ПДБ, а корпусна ізоляція виготовлена з одного шару тафтяної, шести шарів лакотканої і одного шару кіперної стрічки. Котушки при виготовленні компаундують та покривають шаром спеціальним лаком [5]. Враховуючи поділ ізоляційних матеріалів на класи нагрівостійкості [6] по допустимій величині перегріву ізоляція головних полюсів ДК-406(409) відноситься до класу В (допустима величина перегріву по полюсам $\tau_{\text{доп}} = 130^\circ\text{C}$) [7].

Обмотка якоря електродвигуна ДК-406(409) хвильового типу і вкладається в 39 пазах, причому в кожному пазі знаходяться сторони семи шестивиткових секцій, які виготовлені з круглого проводу марки ПДБ і мають таку ж ізоляцію що і обмотки головних полюсів. В пазах секції додатково ізолювані шаром електрокартону. За класом нагрівостійкості якірна обмотка також відноситься до класу В (допустима величина перегріву по якорю $\tau_{\text{доп}} = 120^\circ\text{C}$) [7].

Електродвигун ДК-406(409) має повністю закриту та захищену від вологи конструкцію. Оскільки двигун працює в повторно-короткочасному режимі, то для забезпечення нормальних температурних умов в ньому використовується пасивна система охолодження (відсутній вентилятор). Надлишкове тепло віддається від зовнішніх елементів корпусу машини, що мають розвинену систему ребер для збільшення площі конвекції. Покращенню охолодження електродвигуна компресора також має сприяти його розміщення під вагоном, де він обдувається потоками зустрічного повітря при русі поїзда.

Оскільки для мащення деталей поршневого компресора ЕК-7Б в його картері постійно знаходиться деякий об'єм мастила, яке характеризується в'язкістю, то в зимовий період експлуатації це мастило може загустіти і спричинити суттєве збільшення моменту опору на валу приводного двигуна в момент пуску. Поршневі мотор-компресори електрорухомого складу мають найбільший момент тертя спокою через розвинені поверхні тертя. За результатами експериментальних досліджень мотор-компресору Е-500, проведених в широких температурних умовах [8], отримана залежність початкового пускового моменту опору від температури при відсутності протитиску (рис. 1).

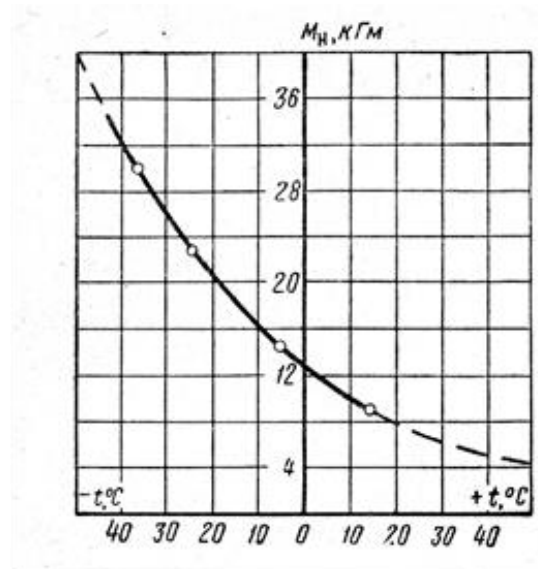


Рисунок 1 – Залежність моменту опору компресора Е-500 від температури

Як видно з графіка рис. 1 початковий момент опору суттєво залежить від температури навколишнього середовища. При зниженні температури повітря від $+20^\circ\text{C}$ до -10°C величина початкового моменту опору збільшується в 2 рази.

1.2 Оцінка факторів, що впливають на працездатність електродвигуна ДК-406 (ДК-409) компресора ЕК-7Б

Детальна статистика відмов електродвигунів ДК-406(409) по РПЧ-1 Дніпро наведена в табл. 2. (термін спостереження один рік) [4].

Таблиця 2 – Статистичні дані по виходу з ладу двигунів ДК-406(409)

Вид несправності	Кількість пошкоджень	Відсоток від загальної кількості пошкоджень, %
Прогар обмотки якоря	25	44,6
Знос сальника	4	7,1
Брак моторно-якірного підшипника	5	8,9
Пробій обмотки збудження	8	14,3
Обрив валу	4	7,1
Зношення валу	2	3,6
Прогар обмоток головного полюса	6	10,7
Зношення колектору	1	1,8
Вихід з ладу моторно-якірного підшипника	1	1,8
Разом	56	100

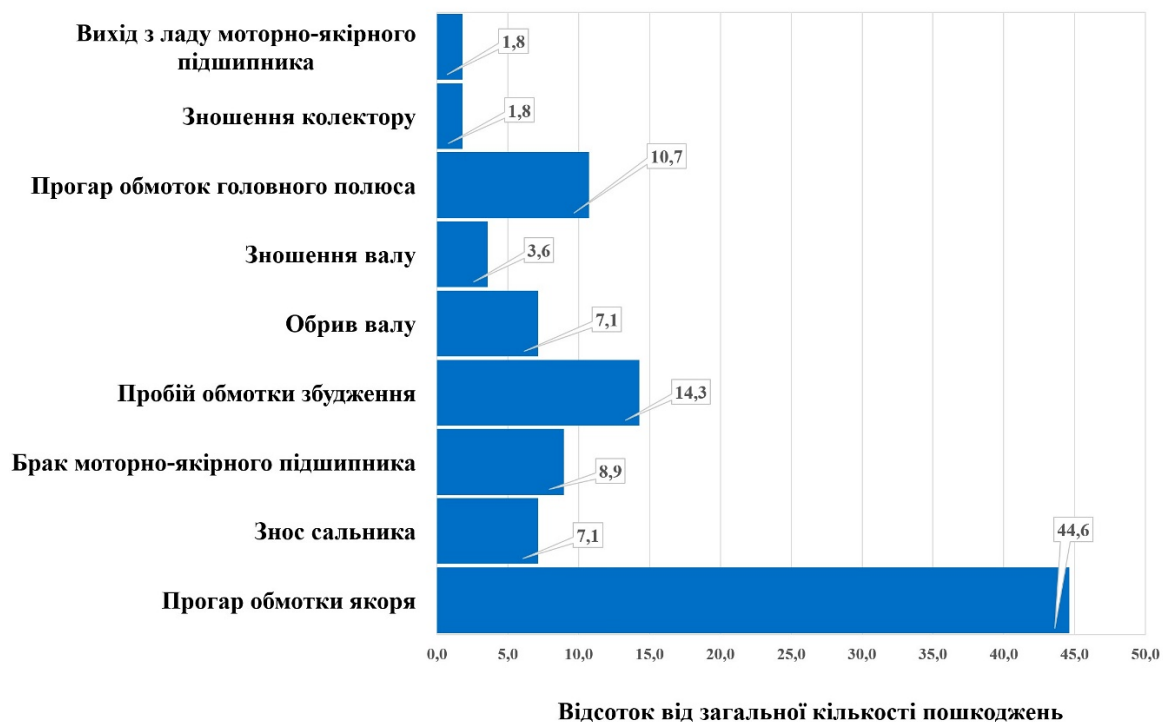


Рисунок 2 – Статистика відмов електродвигунів ДК-406(409)

За даними табл. 2 побудована гістограма рис. 2, яка деталізує причини виходу з ладу електродвигуна компресора.

Найбільш суттєвий відсоток відмов електродвигунів ДК-406(409) припадає на прогар обмотки якоря (руйнування ізоляції якірної обмотки по причині її теплового пробоя) – 44, 6 %. Зважаючи на це основна увага в даній роботі сконцентована на експлуатаційних причинах, що так чи інакше можуть впливати на стан ізоляції електричної машини.

Найбільш ймовірними причинами, що можуть призводити до перевищення величини перегріву струмоведучих частин електричної машини та ізоляції, що з ними межує, над його допустимим значенням і тим самим призводити до теплового руйнування ізоляції якоря може бути:

1. Перевищення унормованої величини тривалості роботи електроприводу компресора, тобто робота з невідповідним значенням тривалості ввімкнення (ТВ).

Згідно технічних даних поршневого компресора ЕК-7Б він працює в повторно-короткочасному режимі (S3) з тривалістю ввімкнення $TB=50\%$ при тривалості циклу 10 хв [8]. Час наповнення головних повітряних резервуарів електропоїздів серій EP1, EP2 зворотно-пропорційний значенню кутової швидкості валу електродвигуна компресора. Тобто при зниженні обертів з 1020 об/хв. до 807,5 об/хв., що відповідає зниженню напруги в контактній мережі з номінального до мінімального рівня, продуктивність компресора падає, а час роботи для заповнення резервуарів збільшується на 20,8% [10]. Враховуючи вік електрорухомого складу та його не найкращий технічний стан час заповнення може перевищувати вказану величину, причому суттєво.

Для того аби уникнути перевантаження електродвигуна компресора через причину описану в попередньому абзаці в силовому електричному колі живлення ДК-406(409) передбачено тепловий захист, що реалізований на теплових біметалевих реле ТРВ-8,5. В роботі [4] показано, що часто реле ТРВ-8,5 спрацьовує не у відповідності з налаштуванням, а набагато

пізніше ніж того вимагає ситуація, а також на деяких одиницях електрорухомого складу воно відсутнє взагалі.

2. Перевантаження якірної обмотки електродвигуна ДК-406(409) надвисокими струмами на етапі запуску.

За низьких температур навколишнього середовища (нижче 0°C) зростає початковий момент опору механізму компресора, що є причиною утрудненого пуску. На осцилограмі наведеній в [11] зафіксовані струми при пуску електропривода компресора при температурі навколишнього середовища +20°C, максимальний кидок струму склав 25,195 А, що більше ніж в 5 разів перевищує номінальне значення струму для ДК-406(409). Враховуючи вплив низьких температур на процес пуску можна припустити, що короточасні пускові струми будуть перевищувати номінативне значення більш ніж в 10 разів.

1.3 Методи аналізу теплового стану електричних машин

Будь-яка електрична машина в процесі роботи здійснює електромеханічне перетворення енергії, яке завжди супроводжується втратами. Ці втрати у вигляді тепла нагрівають частини електричної машини, передаються зовнішньому середовищу та втрачаються. Теплова енергія, що відводиться від вузлів електричної машини представляється у вигляді теплового потоку, який тече від більш нагрітої до менш нагрітої її частини.

Граничні допустимі температури активних частин електричної машини є одним з найважливіших факторів, які обмежують її потужність та впливають на надійність [12]. Перевірка температури нагрівання активних частин електричної машини є важливою складовою процесу її дослідження, як при проектуванні так і при виявленні передчасних виходів електричних машин в умовах експлуатації.

Існує два принципово різних набори методів для визначення теплового стану електричної машини:

- експериментальні методи в основі яких лежать випробування на нагрівання;
- теоретичні методи в основі яких лежить розв'язок рівнянь теплопровідності.

До експериментальних методів відносять:

- Метод термометра. Під термометром розуміють термометри розширення (ртутні, спиртові та інші). Особливістю такого метода є те, що термометр прикладається до доступної частини електричної машини, а значить дозволяє фіксувати температуру зовнішніх її елементів в тій точці де він прикладений. При цьому температури всередині машини може суттєво відрізнятись від температури її поверхні.
- Метод опору. Оснований на ефекті зміни опору металевого провідника в залежності від його температури. Застосовується для визначення температури ізолюваних обмоток і дозволяє отримати середню температуру обмотки.
- Метод закладених термоперетворювачів (термопара, напівпровідниковий терморезистор і інше). Термоперетворювачі закладаються на етапі виробництва в найбільш термонавантажені місця електричної машини і використовуються для моніторингу температури вказаних зон на протязі усього терміну експлуатації. Застосовується для вимірювання температури обмоток так сердечників якорів потужних машин.
- Метод на основі тепловізійних технологій. Відносять до методів неруйнівного контролю, має ті ж обмеження, що і метод термометра.

Серед теоретичних методів визначення теплового стану електричних машин на даний час застосовують три підходи:

- метод розгорнутих теплових (еквівалентних) схем;
- аналітичне розв'язання рівнянь для трьох або двовимірних температурних полів (потребує певних спрощень геометричної форми);
- чисельні методи, що засновані на методі скінчених елементів.

Метод розгорнутих теплових (еквівалентних) схем набув найбільшого розповсюдження через простоту і прийнятну точність розрахунків. Даний метод заснований на аналогії теплових та електричних потоків і теплових та електричних опорів. Його можна розглядати як наближений для розв'язання тривимірних задач. Основним його недоліком є те, що в результаті отримують середні значення температури для окремих вузлів електричної машини.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Теплові опори з'єднуються в теплову мережу, яка імітує реальні шляхи передачі теплових потоків у машині, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом. Аналогія заснована на однаковій формі основного закону теплопровідності (закон Фур'є) і електричного струму (закон Ома).

Елементи теплової схеми імітують окремі частини електричної машини, якщо у певній частині машини присутні розподілені по її об'єму джерела теплоти, то в схемі вони показуються зосередженим джерелом теплового потоку. Фактично такими джерелами є втрати потужності (втрати потужності в обмотках, втрати в сталі, механічні втрати і інші). Таким чином, для визначення температурного стану електричної машини за методом розгорнутих теплових (еквівалентних) схем попередньо потрібно визначити величини втрат потужності для даного режиму роботи.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МОТОР-КОМПРЕСОРА ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ПРИ КОЛИВАННЯХ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

2.1 Аналіз та вибір середовища для комп'ютерного моделювання

Моделювання є науковим інструментом як для теоретичних, так і для практичних досліджень на різних рівнях абстракції. Моделювання є важливою стадією дослідження чи проектування технічної системи і дозволяє суттєво скоротити час та матеріальні засоби [13]. У випадку, коли натурні випробування неможливі за якихось причин, то моделювання стає єдиним засобом для відпрацювання поведінки системи.

Математично технічні системи описуються різними способами, в залежності від класу системи [13]:

- безперервні (аналогові) системи, що описуються звичайними диференціальними рівняннями;
- дискретні системи, що описуються кінцево-різницеvими рівняннями;
- системи з розподіленими параметрами, які описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних;
- системи з післядією, що описуються диференціальними рівняннями. В таких системах поточний хід процесу залежить від стану системи як в поточний момент, так і до процесу;
- стохастичні системи, що описуються імовірнісними поняттями і методами.

Математичний опис технічної системи визначає вибір інструментальних засобів і технологій її дослідження. На сьогодні найбільш поширеним підходом є використання автоматизованих систем проектування (САПР), які містять в тому числі засоби моделювання. Серед найбільш широко використовуваних є наступні групи САПР [13]:

- для застосування в галузях загального машинобудування. Їх називають машинобудівними САПР або MCAD-системами (Mechanical CAD);

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- для радіоелектроніки – ECAD (Electronic CAD) або EDA (Electronic Design Automation) системи;
- в області архітектури і будівництва.

За цільовим призначенням САПР ділять на [13]:

- САПР функціонального проектування (CAE-системи (Computer Aided Engineering));
- конструкторські САПР (CAD-системи (Computer Aided Design));
- технологічні САПР, тобто автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва (CAM-системи (Computer Aided Manufacturing)).

CAE системи дозволяють досліджувати технічні системи на макрорівні, фактично аналізувати систему з метою оптимізації її структури/топології чи функціональних можливостей. В CAD аналізуються підсистеми різної фізичної природи, і на макрорівні, і на мікрорівні.

Оскільки технічні системи або їх вузли можуть представлятись безпосередньо диференційними рівняннями, то для прогнозування їх поведінки в часі можуть використовуватись суто математичні пакети які здатні розв'язувати диференційні рівняння у числах чи у символічній формі. До таких відносять: Maple, MATLAB, MathCAD, Mathematica, Maxima, SymPy, O-Matrix, SciPy, Octave та інші [14].

2.2 Застосування системи MathCAD у завданнях моделювання електромеханічних систем

MathCAD отримав розповсюдження, як інструмент моделювання електромеханічних систем серед професіоналів, а також студентів оскільки має ряд особливостей [15]:

- є досить універсальною системою з відносно простим користувацьким інтерфейсом;
- усі формули та рівняння в робочому середовищі записуються в загальноприйнятому математичному вигляді;
- дії користувача при роботі з документом мають багато спільного з розповсюдженим текстовим редактором Microsoft Word;
- має потужний математичний апарат, який дозволяє отримувати розв'язки

як в числовому так і аналітичному вигляді;

- має зручні засоби графічного подання інформації;
- дозволяє імпортувати в документ графічні зображення, а також текст з поширених текстових редакторів.

В систему інтегровані наступні функціональні компоненти [15]:

- меню різних рівнів вкладеності;
- розширений набір панелей інструментів;
- текстовий редактор (коментарі до обчислень, створення кінцевого документу);
- редактор формул;
- редактор графіків;
- обчислювальна система (обрахунки як в числовому так і символьному вигляді).

Для виконання розрахунків і моделювання процесів роботи електромеханічних систем за допомогою MathCAD можна виконувати увесь спектр математичних розрахунків і перетворень. До основних можливостей системи математичних розрахунків MathCAD, які часто використовуються при математичному комп'ютерному моделюванні технологічних процесів відносять [15]:

- розв'язання квадратного рівняння аналітичним чи числовим способом;
- розв'язання системи нелінійних рівнянь в аналітичним чи числовим способом;
- диференціювання виразів;
- обчислення невизначеного і визначеного інтегралу;
- спрощення математичних виразів, розкладання їх на прості множники, приведення подібних членів;
- розкладання у ряд Тейлора;
- перетворення виразів відносно заданої змінної (пряме й зворотне перетворення Фур'є, Лапласа та Z-перетворення);
- розв'язання аналітичним способом диференціальних рівнянь (потребується попереднє виконання перетворення Лапласа);
- розв'язання числовим способом диференціальних рівнянь;

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- визначення коефіцієнтів у рівняннях регресії декількох видів;
- виконання операцій з матрицями;
- виконання розрахунків з індексованими змінними;
- застосування операторів програмування для організації циклів і умовних переходів;
- побудова графіків у Декартовій і полярній системах координат, їх трасування.

2.3 Математична модель електромеханічної системи компресора ЕК-7Б з електродвигуном ДК-406(409)

Кривошипно-шатунний механізм є основою поршневого компресора ЕК-7Б, кінематична схема якого наведена на рис. 3.

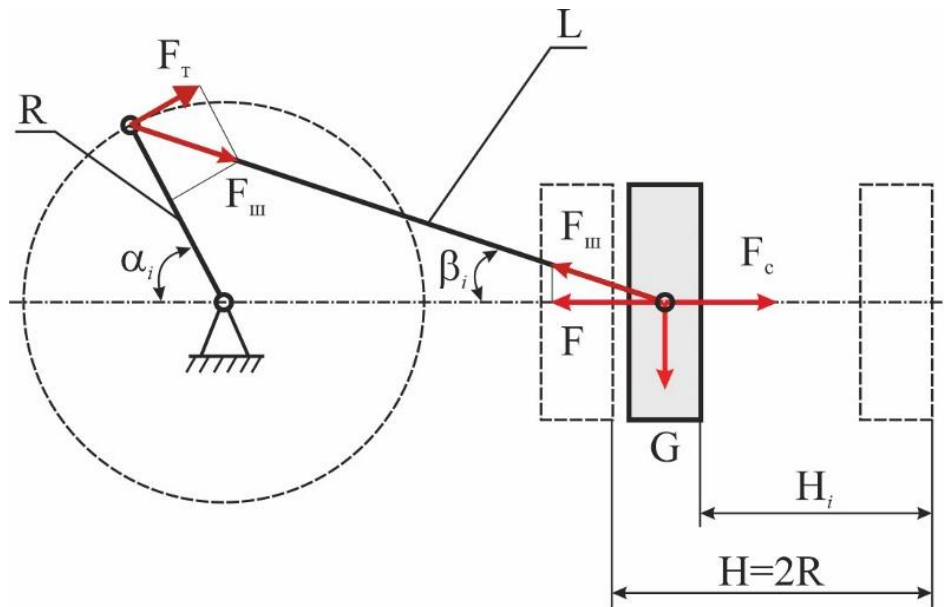


Рисунок 3 – Кінематична схема кривошипно-шатунного механізму поршневого компресора ЕК-7Б

В кінематичній схемі поршневого компресора (рис. 3) діють наступні зусилля:

- Зусилля яке діє на поршень в будь-якому його положенні відносно циліндра:

$$F_c = \pm [\pm S \cdot (p - p_a) + G \cdot \mu], \quad (1)$$

де S – площа поршня, м^2 ;

G – вага поршня зі штоком, кг ;

μ – коефіцієнт тертя (для штока і поршня);

p, p_a – відповідно атмосферний тиск та тиск по індикаторній діаграмі поршневого компресора, ат.

- Загальне зусилля, що прикладається до штоку:

$$F = F_c + F_{\text{дин}}, \quad (2)$$

де $F_{\text{дин}}$ – величина динамічного зусилля, Н

$$F_{\text{дин}} = \frac{G}{g} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \left(\cos(\omega t) + \frac{R}{L} \cdot \cos(2\omega t) \right), \quad (3)$$

де R – радіус обертання кривошипа, м;

L – довжина шатуна, м;

ω – кутова швидкість, з якою обертається вал компресора, с^{-1} ;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

- Сила, що діє вздовж шатуна:

$$F_{\text{ш}} = \frac{F}{\cos(\beta_i)}, \quad (4)$$

де β_i – поточне значення кута, що утворює шток з горизонтальною лінією яка проходить через ось обертання кривошипу.

Кут β_i виражається через кут α_i (рис. 3) наступним чином:

$$\beta_i = \arcsin\left(\frac{R}{L} \sin(\alpha_i)\right), \quad (5)$$

де α_i – кут повороту кривошипа (поточне значення).

- Тангенціальне зусилля в кривошипі:

$$F_{\text{т}} = F_{\text{ш}} \sin(\alpha_i - \beta_i). \quad (6)$$

Кривошипно-шатунний механізм поршневого компресора, як будь-який механізм, характеризується моментом інерції J_k . У випадку поршневого компресора значення J_k є функцією кута повороту валу і з урахуванням

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кінематичної схеми (рис. 3) рівняння для його обрахування може бути записаним наступним чином [16]:

$$J_k = \frac{m \cdot R^2 \cdot \sin^2(\alpha_i + \beta_i)}{\cos^2(\beta_i)}, \quad (7)$$

де m – маса елементів механізму, що поступально рухаються, кг.

Оскільки вал поршневого компресора приводиться в дію від електричного приводного двигуна без додаткових передавальних пристроїв, то загальна інерційність електроприводу буде визначатись, як:

$$J = J_k + J_y, \quad (8)$$

де J_y – момент інерції обертових частин електродвигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент інерції рухомих частин двигуна постійного струму може бути з достатньою точністю визначений за наступною емпіричною формулою [17]:

$$J_y = 0,6 \cdot D_2^4 \cdot (l_p + 0,3 \cdot D_2 + 0,75 \cdot P_{\text{ном}}) \cdot 10^{-2}, \quad (9)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність приводного електродвигуна компресора, Вт;

l_p – довжина ротора електродвигуна, м;

D_2 – діаметр ротора електродвигуна, м.

Всі сили і моменти навантаження, що прикладені до механічної частини електропривода, можуть бути розділені на сили та моменти механічних втрат ΔM_Σ і сили та моменти, які є корисним навантаженням виконавчого механізму $M_{\text{кор}\Sigma}$:

$$M_c = \Delta M_\Sigma + M_{\text{кор}\Sigma}. \quad (10)$$

Момент механічних втрат ΔM_Σ враховує всі види механічного тертя. Корисний момент опору $M_{\text{кор}\Sigma}$ представляє собою ту чи іншу функцію швидкості, в залежності від виду навантаження. Для аналізу механізму компресора ЕК-7Б пропонується використовувати емпіричну формулу Бланка, яка в більшості випадків представляє собою деяку ідеалізацію реальних умов але дає задовільне

наближення до дійсності [18]:

$$M_c = M_{c.поч} + (M_{c.ном} - M_{c.поч}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^p, \quad (11)$$

де $M_{c.ном}$ – номінальний момент опору механізму, Н·м;

$\omega_{ном}$ – номінальна кутова швидкість, при якій момент опору рівний номінальному, с⁻¹;

$M_{c.поч}$ – момент тертя або неробочого ходу машини, Н·м;

p – показник степені ($p = 1$ для поршневих компресорів).

Величина переміщення поршня при обертанні кривошипа на деякий кут α_i визначається виразом [15]:

$$H_i = R \cdot \left[1 - \cos(\alpha_i) + \frac{R}{2 \cdot L} \cdot \sin(\alpha_i) \right]. \quad (12)$$

Іншою важливою частиною електропривода поршневого компресора є його приводний електричний двигун, яким є електродвигун постійного струму послідовного збудження ДК-406(409), паспортні дані наведені в табл. 1. На рис. 4, а та 4, б представлено відповідно принципову схему і схему заміщення двигуна постійного струму послідовного збудження, яким є привідний двигун ДК-406(409) компресора ЕК-7Б.

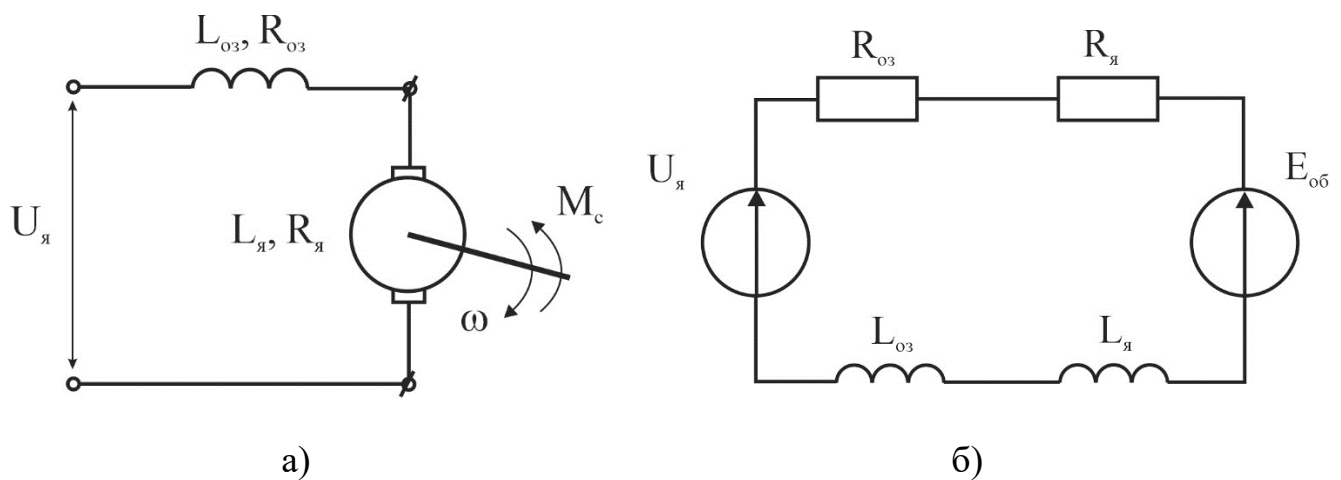


Рисунок 4 – Схема двигуна постійного струму послідовного збудження ДК-406(409):

а) електрична принципова; б) електрична заміщення

Для дослідження статичних та динамічних режимів роботи електроприводу поршневого компресора засобами MathCAD необхідно скласти його математичну модель, яка представляється системою диференціальних рівнянь, що описує властивості та враховує структуру досліджуваного механізму.

Математична модель електричної машини представляє систему диференціальних та алгебраїчних рівнянь електричної рівноваги усіх її контурів, а також диференціального рівняння руху її ротора.

Проти е.р.с., або е.р.с. обертання електродвигуна визначається виразом [17]:

$$E_{об} = c \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (13)$$

де c – конструкційна стала електродвигуна;

Φ – основний робочий магнітний потік в повітряному зазорі електродвигуна;

ω – поточне значення кутової швидкості обертання валу електродвигуна, c^{-1} ;

У загальному випадку магнітний потік двигуна не залишається незмінним, оскільки він залежить від струму збудження, який в машинах послідовного збудження рівний якірному, а також через вплив реакції якоря. Таким чином результуючий магнітний потік визначається наступним виразом [17]:

$$\Phi = \Phi_3 - \Delta\Phi_{ря}, \quad (14)$$

де Φ_3 – магнітний потік, що створюється послідовно увімкненою обмоткою збудження електродвигуна;

$\Delta\Phi_{ря}$ – магнітний потік, що створюється струмом в обмотці якоря електродвигуна (реакція якоря);

Створюючи модель машини постійного струму послідовного збудження необхідно враховувати динамічні властивості обмотки збудження і нелінійний характер залежності магнітного потоку обмотки збудження від струму в ній, яка задається кривою намагнічування. Власне крива намагнічування відноситься до класу неаналітичних нелінійностей, тобто строго не описується аналітичними виразами. Існує декілька способів лінеаризації таких нелінійностей, найбільш розповсюдженим є метод апроксимації. Після виконання апроксимації за

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою відомих чисельних методів, наприклад метод Ейлера першого порядку, метод Рунге-Кута четвертого порядку, метод Лемінга і інші, підбирається наближений аналітичний вираз для вказаної нелінійності.

Оскільки конструкційна стала c є незмінною, то на практиці часто працюють не з кривою намагнічування, а з залежністю $c \cdot \Phi = f(I)$, яку досить легко отримати в лабораторних умовах. Таким чином, залежність $c \cdot \Phi = f(I)$ може бути апроксимована методом кусочно-лінійної апроксимації (рис. 5) і аналітично записана наступною системою алгебраїчних рівнянь:

$$c \cdot \Phi(I) = \begin{cases} c \cdot \Phi_{01} + k_{\Phi 1} \cdot I(t) \\ c \cdot \Phi_{02} + k_{\Phi 2} \cdot I(t) \\ \vdots \\ c \cdot \Phi_{0i} + k_{\Phi i} \cdot I(t) \end{cases}, \quad (15)$$

де $k_{\Phi i} = \operatorname{tg} \varphi_i = \frac{\lambda_i \psi_i}{\psi_{i-1} \lambda_i}$ – коефіцієнт, що залежить від форми кривої на i -й ділянці

апроксимації (рис. 5);

$\lambda_i \psi_i$, $\psi_{i-1} \lambda_i$ – відрізки на i -й ділянці апроксимації (рис. 5).

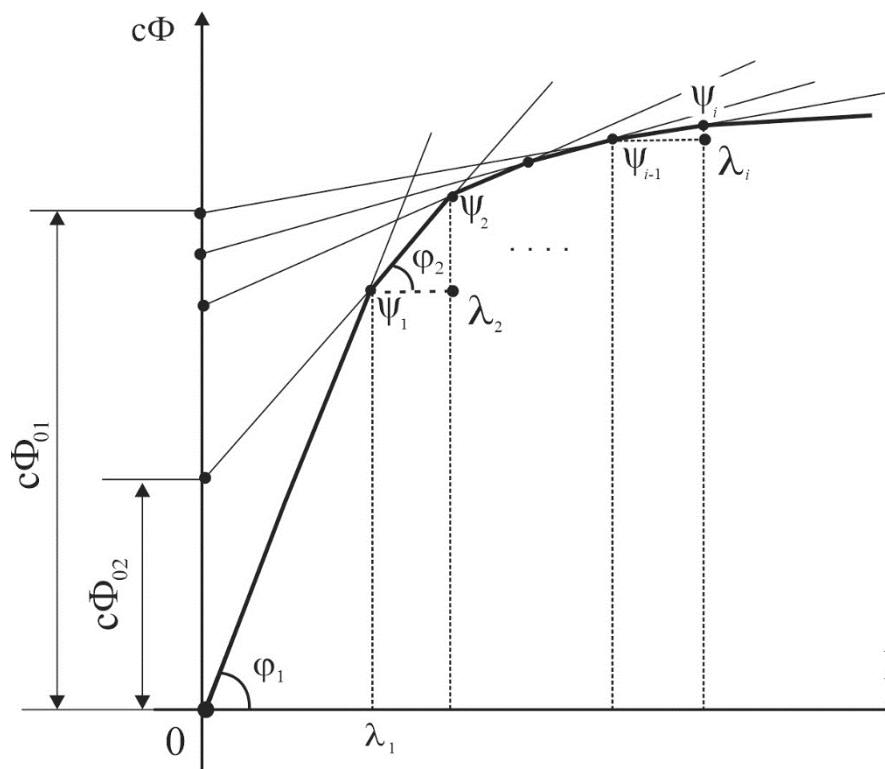


Рисунок 5 – Апроксимація кривої намагнічування електродвигуна ДК-406(409)

Крім насичення електричної машини по контуру основного магнітного потоку інколи необхідно враховувати насичення по контуру потоку розсіювання. Індуктивність якоря визначається двома складовими $L_{\text{я}} = L_a - L_s$, що відповідають основному магнітному полю і полю розсіювання, зчепленому з якірною обмоткою.

Значення L_s залежить від величини струму $L_s = f(I)$. Насичення по контуру розсіювання проявляється при значних струмах і полягає в зменшенні L_s . Подібний вплив на динамічні параметри електричної машини чинять вихрові струми і явища комутації. В режимах близьких до номінальних цими факторами дозволяється знехтувати без шкоди результату [17]. Тому при створенні математичної моделі двигуна постійного струму послідовного збудження ДК-406(409) прийняті наступні припущення:

- відсутнє насичення як по контуру основного магнітного потоку, так і по контуру розсіювання;
- не враховується вплив контуру вихрових струмів;
- машина цілком скомпенсована, тобто вплив реакції якоря відсутній.

Враховуючи прийняті допущення рівняння електричної рівноваги записане за другим законом Кірхгофа для електродвигуна постійного струму з послідовною обмоткою збудження ДК-406(409) буде мати наступний вигляд:

$$U_{\text{я}} = c \cdot \Phi \cdot \omega(t) + R_{\Sigma} \cdot I(t) + L_{\Sigma} \cdot \frac{dI(t)}{dt}, \quad (16)$$

де $U_{\text{я}}$ – напруга живлення електродвигуна, В;

R_{Σ} , L_{Σ} – відповідно загальний активний опір та індуктивність електричного кола двигуна;

$\omega(t)$, $I_{\text{я}}(t)$ – миттєві значення відповідно кутової швидкості валу та сили струму електродвигуна.

Рівняння руху електропривода поршневого компресора [16]:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = c \cdot \Phi \cdot I(t) - M_c. \quad (17)$$

Структурна схема електроприводу поршневого компресора, що враховує особливості його роботи наведена на рис. 6.

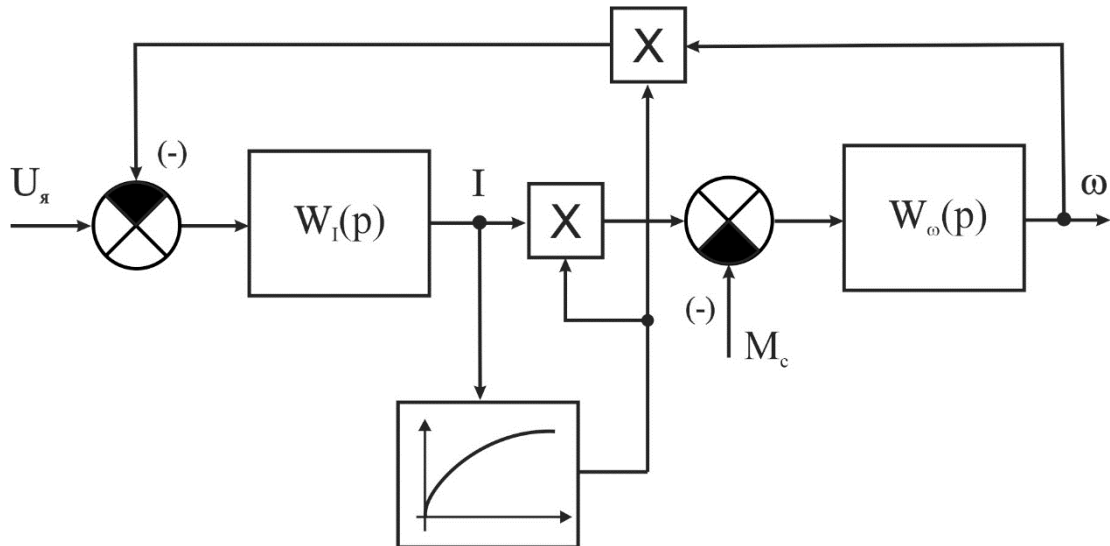


Рисунок 6 – Структурна схема електроприводу поршневого компресора

Рівняння електричної рівноваги (16) записане в операторній формі дає передаточну функцію за струмом у вигляді аперіодичної ланки:

$$W_I(p) = \frac{I(p)}{U(p) - c \cdot \Phi \cdot \omega(p)} = \frac{K_d}{T_e \cdot p + 1}, \quad (18)$$

де $T_e = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma}$ – електромагнітна стала часу електродвигуна;

$K_d = \frac{1}{R_\Sigma}$ – коефіцієнт передачі електродвигуна.

Основне рівняння динаміки (17) записане в операторній формі дає передатну функцію електромеханічної системи поршневого компресора за швидкістю у вигляді інтегруючої ланки:

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{J \cdot p}. \quad (19)$$

На основі вище сформованого матеріалу з урахуванням структури електроприводу електромеханічної системи поршневого компресора записана система диференційних та алгебраїчних рівнянь, що описує електромеханічні процеси у ній:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{я}}(t) = c \cdot \Phi(I(t)) \cdot \omega(t) + R_{\Sigma} \cdot I(t) + L_{\Sigma} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} = c \cdot \Phi(I(t)) \cdot I(t) - \left[M_{\text{с.поч}} + (M_{\text{с.ном}} - M_{\text{с.поч}}) \cdot \left(\frac{\omega(t)}{\omega_{\text{ном}}} \right)^p \right] \\ c \cdot \Phi(I(t)) = \begin{cases} c \cdot \Phi_{01} + k_{\Phi 1} \cdot I(t) \\ c \cdot \Phi_{02} + k_{\Phi 2} \cdot I(t) \\ \vdots \\ c \cdot \Phi_{0i} + k_{\Phi i} \cdot I(t) \end{cases} \end{array} \right. \quad (20)$$

Підставивши в отриману систему рівнянь (20) значення моменту інерції електромеханічної системи поршневого компресора за виразом (8), з урахуванням формул (7) та (9) і перейшовши до форми запису Коші отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI(t)}{dt} = \frac{U_{\text{я}}(t)}{L_{\Sigma}} - \frac{c \cdot \Phi(I(t)) \cdot \omega(t)}{L_{\Sigma}} - \frac{R_{\Sigma} \cdot I(t)}{L_{\Sigma}} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{c \cdot \Phi(I(t)) \cdot I(t) - \left[M_{\text{с.поч}} + (M_{\text{с.ном}} - M_{\text{с.поч}}) \cdot \left(\frac{\omega(t)}{\omega_{\text{ном}}} \right)^p \right]}{\left(\frac{m \cdot R^2 \cdot \sin^2(\alpha_i + \beta_i)}{\cos^2(\beta_i)} \right) + \left(\frac{0,6 \cdot D_2^4 \cdot (l_p + 0,3 \cdot D_2 + 0,75 \cdot P_{\text{ном}})}{10^2} \right)} \\ c \cdot \Phi(I(t)) = \begin{cases} c \cdot \Phi_{01} + k_{\Phi 1} \cdot I(t) \\ c \cdot \Phi_{02} + k_{\Phi 2} \cdot I(t) \\ \vdots \\ c \cdot \Phi_{0i} + k_{\Phi i} \cdot I(t) \end{cases} \end{array} \right. \quad (21)$$

Система рівнянь (21) є математичною моделлю електромеханічної системи поршневого компресора ЕК-7Б, яка дозволяє досліджувати її динаміку роботи, в тому числі з урахуванням зміни напруги живлення.

2.4 Дослідження динаміки роботи поршневого компресора методом комп'ютерного моделювання в середовищі MathCAD

Динамічні процеси в електричних колах електрорухомого складу (ЕРС) визначаються параметрами цих кіл, а також характером зовнішніх впливів на них: зміна напруги в контактній мережі, включення і виключення в електричних колах, частковим або повним коротким замиканням, порушенням нормальних умов роботи і т. п. Указані збурення досить різноманітні як за видом функціональної залежності від часу, так і за ймовірністю їх виникнення. Їх можна розділити на дві групи: збурення, які властиві нормальним експлуатаційним режимам, і збурення, які пов'язані з порушенням нормальних режимів.

Перехідні процеси ускладнюють роботу електрообладнання, чинять вплив на якість керування, якщо супроводжуються великими відхиленнями навантаження від сталих значень і якщо час їх завершення відносно великий. Допустимість таких перехідних процесів оцінюють виходячи з умов надійної роботи електричного обладнання (тягові двигуни, допоміжне електричне обладнання, статичні збудники і т. д.), перевантажень і перенапруги в електричних колах електрорухомого складу. Нормальні перехідні процеси в експлуатації не повинні викликати на ЕРС спрацювання пристроїв захисту, призначення яких – запобігати пошкодженню електрообладнання при перехідних процесах, що обумовлені збуреннями другої групи.

Отримана математична модель поршневого компресора у вигляді системи диференційних рівнянь (21) є досить складною для аналітичного розв'язку і отримання результату в загальному вигляді. Найбільш розповсюдженою методикою розв'язання такого типу систем рівнянь є застосування чисельних методів їх розв'язання. Використання сучасних ПЕОМ дозволяє отримувати необхідну кількість точок кривих, які характеризують перехідні процеси, тобто забезпечити достатньо високу точність і одночасно зменшити трудомісткість для дослідника.

Для розв'язання системи рівнянь (21) в роботі використовується метод Рунге-Кутта зі змінним кроком інтегрування, багаторічна практика підтверджує достовірність досліджень за допомогою цього методу. Даний числовий метод

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтегрування диференціальних рівнянь є дискретним методом, дозволяє визначити значення шуканих функцій на множині точок, де $\{t_n, n \in N\}$ – t_n незалежна змінна яка належить множині N .

В MathCAD метод Рунге-Кутта з змінним кроком інтегрування представлений функцією **Rkadapt(y, x₁, x₂, npoints, D)** в якій:

y – вектор або скаляр початкових умов;

x₁, x₂ – кінцеві точки інтервалу, на якому оцінюється розв’язання рівнянь.

Початкові умови у записуються для точки x₁;

npoints – число точок на інтервалі x₁, x₂;

D – вектор функція, що містить праві частини диференціальних рівнянь записаних в формі Коші.

Для лінеаризації навантажувальної характеристики електродвигуна ДК-406(409) методом кусочно-лінійної апроксимації згідно виразу (15) в середовищі MathCAD застосовується умовний оператор (if, otherwise). Дія умовного оператора if складається з двох частин. Спочатку перевіряється умова праворуч від нього, якщо вона істинна, то виконується вираз зліва від оператора if. Якщо умова помилкова – нічого не відбувається, а виконання програми продовжується переходом до її наступного рядка. Оператор otherwise використовується спільно з одним або декількома умовними операторами if і указує на вираз, який виконуватиметься, якщо жодна з умов не виявилась істинною.

Лінеаризована навантажувальна характеристика електродвигуна ДК-406(409) з використанням умовного оператора (if, otherwise):

$$c \cdot \Phi(I(t)) = \begin{cases} 3,6 \cdot I(t) & \text{if } 0 \leq I(t) \leq 2,76 \\ 8,1 + 1,1 \cdot I(t) & \text{if } 2,76 < I(t) \leq 5,865 \\ 13,1 + 0,29 \cdot I(t) & \text{if } 5,865 < I(t) \leq 13 \\ 17,1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

Графічну інтерпретацію логічної конструкції (22) в середовищі MathCAD наведено на рис. 7.

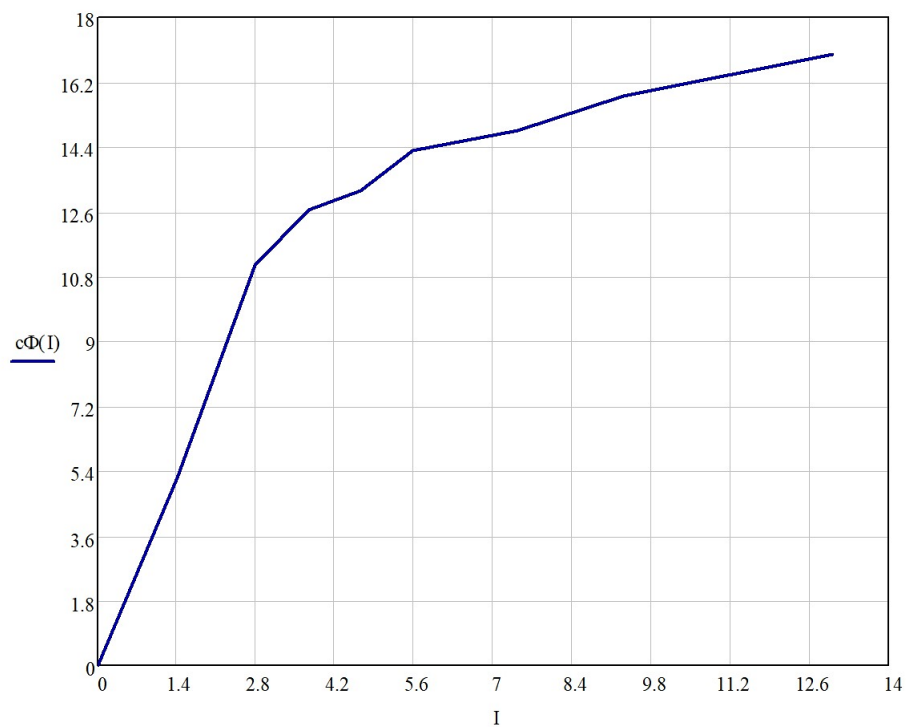


Рисунок 7 – Лінеаризована навантажувальна характеристика електродвигуна ДК-406(409) в середовищі MathCAD

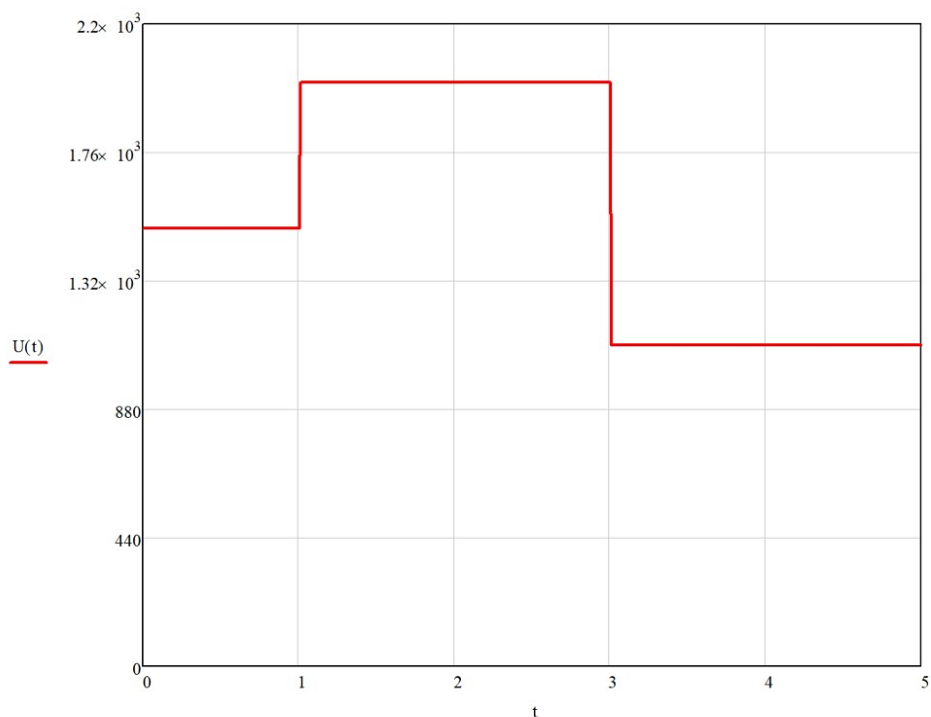


Рисунок 8 – Моделювання зміни напруги живлення електродвигуна ДК-406(409) в середовищі MathCAD

Для моделювання зміни напруги живлення електродвигуна ДК-406(409) також застосовується умовний оператор (if, otherwise):

$$U_{\text{я}}(t) = \begin{cases} 1500 & \text{if } 0 \leq t \leq 1 \\ 2000 & \text{if } 1 < t \leq 3 \\ 1100 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

Отриманий за виразом (23) графік зміни напруги живлення в часі наведено на рис. 8.

Функція **Rkadapt**, що використовується в роботі для чисельного розв'язку системи диференціальних рівнянь (21) потребує матриці початкових умов. До початкових умов відносяться значення струму в силовому колі електродвигуна, а також кутова швидкість з якою обертається вал компресора. Така матриця в середовищі MathCAD має наступний запис:

$$vNU = \begin{pmatrix} I_{\text{поч}}(t) \\ \omega_{\text{поч}}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

Вектор функція, що містить праві частини диференціальних рівнянь (21), записана засобами MathCAD має наступний вигляд:

$$fD(t, Y) = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{L_{\Sigma}} \right) \cdot U_{\text{я}}(t) - c \cdot \Phi(Y_1) \cdot Y_2 - \left(\frac{R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}} \right) \cdot Y_1 \\ 0 \text{ if } t \leq 0 \\ c \cdot \Phi(Y_1) \cdot Y_1 - \begin{cases} M_{\text{с.поч}} & \text{if } t \leq 0 \\ M_{\text{с.поч}} + (M_{\text{с.ном}} - M_{\text{с.поч}}) \cdot \left(\frac{Y_2}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 & \text{otherwise} \end{cases} \\ J + \frac{G \cdot R^2 \cdot \sin \left[(Y_2 \cdot t) + \arcsin \left(\frac{R}{L} \cdot \sin(Y_2 \cdot t) \right) \right]^2}{\cos \left(\arcsin \left(\frac{R}{L} \cdot \sin(Y_2 \cdot t) \right) \right)^2} \end{bmatrix} \text{otherwise} \quad (25)$$

де змінні $Y_1 \equiv I(t)$, $Y_2 \equiv \omega(t)$.

Функція **Rkadapt** в результаті повертає матрицю з обрахованими значеннями струму I та кутової швидкості ω в функції часу t .

Враховуючи (22) – (25) автором створена програма в середовищі MathCAD по

дослідженню динаміки роботи електропривода поршневого компресора ЕК-7Б з електродвигуном ДК-406(409), лістинг якої наведено в Додатку А. Ця програма використовується для обрахунків та побудови графіків зміни струму в якірному колі електродвигуна та кутової швидкості валу компресора в функції часу.

Нормальними умовами роботи електроприводу компресора ЕК-7Б будемо вважати температуру навколишнього середовища на рівні $T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}$, номінальне значення напруги живлення $U_{\text{я}} = U_{\text{я.ном}} = 1500 \text{ В}$. За таких умов змодельовані крива струму в функції часу $I(t)$ (рис. 9) та крива кутової швидкості в функції часу $\omega(t)$ (рис. 10) будуть характеризуватись:

- максимальним значенням струму при пуску $I_{\text{max}} = 29,83 \text{ А}$;
- усталене значення струму $I = 4,7 \text{ А}$;
- ефективне значення струму на етапі пуску $I_{\text{е}} = 7,58 \text{ А}$;
- усталене значення кутової швидкості $\omega_{\text{уст}} = 100,97 \text{ с}^{-1}$.

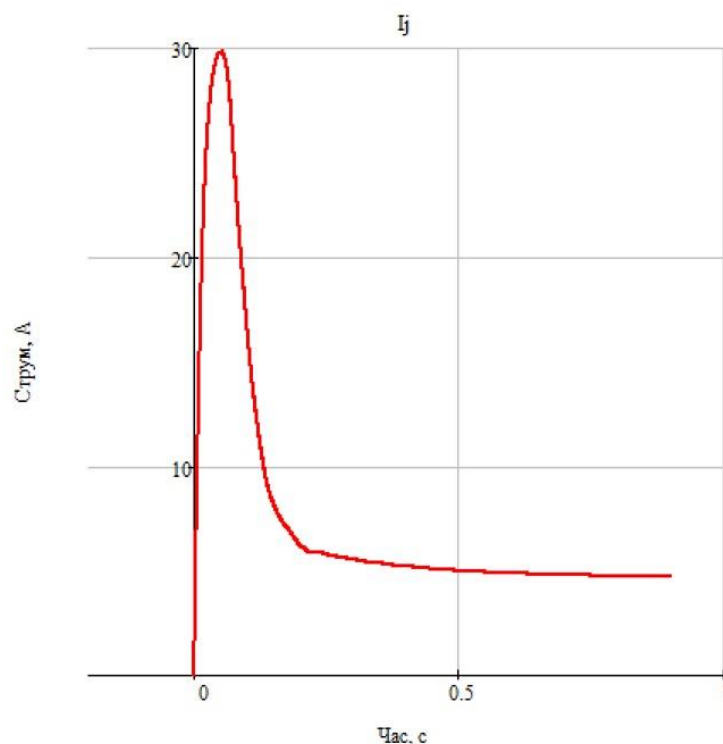


Рисунок 9 – Крива $I(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}, U_{\text{я}} = 1500 \text{ В}$$

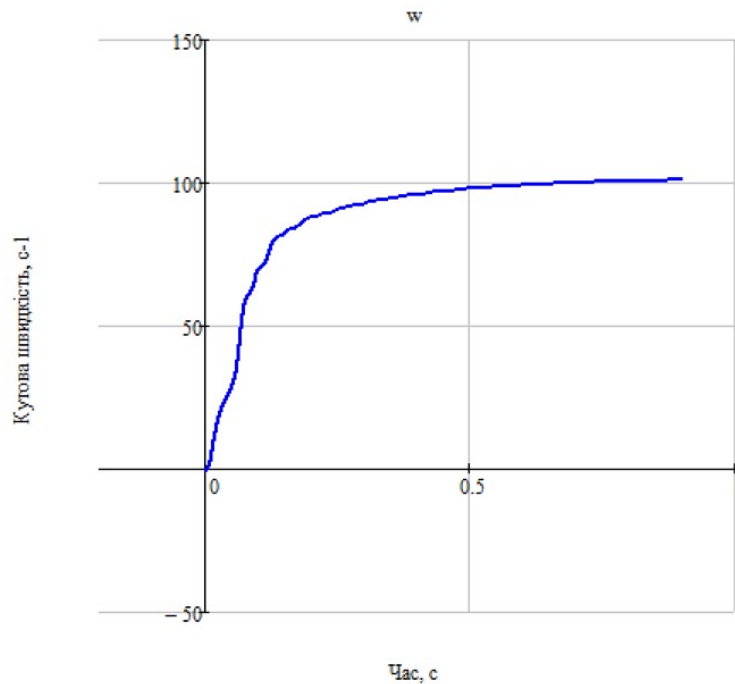


Рисунок 10 – Крива $\omega(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}, U_{\text{я}} = 1500 \text{ В}$$

В контактній мережі постійного струму допускаються граничні максимальне та мінімальне значення напруги на рівні відповідно – $U_{\text{max}} = 4000 \text{ В}$ та $U_{\text{min}} = 2200 \text{ В}$. Враховуючи схему живлення електродвигуна компресора відповідна напруга на якорі ДК-406(409) за вказаних умов складатиме відповідно – $U_{\text{я.мак}} = 2000 \text{ В}$ та $U_{\text{я.мін}} = 1100 \text{ В}$.

У випадку, коли напруга на якорі електродвигуна буде рівна $U_{\text{я}} = U_{\text{я.мак}} = 2000 \text{ В}$ крива струму в функції часу $I(t)$ (рис. 11) та крива кутової швидкості в функції часу $\omega(t)$ (рис. 12) будуть характеризуватись:

- максимальним значенням струму при пуску $I_{\text{мак}} = 40,26 \text{ А}$;
- усталене значення струму $I = 4,79 \text{ А}$;
- ефективне значення струму на етапі пуску $I_{\text{е}} = 8,7 \text{ А}$;
- усталене значення кутової швидкості $\omega_{\text{уст}} = 137,6 \text{ с}^{-1}$.

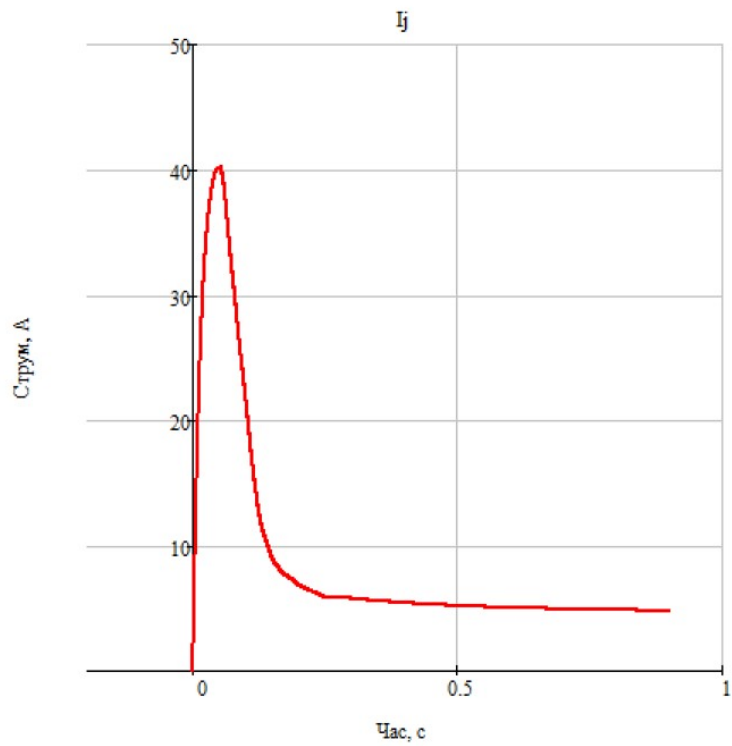


Рисунок 11 – Крива $I(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{н.сер} = +20^{\circ}\text{C}, U_{я} = 2000 \text{ В}$$

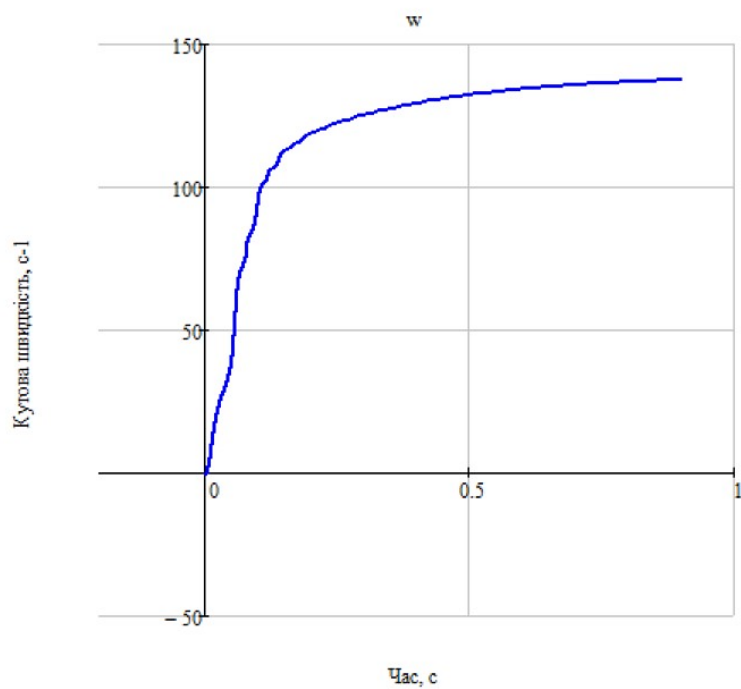


Рисунок 12 – Крива $\omega(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{н.сер} = +20^{\circ}\text{C}, U_{я} = 2000 \text{ В}$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

7.141.190040.ПЗ

Лист

37

Якщо напруга на якорі електродвигуна ДК-406(409) складе $U_{\text{я}} = U_{\text{я.min}} = 1100 \text{ В}$ крива струму в функції часу $I(t)$ (рис. 13) та крива кутової швидкості в функції часу $\omega(t)$ (рис. 14) будуть характеризуватись:

- максимальним значенням струму при пуску $I_{\text{max}} = 21,65 \text{ А}$;
- усталене значення струму $I = 4,7 \text{ А}$;
- ефективне значення струму на етапі пуску $I_{\text{е}} = 6,68 \text{ А}$;
- усталене значення кутової швидкості $\omega_{\text{уст}} = 71,2 \text{ с}^{-1}$.

Номінальне значення кутової швидкості валу компресора складає $\omega_{\text{ном}} = 106,76 \text{ с}^{-1}$. Зниження напруги живлення призводить до суттєвого зменшення кутової швидкості валу двигуна, а відповідно і компресора – $\Delta\omega = \omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{уст}} = 106,76 - 71,2 = 35,56 \text{ с}^{-1}$, що складає понад 33 %.

Відомо, що для компресорів потужність, напір, продуктивність і моменти пов'язані з частотою обертання (кількістю оборотів валу за хвилину чи секунду).

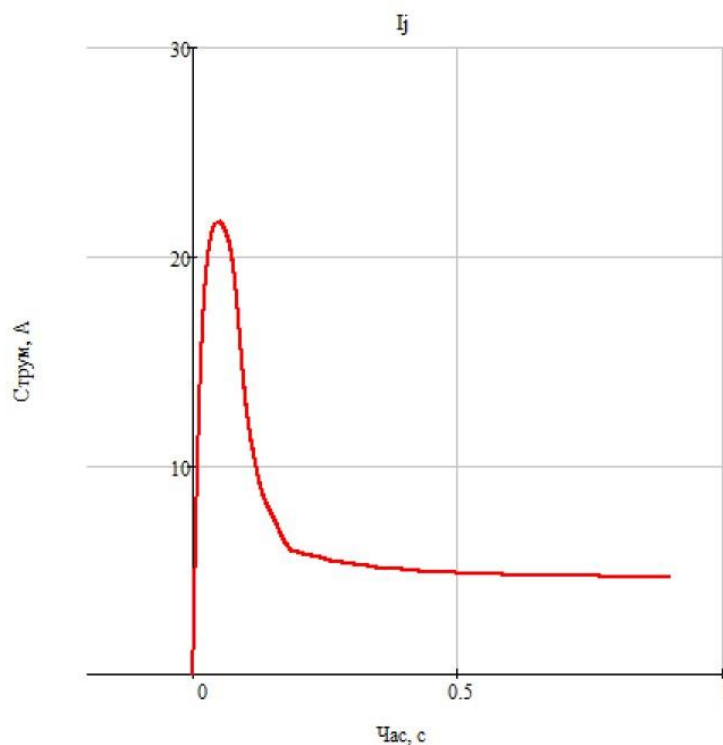


Рисунок 13 – Крива $I(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}, U_{\text{я}} = 1100 \text{ В}$$

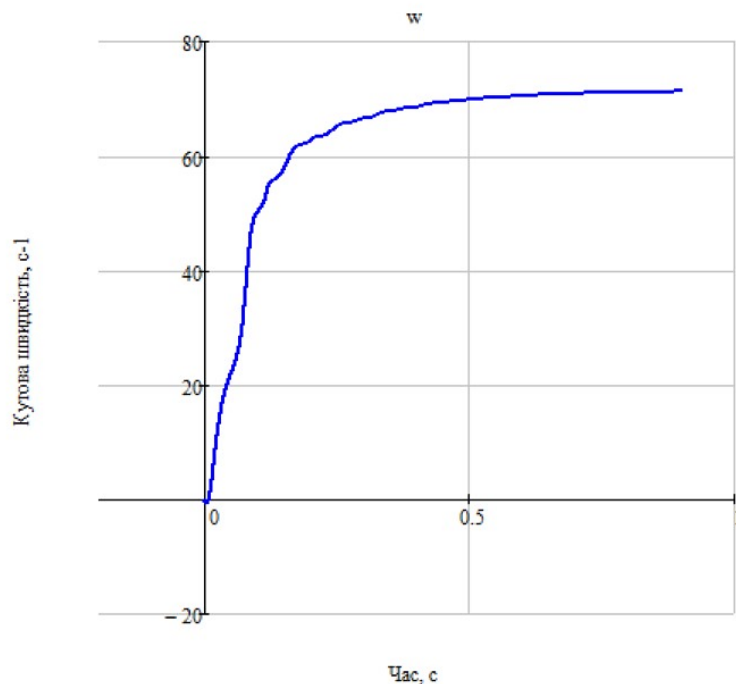


Рисунок 14 – Крива $\omega(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}, U_{\text{я}} = 1100 \text{ В}$$

Цей зв'язок описується законом пропорційності: зміна подачі (продуктивності) поршневого компресора [16]:

$$\frac{Q_i}{Q_{\text{ном}}} = \frac{\omega_i}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (26)$$

де $Q_{\text{ном}}$, Q_i – значення подачі відповідно номінальне та деяке поточно значення, що досягається за деякої швидкості ω_i .

Таким чином, зниження швидкості напряму впливає на продуктивність (прямопропорційно), тобто для того аби заповнити резервуари компресору знадобиться значно більше часу. Якщо компресор на номінальній швидкості забезпечує номінальне значення продуктивності (подачі), то із зниженням значення кутової швидкості на 33% на цю ж величину збільшиться час роботи установки аби заповнити резервуари.

Унормована тривалість увімкнення для електроприводу компресора складає $T_{\text{В}}=50\%$, зважаючи на збільшення часу роботи при зниженні напруги живлення та температурі навколишнього середовища $T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}$ можна отримати фактичне

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значення $TB=83\%$.

В пункті 1.1 даної роботи було показано, що зниження температури навколишнього середовища призводить до підвищення величини моменту неробочого ходу машини ($M_{с.поч}$). Так зниження температури навколишнього середовища до значення $T_{н.сер}=-10^{\circ}C$ призводить до збільшення моменту неробочого ходу машини у два рази, тобто $M_{с.поч} = 2 \cdot M_{с.ном}$.

З попередніх розрахунків видно, що зниження напруги живлення призводить до збільшення фактичного значення TB , а отже є найбільш небезпечною ситуацією. Тому достатньо змодельовати поведінку електроприводу компресора при живленні мінімально допустимою напругою $U_{я} = U_{я.min} = 1100$ В при температурі навколишнього середовища $T_{н.сер}=-10^{\circ}C$.

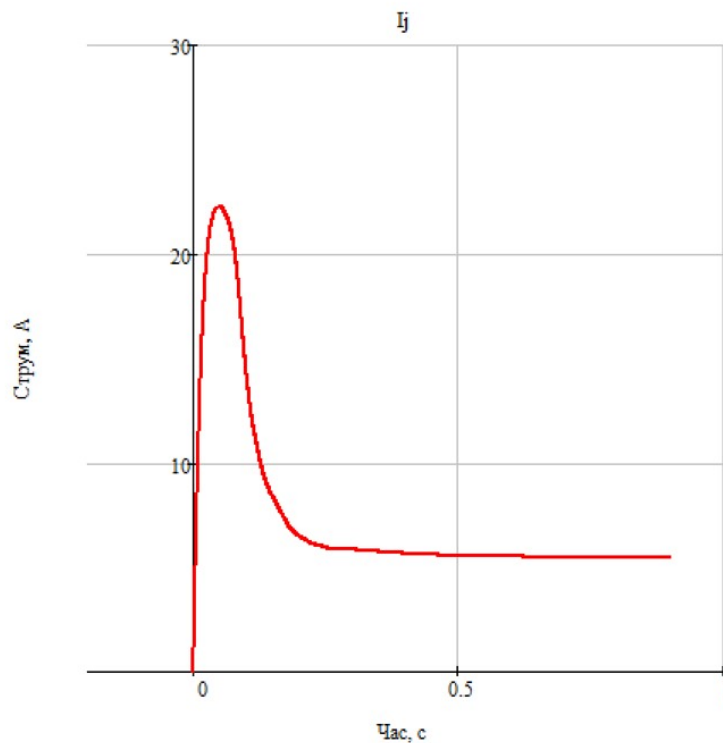


Рисунок 15 – Крива $I(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{н.сер}=-10^{\circ}C, U_{я}=1100$$
 В

В цьому випадку крива струму в функції часу $I(t)$ (рис. 15) та крива кутової швидкості в функції часу $\omega(t)$ (рис. 16) будуть характеризуватись:

- максимальним значенням струму при пуску $I_{max}=22,25$ А;

- усталене значення струму $I = 5,45 \text{ A}$;
- ефективне значення струму на етапі пуску $I_e = 7,4 \text{ A}$;
- усталене значення кутової швидкості $\omega_{\text{уст}} = 65 \text{ c}^{-1}$.

Зниження напруги живлення при температурі навколишнього середовища $T_{\text{н.сер}} = -10^\circ\text{C}$ призводить до найбільш суттєвого зменшення кутової швидкості валу двигуна, а відповідно і компресора – $\Delta\omega = \omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{уст}} = 106,76 - 65 = 41,76 \text{ c}^{-1}$, що складає приблизно 39 %.

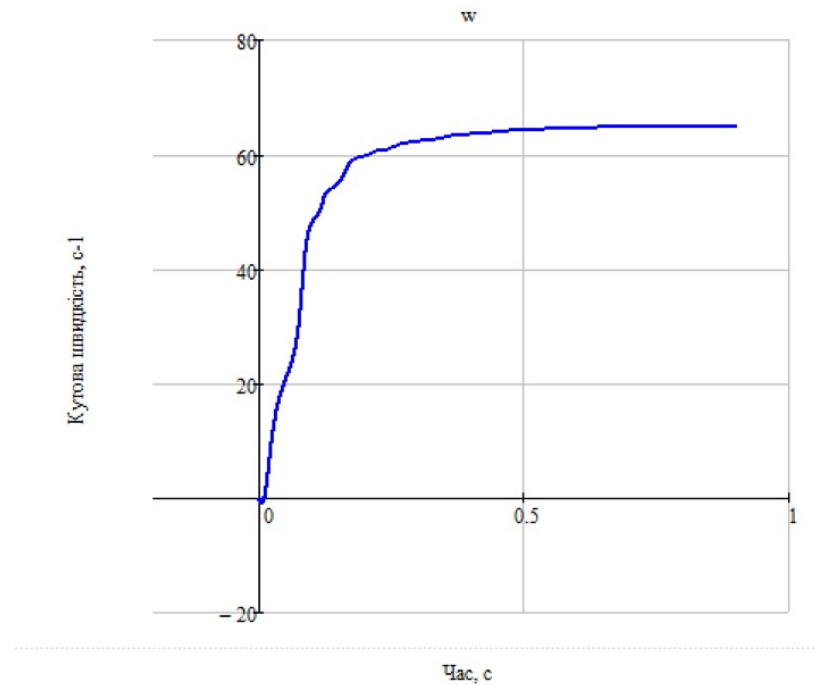


Рисунок 16 – Крива $\omega(t)$ за результатами розрахунку пуску в умовах:

$$T_{\text{н.сер}} = -10^\circ\text{C}, U_{\text{я}} = 1100 \text{ В}$$

Таким чином, найбільш важкою ситуацією при пуску компресора буде накладання двох негативних факторів: мінімальне значення напруги в контактній мережі та низька температура навколишнього середовища. Фактичне значення тривалості увімкнення може складати $T_B = 89\%$.

РОЗДІЛ 3

ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДК-406(409) ТА АНАЛІЗ ЙОГО ТЕПЛОВОГО СТАНУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВЕЛИЧИНИ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

3.1 Теплова модель електродвигуна ДК-406(409)

Для аналізу теплового стану електродвигуна ДК-406(409) в роботі використовується метод розгорнутих теплових (еквівалентних) схем. Основою даного методу є використання теплових опорів, що з'єднуються в теплову мережу, яка імітує реальні шляхи передачі теплових потоків в електричній машині або її частині, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом, засновану на однаковій формі основного закону теплопровідності (закон Фур'є) [19].

Теплові процеси в машині описуються наступним рівнянням нагрівання [19]:

$$Qdt - S\alpha\tau dt = mcd\tau, \quad (27)$$

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

S – площа поверхні з якої віддається тепло;

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

τ – перегрів тіла;

m – маса тіла;

c – питома теплоємність тіла;

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

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

$$\tau_{\text{кінц}} = \frac{Q}{S\alpha}. \quad (28)$$

Враховуючи статистичні дані п 1.2 тепла еквівалентна схема заміщення електродвигуна компресора створена виключно для якоря (ротора).

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

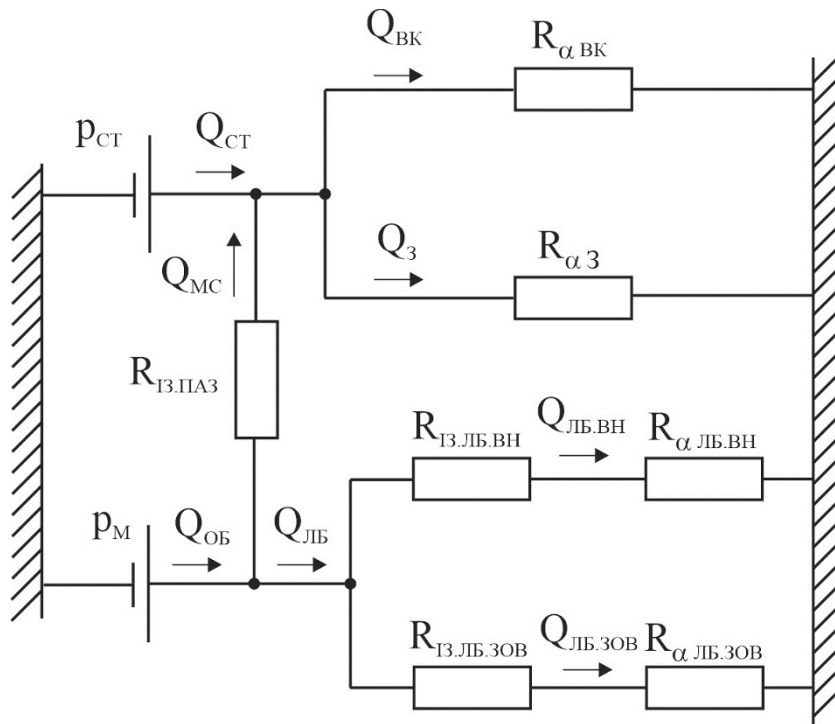


Рисунок 17 – Загальна схема теплових потоків в якорі (роторі)
електродвигуна ДК-406(409)

Еквівалентна теплова схема заміщення для якоря (ротора) електродвигуна ДК-406(409) (рис. 17) має наступні допущення [20]:

- температура обмоток якоря однакова по усьому їх об'єму;
- не враховується відведення тепла через клини, що кріплять обмотку в пазах, через їх малу теплопровідність;
- температура сталі, з якої виготовлений якір (ротор) однакова по усьому її об'єму;
- відведення тепла від сталевих бандажів (використовують для закріплення лобових частин якірної обмотки) відбувається без перепаду тепла в них (теплопровідність сталевих бандажів прямує до безкінечності).

Еквівалентна теплова схема заміщення якоря (ротора) ДК-406(409) має два джерела теплових потоків [20]:

- втрати потужності в обмотці якоря p_M , що утворюють тепловий потік $Q_{ОБ} = p_M$. Тепловий потік $Q_{ОБ}$ розділяється на дві складові:

$$Q_{ОБ} = Q_{ЛБ} + Q_{МС}, \quad (29)$$

де Q_{MC} – складова, що переходить із міді обмотки через пазову ізоляцію з опором $R_{изпаз}$ у сталь осердя якоря;

$Q_{ЛБ}$ – складова, що передається повітрю, яке охолоджує, через поверхні лобових з'єднань обмотки, яка у свою чергу також ділиться на дві складові:

$$Q_{ЛБ} = Q_{ЛБ.ЗОВ} + Q_{ЛБ.ВН}, \quad (30)$$

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

$Q_{ЛБ.ВН}$ – потік, який проходить скрізь ізоляційний шар із внутрішнього боку лобових з'єднань ($R_{из.ЛБ.ВН}$) і передається з нього до вентиляційного повітря. Тепловий опір цієї охолоджуючої поверхні $R_{\alpha ЛБ.ВН}$.

- втрати потужності в сталі якоря (ротора) $p_{СТ}$, що утворюють тепловий потік $Q_{СТ} = p_{СТ}$. Сумарний тепловий потік $Q_{СТ} + Q_{MC}$ (схема рис. 17) віддається вентиляційному повітрю двома шляхами: з поверхні зубців якоря (ротора) в об'ємі Q_3 ($R_{\alpha 3}$) і з поверхні внутрішніх вентиляційних каналів в об'ємі $Q_{ВК}$ ($R_{\alpha ВК}$), тобто:

$$Q_{СТ} + Q_{MC} = Q_3 + Q_{ВК}. \quad (31)$$

Величина теплового опору поверхні, що охолоджується [12, 19]:

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot (1 + k_{об} \sqrt{V}) \cdot S}, \quad (32)$$

де V – швидкість з якою рухається вентиляційне повітря;

$k_{об}$ – коефіцієнт інтенсивності обдування;

S – поверхня нагрітого тіла, з якої відводиться тепло шляхом конвекції.

Тепловий опір ізоляції [12, 19]:

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{\text{ІЗ}} = \frac{\delta_{\text{ІЗ}}}{\lambda_{\text{ІЗ}} \cdot S}, \quad (33)$$

де $\delta_{\text{ІЗ}}$ – товщина ізоляції;

$\lambda_{\text{ІЗ}}$ – питома теплопровідність ізоляційного матеріалу.

Маючи розміри і характер поверхонь з яких віддається тепло, а також матеріал і товщини ізоляційних покриттів, характер і ефективність вентиляційної системи електричного двигуна обраховуються за формулами (32) та (33) значення теплових опорів (для схеми рис. 17):

- поверхонь з яких віддається тепло: $R_{\alpha\text{ЛБ.ЗОВ}}$, $R_{\alpha\text{ЛБ.ВН}}$, $R_{\alpha\text{З}}$, $R_{\alpha\text{ВК}}$;
- шарів ізоляційного матеріалу: $R_{\text{ІЗ.ПАЗ}}$, $R_{\text{ІЗ.ЛБ.ЗОВ}}$, $R_{\text{ІЗ.ЛБ.ВН}}$.

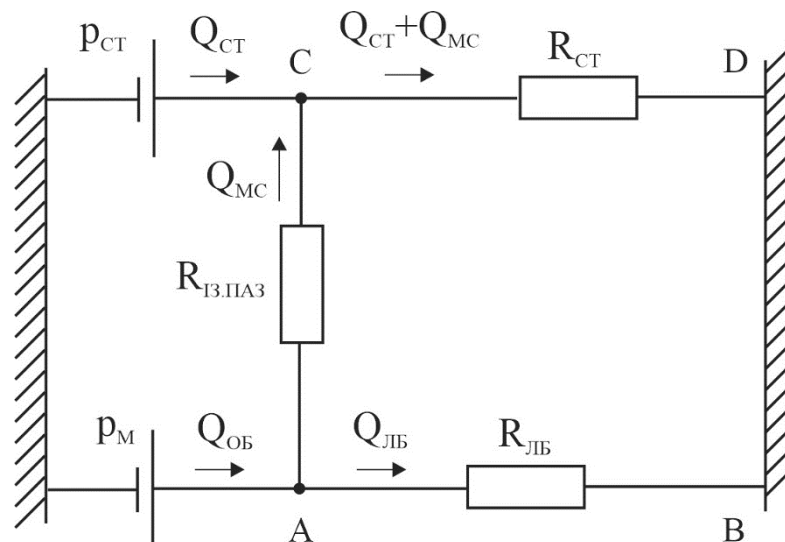


Рисунок 18 – Еквівалентна теплова схема якоря (ротора) двигуна ДК-406(409)

Якщо послідовне та паралельне увімкнення теплових опорів у схемі рис. 17 замінити еквівалентними величинами (розраховуються за загальними правилами, що застосовуються в електротехніці) отримаємо компактний варіант еквівалентної теплової схеми якоря ротора досліджуваної електричної машини (рис. 18).

В отриманій схемі рис. 18 тепловий потік $Q_{\text{ЛБ}}$ на тепловому опорі $R_{\text{ЛБ}}$ зумовлює перепад температури матеріалу обмотки якоря над температурою вентиляційного повітря:

$$\tau_{\text{обм}} = Q_{\text{ЛБ}} \cdot R_{\text{ЛБ}} = Q_{\text{ЛБ}} \cdot \frac{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} \cdot R_{\text{ЛБ.ВН}}}{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} + R_{\text{ЛБ.ВН}}}. \quad (34)$$

Тепловий потік $Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{МС}} = Q_3 + Q_{\text{ВК}}$ на тепловому опорі $R_{\text{СТ}}$ зумовлює перепад температури сталі осердя якоря (ротора) над температурою вентиляційного повітря:

$$\tau_{\text{СТ}} = (Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{МС}}) \cdot R_{\text{СТ}} = (Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{МС}}) \cdot \frac{R_{\alpha 3} \cdot R_{\alpha \text{ВК}}}{R_{\alpha 3} + R_{\alpha \text{ВК}}}. \quad (35)$$

Також на схемі рис. 18 спад теплового потенціалу на ділянці АВ рівний спаду теплового потенціалу на ділянці CD:

$$Q_{\text{ЛБ}} \cdot \frac{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} \cdot R_{\text{ЛБ.ВН}}}{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} + R_{\text{ЛБ.ВН}}} = Q_{\text{МС}} \cdot R_{\text{ІЗ.ПАЗ}} + (Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{М}}) \cdot \frac{R_{\alpha 3} \cdot R_{\alpha \text{ВК}}}{R_{\alpha 3} + R_{\alpha \text{ВК}}}. \quad (36)$$

Рівняння (29), (34), (35) і (36) об'єднанні в систему рівнянь описують теплові процеси в еквівалентній тепловій схемі якоря (ротора) електричного двигуна ДК-406(409).

$$\begin{cases} Q_{\text{ОБ}} = Q_{\text{ЛБ}} + Q_{\text{МС}} \\ \tau_{\text{обм}} = Q_{\text{ЛБ}} \cdot \frac{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} \cdot R_{\text{ЛБ.ВН}}}{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} + R_{\text{ЛБ.ВН}}} \\ \tau_{\text{СТ}} = (Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{МС}}) \cdot \frac{R_{\alpha 3} \cdot R_{\alpha \text{ВК}}}{R_{\alpha 3} + R_{\alpha \text{ВК}}} \\ Q_{\text{ЛБ}} \cdot \frac{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} \cdot R_{\text{ЛБ.ВН}}}{R_{\text{ЛБ.ЗОВ}} + R_{\text{ЛБ.ВН}}} = Q_{\text{МС}} \cdot R_{\text{ІЗ.ПАЗ}} + (Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{М}}) \cdot \frac{R_{\alpha 3} \cdot R_{\alpha \text{ВК}}}{R_{\alpha 3} + R_{\alpha \text{ВК}}} \end{cases}. \quad (37)$$

В системі алгебраїчних рівнянь (37) є чотири невідомих – $Q_{\text{ЛБ}}$, $Q_{\text{МС}}$, $\tau_{\text{обм}}$, $\tau_{\text{СТ}}$.

Розв'язок системи рівнянь (37) дозволяє визначити відповідні перевищення температури:

- $\tau_{\text{обм}}$ (перепад температури матеріалу обмотки якоря над температурою вентиляційного повітря);
- $\tau_{\text{СТ}}$ (перепад температури сталі осердя якоря (ротора) над температурою вентиляційного повітря).

3.2 Аналіз впливу зміни напруги живлення на тепловий стан ДК-406(409)

Система рівнянь (37), що описує теплові процеси в якорі (роторі) електродвигуна компресора, в результаті її розв'язку повертає кінцеві значення перегрівів при роботі машини із певним струмом. Це є обмеженням методу розгорнутих теплових (еквівалентних) схем. Для того аби оцінити характер теплових процесів в перехідних режимах роботи електродвигуна на протязі заданого проміжку часу застосовують наступний вираз [19]:

$$\tau(t) = \tau_{\text{кін}} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)}\right) + \tau_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)}, \quad (38)$$

де $\tau_{\text{кін}}$ – кінцевий перегрів даної частини машини, значення якого береться за результатами розв'язку системи рівнянь (37);

T – постійна часу нагрівання (охолодження) якоря електродвигуна;

t – час перехідного процесу (задається в процесі аналізу режиму роботи електродвигуна);

τ_0 – початковий перегрів даної частини машини.

Як було зазначено в пункті 3.1 теплова модель якоря (ротора) електродвигуна потребує значень теплових опорів, які можна визначити за формулами (32), (33). Результати розрахунку теплових опорів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Значення теплових опорів, що входять до теплової моделі ДК-406

Тепловий опір	Розрахункова величина, $\frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}}$
$R_{\alpha\text{ЛБ.ЗОВ}}$	0,077
$R_{\alpha\text{ЛБ.ВН}}$	0,12
$R_{\alpha 3}$	0,191
$R_{\alpha\text{ВК}}$	0,048
$R_{\text{ІЗ.ПАЗ}}$	99,931
$R_{\text{ІЗ.ЛБ.ЗОВ}}$	4,152
$R_{\text{ІЗ.ЛБ.ВН}}$	0,055

Також крім теплових опорів в тепловій схемі заміщення є два джерела теплових потоків які потребують визначення: $Q_{\text{СТ}} = p_{\text{СТ}}$ та $Q_{\text{ОБ}} = p_{\text{М}}$.

Сумарні втрати в сталі якоря (ротора) $p_{\text{СТ}}$ електричної машини при будь-якій частоті та індукції виражаються у вигляді [21]:

$$p_{\text{СТ}} = p_{[1/50]} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot B^2 \cdot G_{\text{СТ}}, \quad (39)$$

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

f – частота перемагнічування сталі, Гц;

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

B – розрахункова індукція в якорі машини, Тл;

$G_{\text{СТ}}$ – маса якоря (ротора) машини, кг.

Втрати в обмотці якоря [21]:

$$p_{\text{М}} = \left(\frac{I}{2 \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{N \cdot l_{\text{пр}}}{4600 \cdot S_{\text{пр}}}, \quad (40)$$

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, мм².

Розрахунок величини перегріву якірної обмотки електродвигуна ДК-406(409) автоматизований в пакеті прикладних математичних задач MathCAD з застосуванням спеціального блоку Given/Find.

Блок **Given/Find** складається з трьох частин, що слідують одна за одною:

Given – ключове слово;

система рівнянь, що записана логічними операторами у вигляді рівностей або нерівностей (допускається);

Find($x_1, x_2, \dots, x_n$) – вбудована функція для розв’язання системи відносно змінних $x_1, x_2, \dots, x_n$.

В пункті 2.4, в результаті математичного моделювання електромеханічних процесів в електроприводі компресора ЕК-7Б, отримані криві $I(t)$ та $\omega(t)$ для різних напруг живлення:

- номінальна напруга $U_{\text{я}} = U_{\text{я.ном}} = 1500 \text{ В}$;
- максимальна напруга $U_{\text{я}} = U_{\text{я.мах}} = 2000 \text{ В}$ (визначається максимально допустимим рівнем напруги у контактній мережі);
- мінімальна напруга $U_{\text{я}} = U_{\text{я.мін}} = 1100 \text{ В}$ (визначається мінімально допустимим рівнем напруги у контактній мережі).

Електропривод компресора ЕК-7Б працює у повторно-короткочасному режимі, що характеризується тривалістю ввімкнення ТВ. Унормоване значення цього параметра для ЕК-7Б $TV=50\%$ (досягається при номінальній напрузі живлення) при тривалості циклу $t_{\text{ц}}=10 \text{ хв}$ (час роботи t_p дорівнює часу паузи $t_{\text{п}}$ і складає 300 с.).

Відхилення напруги живлення від номінального значення призводить до відхилення значення ТВ від унормованого значення.

Таким чином, за допомогою теплової моделі (37) та рівняння (38) отримані криві зміни величини перегріву якірної обмотки в часі для усіх варіантів моделювання електромеханічних процесів викладених у пункті 2.4.

Крива $\tau = f(t)$ за умови живлення електродвигуна компресора номінальною напругою $U_{\text{я}} = U_{\text{я.ном}} = 1500 \text{ В}$ при температурі навколишнього середовища $T_{\text{н.сер}} = +20^\circ\text{C}$ наведена на рис. 19. За таких умов фактичне значення ТВ відповідає унормованому, а $t_p = t_{\text{п}} = 300$ секунд. Величина перегріву в кінці робочого періоду складає 83°C , що не перевищує граничне допустиме значення перегріву для ізоляції класу В, яка використовується в електричній машині ДК-406(409) (граничне допустиме значення перегріву ізоляції класу В для рухомих обмоток складає 120°C) [19]. В продовж паузи машина охолоджується і величина перегріву в кінці циклу складатиме $23,7^\circ\text{C}$.

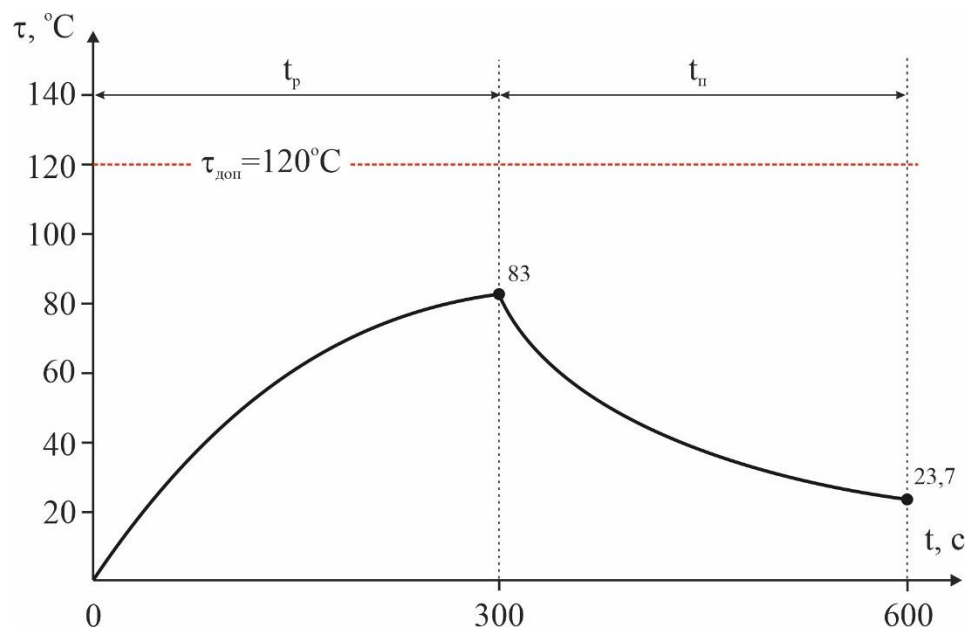


Рисунок 19 – Залежність $\tau = f(t)$ при $U_{\text{я}} = U_{\text{я.ном}} = 1500 \text{ В}$, $T_{\text{н.сер}} = +20^\circ\text{C}$

У випадку, коли напруга на якорі електродвигуна $U_{\text{я}} = U_{\text{я.мах}} = 2000 \text{ В}$, температура навколишнього середовища $T_{\text{н.сер}} = +20^\circ\text{C}$ крива $\tau = f(t)$ матиме вигляд наведений на рис. 20.

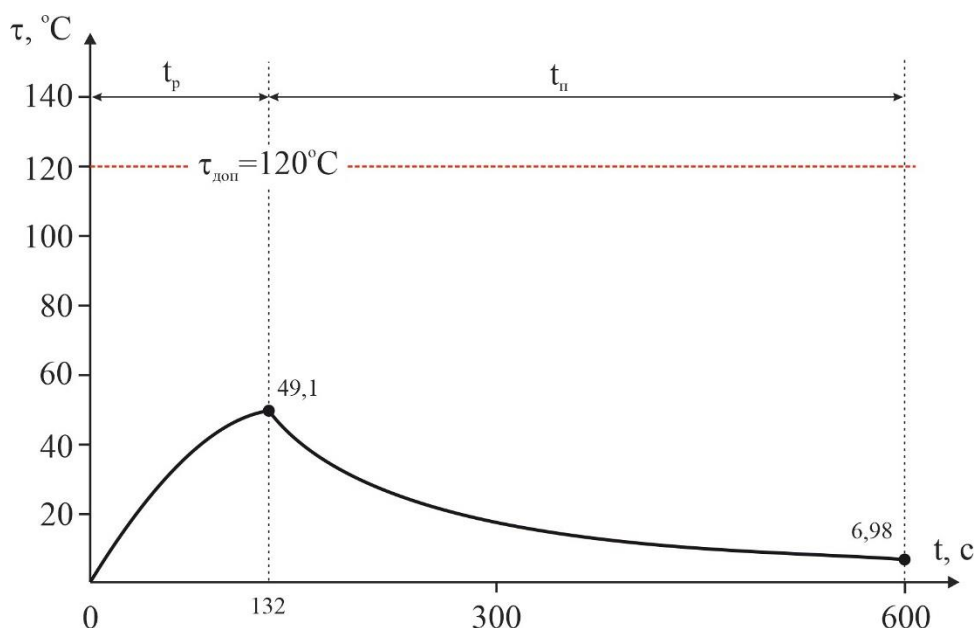


Рисунок 20 – Залежність $\tau = f(t)$ при $U_{\text{я}} = U_{\text{я.ном}} = 2000 \text{ В}$, $T_{\text{н.сер}} = +20^\circ\text{C}$

Підвищення наруги відносно номінального рівня призводить до зменшення фактичного значення тривалості ввімкнення, яке в даному випадку склало ТВ=22%. Відповідно час роботи $t_p = 132$ секунди, часу паузи $t_{\text{п}} = 468$ секунд.

Величина перегріву в кінці робочого періоду складає $49,1^{\circ}\text{C}$, що також суттєво менше гранично допустимого значення перегріву для ізоляції класу В (на рис. 20 показано червоною пунктирною лінією).

Для нижнього рівня напруги живлення ДК-406(409) $U_{\text{я}} = U_{\text{я.мін}} = 1100 \text{ В}$, температури навколишнього середовища $T_{\text{н.сєр}} = +20^{\circ}\text{C}$ крива $\tau = f(t)$ матиме вигляд наведений на рис. 21.

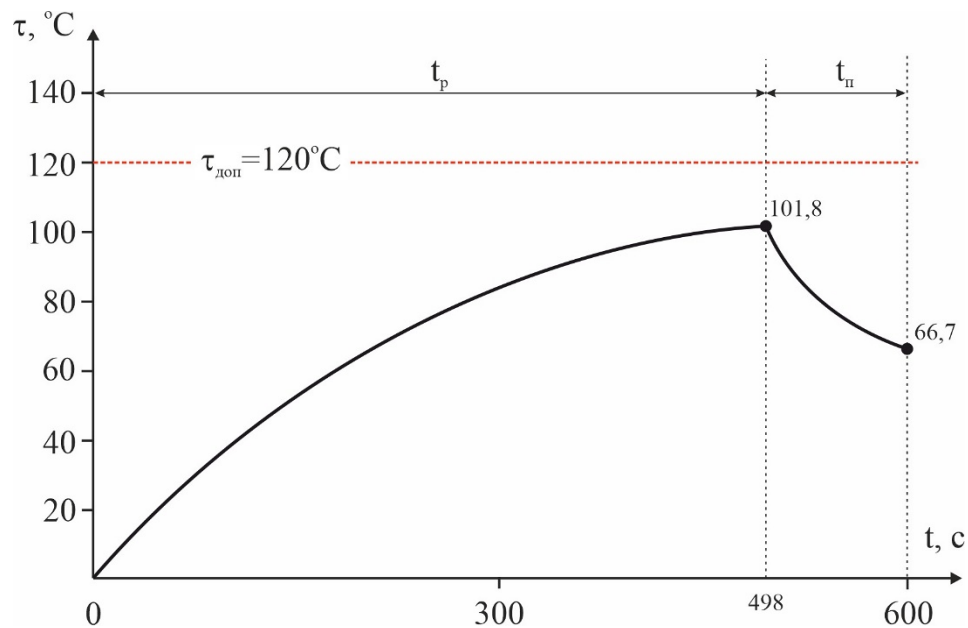


Рисунок 21 – Залежність $\tau = f(t)$ при $U_{\text{я}} = U_{\text{я.ном}} = 1100 \text{ В}$, $T_{\text{н.сєр}} = +20^{\circ}\text{C}$

Зниження напруги відносно номінального рівня призводить до збільшення фактичного значення тривалості ввімкнення, яке в даному випадку склало $\text{ТВ}=83\%$. Відповідно час роботи $t_p=498$ секунд, часу паузи $t_{\text{п}}=102$ секунди.

Величина перегріву в кінці робочого періоду складає $101,8^{\circ}\text{C}$, що не перевищує гранично допустимий рівень, але зважаючи на значення перегріву в кінці циклу на рівні $66,7^{\circ}\text{C}$ можна припустити, що декілька повторень аналогічних циклів можуть призвести до небезпечної ситуації, оскільки кожен наступний цикл буде мати високий початковий рівень перегріву, а часу паузи недостатньо для його зниження до безпечного рівня.

Найбільш важкою ситуацією в роботі електропривода компресора буде накладання двох негативних факторів: мінімальне значення напруги в контактній мережі та низька температура навколишнього середовища. В пункті 1.1 показано,

що зниження температури навколишнього середовища суттєво впливає на момент опору в механізмі компресора – він збільшується, так при зниженні температури повітря від $+20^{\circ}\text{C}$ до -10°C величина початкового моменту опору збільшується майже в 2 рази.

Таким чином, при напрузі $U_{\text{я}} = U_{\text{я.мін}} = 1100 \text{ В}$, температури навколишнього середовища $T_{\text{н.сеп}} = -10^{\circ}\text{C}$ крива $\tau = f(t)$ матиме вигляд наведений на рис. 22.

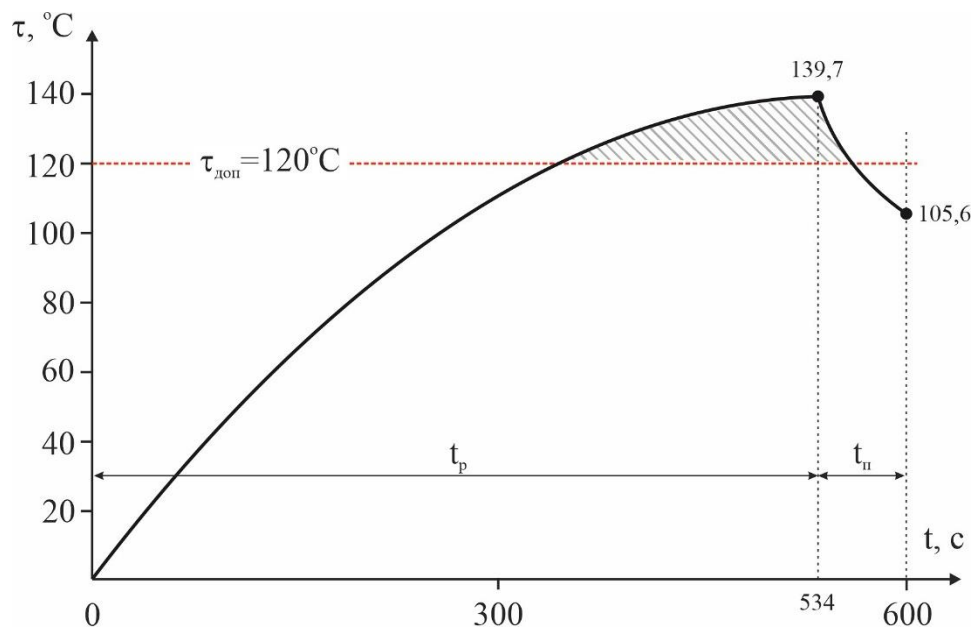


Рисунок 22 – Залежність $\tau = f(t)$ при $U_{\text{я}} = U_{\text{я.ном}} = 1100 \text{ В}$, $T_{\text{н.сеп}} = -10^{\circ}\text{C}$

Зниження напруги відносно номінального рівня призводить до збільшення фактичного значення тривалості ввімкнення, яке в даному випадку склало $\text{ТВ}=89\%$. Відповідно час роботи $t_p=534$ секунди, часу паузи $t_{\text{п}}=66$ секунд.

Величина перегріву в кінці робочого періоду складає $139,7^{\circ}\text{C}$, що на $19,7^{\circ}\text{C}$ перевищує гранично допустимий рівень в 120°C для ізоляції класу В. Відомо, що у разі перевищення допустимого перегріву час роботи ізоляції без ушкоджень різко зменшується за складним логарифмічним законом, так для ізоляції класу В перевищення фактичного значення перегріву над допустимим значенням на 20°C зменшує строк служби ізоляції майже у шість разів [19].

В табл. 4 наведені результати розрахунків теплового завантаження електродвигуна ДК-406(409) в залежності від напруги живлення та температури навколишнього середовища.

Таблиця 4 – Результати розрахунків величини перегріву ізоляції якірної обмотки ДК-409 в залежності від напруги живлення та температури навколишнього середовища

Напруга живлення $U_{\text{я}}$, В	Температура навколишнього середовища $T_{\text{н.сер}}$, °С	Величина перегріву τ , °С	
		По закінченню часу роботи t_p	По закінченню часу паузи $t_{\text{п}}$
1500	+20	83	23,7
2000		49,1	6,98
1100		101,8	66,7
	-10	139,7	105,6

В нормальних умовах експлуатації, до яких відноситься коливання напруги живлення в діапазоні $U_{\text{я}} = 1100 \dots 2000$ В, а також відсутність підвищених моментів опору в механізмі, які викликані загусанням мастила за низьких температур, розрахункова величина перегріву якірної обмотки не перевищує гранично допустимого значення для ізоляції класу В ($\tau_{\text{доп}} = 120$, °С для рухомих обмоток). Небезпечною є ситуація, коли компресор працює з підвищеним моменту опору в механізмі (спостерігається при від'ємних температурах навколишнього середовища, -10°С і нижче) і при цьому напруга на якорі має мінімально допустиме значення. На графіку (рис. 22) небезпечна зона заштрихована, експлуатація в таких умовах приведе до значного (в рази) зменшення терміну експлуатації машини, що підтверджується статистичними даними.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно –гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі праці [22].

Головною метою охорони праці є створення на кожному робочому місці безпечних умов праці, безпечної експлуатації обладнання, зменшення або повна нейтралізація дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів на організм людини і, як наслідок, зниження виробничого травматизму та професійних захворювань.

4.1 Шкідливі виробничі фактори, що присутні при роботі з компресором та засоби захисту від них

Основним негативними факторами на електрорухомому складі (в тому числі на електропоїздах), що впливає на організм людини є шум, вібрація та електромагнітне випромінювання (поле).

Шум – це сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю необхідних для людини сигналів. Шум несприятливо впливає на людину і може спричинити хворобливий стан, зокрема глухуватість і глухоту. Під впливом шуму у людини прискорюється пульс і дихання. Тривалий шум впливає на нервову та серцево-судинну систему: з'являються симптоми перевтоми, послаблюється увага, підвищується нервова збудливість, знижується працездатність, порушується робота шлунково-кишкового тракту [22]. Шум на електровозі створюють електричні машини, як тягові так і допоміжні (двигун компресора, вентилятора, електромашинний перетворювач), а також механізми, інструменти недосконалої конструкції, зі спрацьованими деталями.

Найефективнішим засобом боротьби з шумом є зниження його в джерелі створення. Для цього шумні технологічні процеси або обладнання замінюють на малошумні. Щоб зменшити шум в електропоїзді, використовують демпфування та

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

звукоізоляцію, екранування і глушники шуму, індивідуальні засоби захисту від шуму та інше.

Вібрація – це механічні коливання твердих тіл. З фізичної точки зору між шумом і вібрацією принципової відмінності немає, але людина сприймає їх по-різному: вібрація сприймається вестибулярним апаратом та дотиком, а шум – органом слуху [22]. Джерелом вібрації є механічні, пневматичні та електричні інструменти ударної або обертальної дії, обладнання, яке встановлено без достатньої амортизації та віброізоляції, а також транспортні машини. Вібрація буває загальна і місцева. За характером впливу на організм загальна вібрація передається на все тіло людини, а місцева – на руки працюючого. Місцева вібрація викликає погіршення кровопостачання окремих органів, при загальній вібрації порушується діяльність серця та центральної нервової системи. У разі довготривалої та інтенсивної дії вібрації може виникнути тяжке захворювання – вібраційна хвороба.

Дія вібрації залежить від її частоти. Вібрація з частотою 6 Гц є резонансною для всього організму. Людина при цьому відчуває качку, що діє на вестибулярний апарат і центральну нервову систему. Резонансна частота для органів черевної порожнини (шлунок, печінка та ін.) дорівнює 7 Гц, для голови – 17...27 Гц. У зв'язку з цим коливання з частотою 5...8 Гц викликає почуття вібрації внутрішніх органів; 17...25 Гц – відчуття вібрації в зубах; 40 Гц – відчуття вібрації в стопах.

Засоби боротьби з вібрацією поділяються на колективні та індивідуальні. Колективні методи – це методи зниження вібрації через вплив на джерело збудження і методи зниження вібрації на шляху її поширення. Індивідуальними засобами боротьби з вібрацією вважають використання віброзахисного взуття, прокладок, рукавиць. Засоби індивідуального захисту від вібрації:

- спеціальне віброзахисне взуття;
- рукавиці з м'якими вставками в зоні долонь;
- пружні прокладки та пластини для обхвату віброуючих рукояток та деталей.

Засоби, що використовуються під час реалізації вищезгаданих методів вітрозахисту, поділяються на: огорожувальні (захисні), вібро-ізоляційні, вібро-гасильні й вібро-поглинаючі.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- засоби автоматичного контролю, сигналізації та дистанційного керування;
- позначення віброуючих поверхонь знаком, або фарбою.

Захисні засоби запобігають доступу людини до ділянок, де діє вібрація. З точки зору конструкції вони можуть бути зроблені у вигляді ґратчастих, сітчастих та непрозорих перешкод з металу, деревини тощо. Віброізоляція зменшує рівні вібрації, що передаються від джерела на тіло працюючого. Віброізоляція здійснюється уведенням між джерелом вібрації та працюючим проміжного пружного зв'язку, наприклад, фундамент машин, збудований на пружних на пружних прокладках.

Вібро-поглинання – це перетворення енергії механічних коливань (вібрації) в інші види енергії (теплову).

Вібро-поглинання може бути здійснене використанням конструктивних матеріалів зі значним внутрішнім тертям, нанесенням на поверхню виробу шару пружно в'язких матеріалів, що мають значне внутрішнє тертя.

Вібро-поглинання здійснюється покриттям машин в'язкими матеріалами, використанням масляних ванн для зубчастих зчеплень. Дистанційне керування дозволяє уникнути постійного перебування людини в зоні шкідливих вібрацій.

Електромагнітне випромінювання. Джерелами електромагнітного випромінювання є потужні телевізійні та радіомовні станції, промислові установки високочастотного нагріву, вимірювальні прилади, а також будь-які елементи, що підключені до високочастотної мережі. Дія електромагнітних полів на організм людини виявляється у функціональному розладі центральної нервової системи [22].

Суб'єктивні почуття при цьому – підвищена втома, головний біль, зниження точності робочих рухів, млявість.

Основні види захисту:

- зменшення рівня випромінювання безпосередньо біля джерела;
- дистанційний контроль і керування в екранованому приміщенні;
- організаційні заходи (проведення дозиметричного контролю, медичні огляди, додаткова відпустка, скорочені робочі дні);
- застосування засобів індивідуального захисту(спецодяг, захисні окуляри).

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Дії працівників депо в надзвичайних ситуаціях, що виникли під час ремонту чи обслуговування компресора ЕК-7Б

Пожежі представляють особливу небезпеку, оскільки пов'язані з значними матеріальними втратами. Як відомо пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин, окислення і джерел запалення. Горючими компонентами є: будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів, обтирочний матеріал просякнутий мастилом чи бензином і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, направлених на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження її розповсюдження, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі [22].

Джерелами спалаху можуть бути електроприлади, що використовуються для технічного обслуговування, пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри і дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів. При протіканні по ним електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливе оплавлення ізоляції. Для відведення надмірної теплоти служать системи вентиляції і кондиціонування. При постійній дії ці системи є додатковою пожежною небезпекою.

Для більшості електропоїздів в моторних вагонах яких розміщені двигун-компресори, встановлена категорія пожежної безпеки В.

До засобів гасіння пожежі, призначених для локалізації невеликих спалахів, відносяться пожежні стовбури, внутрішні пожежні водопроводи, вогнегасники, сухий пісок, азбестові ковдри і т. п.

Для гасіння пожеж на початкових стадіях широко застосовуються вогнегасники. По типу активної речовини вогнегасники підрозділяються на наступні основні групи:

- пінні вогнегасники, застосовуються для гасіння рідин, що горять, різних матеріалів, конструктивних елементів і устаткування, окрім електроустаткування, що знаходиться під напругою;

- газові вогнегасники застосовуються для гасіння рідких і твердих речовин, а також електроустановок, що знаходяться під напругою.

4.3 Вимоги пожежної безпеки на електропоїздах та депо де вони проходять ремонт та обслуговування

У виробничих приміщеннях депо і на електропоїздах повинні бути забезпечені протипожежні заходи відповідно до Правил пожежної безпеки на залізничному транспорті (ЦУО–0018) і ПУЕ.

При виконанні монтажу й обслуговування пристроїв автоматичного гальмування при саморозчепленні необхідно застосовувати запобіжні заходи щодо уникнення пожеж.

Обслуговуючий персонал повинен пройти навчання й перевірку знань пожеже-технічного мінімуму.

Виробниче приміщення депо та електрорухомий склад повинні бути оснащені засобами пожежогасіння відповідно до норм оснащення об'єктів та рухомого складу залізничного транспорту первинними засобами пожежогасіння.

При зварювальних роботах у кузові електропоїзда необхідно мати в місці провадження робіт вогнегасники, пісок, воду й захисні екрани (щити) для обмеження поширення іскор. Зварник не повинен приступати до вогневих робіт без письмового дозволу, виданого головним інженером або керівником підприємства й погодженого з пожежною охороною.

Додатково при проведенні вогневих робіт з кузові електропоїзда видаляють горючі матеріали (утеплювач, деталі конструкцій, обтиральні й мастильні матеріали й інше) у радіусі 2 м від місця нагрівання металу.

Забороняються зварювальні роботи на свіжопофарбованому електрорухомому складі.

Після закінчення зварювальних робіт виконавець повинен забрати встаткування, пристосування, інструмент і матеріали, що застосовувались при цьому, переконатися у відсутності джерел загоряння й доповісти відповідальному керівникові.

Для ліквідації пожеж на електропоїздах застосовуються первинні засоби пожежогасіння відповідно до діючих норм оснащення протипожежним устаткуванням рухомого складу.

Гасіння палаючих предметів, розташованих на відстані менше 2 м від контактної мережі, дозволяється робити тільки після попереднього зняття напруги й заземлення контактної мережі у встановленому порядку.

Гасіння палаючих предметів, розташованих на відстані більше 7 м від контактної мережі, що перебуває під напругою, може бути допущене без зняття напруги. При цьому необхідно стежити, щоб струмінь води або піни не наближалася на відстань менш 2-х метрів до контактної мережі й інших предметів, що перебувають під напругою.

При гасінні пожежі забороняється до зняття напруги наближатися до проводів й інших частин контактної мережі на відстань менш 2 м, а до обірваних проводів контактної мережі до їхнього заземлення на відстань менш 10 м.

Якщо пожежа не може бути ліквідований самотужки, машиніст зобов'язаний у встановленому порядку чекати пожежний поїзд, розчепити електрорухомий склад й ізолювати палаючий локомотив або вагон від інших вагонів, дерев'яних будівель.

Забороняється зупиняти поїзд на залізничних мостах, естакадах, у тунелях, під мостами, шляхопроводами й іншими місцями, що не допускають евакуацію пасажирів і перешкоджаючих організацій гасіння пожежі.

Після ліквідації пожежі, подача напруги на електропоїзд, де мало місце ушкодження електричних проводів й устаткування забороняється. Ушкоджений пожежею локомотив доставляється в депо при опущених струмоприймачах і відключеному ланцюзі керування.

Локомотивні й ремонтні бригади повинні бути навчені правилам користування засобами пожежогасіння й способам гасіння пожеж відповідно до вимог інструкції з гасіння пожеж у рухомому складі.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В роботі проведений аналіз факторів, що впливають на працездатність електропривода компресора ЕК-7Б. Встановлено, що найбільший відсоток виходів з ладу електродвигуна ДК-406(409) компресора ЕК-7Б відбувається по причині прогару обмотки якоря (тепловий пробій ізоляції якірної обмотки). Причинами цього можуть бути:

- відхилення фактичного значення тривалості роботи (ТВ) електроприводу компресора від унормованої величини, спричинене живленням приводного електродвигуна неномінальною напругою;
- перевантаження якірної обмотки електродвигуна ДК-406(409) надвисокими струмами на етапі запуску, що спричинені підвищеним моментом опору в механізмі, який викликаний загусанням мастила за низьких температур навколишнього середовища.

Для дослідження впливу відхилення напруги живлення та кліматичних факторів на тепловий стан електродвигуна використано комп'ютерне математичне моделювання електромеханічних і теплових процесів в пакеті прикладних математичних програм MathCAD.

Автором розроблена електромеханічна модель електропривода поршневого компресора ЕК-7Б та теплова схема заміщення якоря електродвигуна ДК-406(409). Сумісне використання яких дозволяє отримувати значення перегріву якірної обмотки за різних напруг живлення якоря електродвигуна з урахуванням кліматичного фактору – напруги навколишнього середовища.

За результатами моделювання встановлено, що в нормальних умовах експлуатації, до яких відноситься коливання напруги живлення в діапазоні $U_{\text{я}} = 1100 \dots 2000 \text{ В}$, а також відсутність підвищених моментів опору в механізмі, які викликані загусанням мастила за низьких температур, розрахункова величина перегріву якірної обмотки не перевищує гранично допустимого значення для ізоляції класу В ($\tau_{\text{доп}} = 120, ^\circ\text{C}$ для рухомих обмоток). Небезпечною є ситуація, коли компресор працює з підвищеним моменту опору в механізмі (спостерігається при від'ємних температурах навколишнього середовища, -10°C і нижче) і при цьому

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напруга на якорі має мінімально допустиме значення. Експлуатація в таких умовах приведе до значного (в рази) зменшення терміну експлуатації машини, що підтверджується статистичними даними.

Враховуючи отримані результати, для підвищення працездатності електропривода мотор-компресора рекомендується:

- підвищити клас ізоляційних матеріалів, що використовуються в двигуні ДК-406(409);
- переглянути налаштування захисної апаратури;
- застосовувати підігрів картера компресора в холодну пору року;
- застосовувати для компресора ЕК-7Б більш якісні мастила, що не загусають при низьких температурах навколишнього середовища.

В роботі приділена увага питанню охорони праці та безпеці в надзвичайних ситуаціях.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>
2. Корнійко Я. Р. Сучасний розвиток транспортної системи України / Я. Р. Корнійко // Проблеми підвищення ефективності інфраструктури: наук.-техн. зб. – 2012.– Вип. 35. – С. 71-79.
3. Укрзалізниця затвердила Програму електрифікації залізниць на 2011-2016 роки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.uz.gov.ua/press_center/latest_news/archive/main_2011/page-6/244152/
4. Дубинець Л. В. Вплив умов експлуатації на надійність двигунів компресорів електропоїздів постійного струму / Л. В. Дубинець та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. № 18 – С. 29-31.
5. Цукало П. В., Єрошкін Н. Г. Електропоїзда ЕР2 і ЕР2Р. – М: Транспорт, 1986. – 359 с.
6. Дубинець Л. В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини / Л. В. Дубинець, О. І. Момот, О. Л. Маренич. – Д.: ТОВ ВКФ «Арт-Прес», 2004. – 206 с.
7. Краснов Р. В. Оцінка впливу перегріву ізоляції електродвигуна компресора електропоїзда постійного струму ЕР-1, ЕР-2 при неномінальних режимах роботи на термін її служби / Р.В. Краснов // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2011.– Вип. 86. – С. 167-171.
8. О.А. Некрасов Допоміжні машини електрорухомого складу змінного струму. – М.: Транспорт, 1967. – 168 с.
9. Правила технічної експлуатації залізниць. Міністерство транспорту України. Наказ № 411 від 20.12.96, м. Київ, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 25 лютого 1997 р. за № 50/1854.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. 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.
11. Дубинець Л. В. Дослідження перехідних процесів при пускові двигуна компресора електропоїзда EP2 (EP1) / Л. В. Дубинець, Д. В. Устименко, Р. В. Краснов // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – № 7. – С. 58-62.
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. Комп'ютерне моделювання: Навчальний посібник / О.В. Василенко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 175 с.
14. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навчальний посібник. – Київ: НАУ, 2017. – 392 с.
15. Математичне моделювання новітніх технологічних систем.: Монографія/ Матвійчук В.А., Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А. – Вінниця: 2021. – 193 с.
16. Попович М.Г. Теорія електроприводу / М.Г. Попович, М. Г. Борисик, В.А. Гаврилюк. -К.: Вища шк., 1993. -494 с
17. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. – 376с.
18. Гладир А.І. Торкання і пуск як фази одного процесу – Наукові праці КГПУ. Випуск 1/2001(10), Кременчук – С. 24-29.
19. 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.
20. 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.

21. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів: Ви-во Львівської політехніки, 2011. – 464 с.
22. Москальова В.М. Основи охорони праці: Підручник. – К.: ВД «Професіонал», 2005. – 672с.

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

- 1) Фактори, що впливають на працездатність електропривода компресора ЕК-7Б;
- 2) Електромеханічна модель електропривода компресора ЕК-7Б;
- 3) Теплова модель якоря (ротора) електродвигуна ДК-406(409);
- 4) Аналіз теплового стану ДК-406(409) в залежності від величини напруги живлення та температури навколишнього середовища;

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Лістинг програми по дослідженню динаміки роботи електропривода поршневого компресора ЕК-7Б з електродвигуном ДК-406(409) в середовищі MathCAD

Параметри електродвигуна ДК-406(409)

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad \text{TOL} := 10^{-5} \quad g := 9.81$$

Число пар полюсів	$p := 2$
Потужність, Вт	$P_n := 5000$
Номінальна напруга живлення, В	$U_{nom} := 1500$
Номінальний струм, А	$I_{nom} := 4.65$
Номінальна кутова швидкість, 1/с	$\omega_{nom} := 106.8$
Активний опір кола обмотки збудження, Ом	$R_{ov} := 12.1$
Активний опір ярірного кола, Ом	$R_j := 7.66$
Демпферний опір ярірного кола, Ом	$R_d := 14$
Діаметр ротора, м	$D_2 := 0.318$
Довжина ротора, м	$l_2 := 0.250$

Параметри компресора ЕК-7Б

Діаметр поршня, м	$D_p := 0.112$
Відстань між центрами отворів шатунних головок, м	$\underline{L} := 0.208$
Вага поршня із штоком (два циліндри), кг	$\underline{G} := 32.68$
Хід поршня, м	$R_{hp} := 0.14$

Сумарна індуктивність ярірного кола електродвигуна, Гн

$$k := 0.55$$

$$\Sigma L := \left(k \frac{U_{nom}}{I_{nom}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\omega_{nom} p} \right)$$

$$\Sigma L = 0.831$$

Сумарний активний опір ярірного кола електродвигуна, Ом

$$\Sigma R := R_{ov} + R_j + R_d$$

$$\Sigma R = 33.76$$

Номінальний момент, що розвивається електродвигуном, Нм

$$M_{nom} := \frac{U_{nom} \cdot I_{nom} - I_{nom}^2 \cdot (R_{ov} + R_j)}{\omega_{nom}}$$

$$M_{nom} = 61.308$$

$$C_m \Phi_{nom} := \frac{M_{nom}}{I_{nom}}$$

$$C_m \Phi_{nom} = 13.185$$

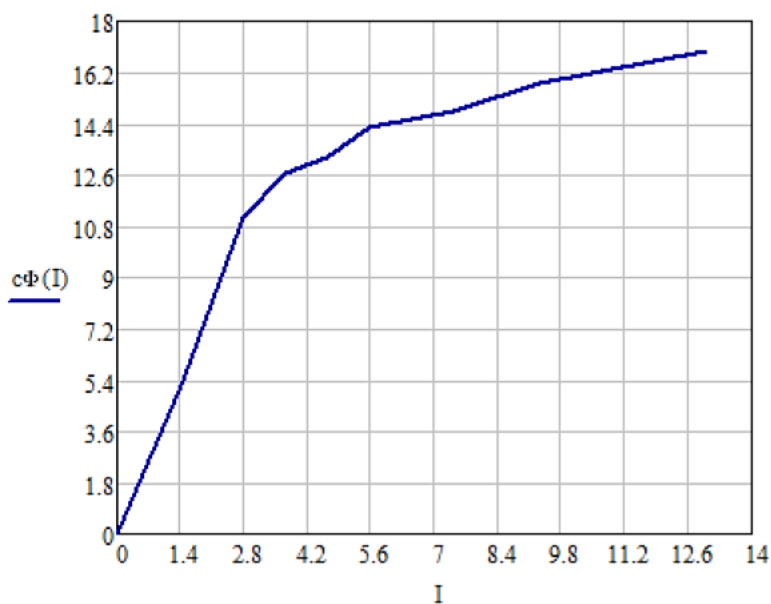
Момент інерції ротора електродвигуна, кг*м²

$$J_{nd} := 0.6 \cdot D_2^4 \cdot (12 + 0.3 \cdot D_2 + 0.75 \cdot P_n) \cdot 10^{-2}$$

$$J_{nd} = 0.23$$

Навантажувальна характеристика електродвигуна ДК-406(409) оримана шляхом переобрахування по універсальним характеристикам.

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} 0 \\ \left(\begin{array}{c} 5.2 \\ 11.1 \\ 12.65 \end{array} \right) \end{array} \\ \text{сФ(I)} := \left(\begin{array}{c} 13.185 \\ 14.3 \\ 14.84 \\ 15.8 \\ 16.98 \end{array} \right) \end{array} \quad \begin{array}{c} \begin{array}{c} 0 \\ \left(\begin{array}{c} 1.395 \\ 2.79 \\ 3.72 \end{array} \right) \\ I := \left(\begin{array}{c} 4.65 \\ 5.58 \\ 7.44 \\ 9.3 \\ 13 \end{array} \right) \end{array}$$



Лінеаризована навантажувальна характеристика (метод кусочно-лінійної апроксимації)

$$\text{сФ(Y1)} := \begin{cases} 3.6 \cdot Y1 & \text{if } 0 \leq Y1 \leq 2.76 \\ 8.1 + 1.1 \cdot Y1 & \text{if } 2.76 < Y1 \leq 5.865 \\ 13.1 + 0.29 \cdot Y1 & \text{if } 5.865 < Y1 \leq 13 \\ 17.1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Напруга живлення, В

$$U(t) := \begin{cases} \frac{3000}{2} & \text{if } 0 \leq t \leq 1 \\ \frac{3000}{2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Математична модель електромеханічної системи

$$fD(t, Y) := \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\Sigma L} \right) \cdot U(t) - C\Phi(Y_1) \cdot \left(\frac{1}{\Sigma L} \right) \cdot Y_2 - \left(\frac{\Sigma R}{\Sigma L} \right) \cdot Y_1 \\ 0.000000001 \text{ if } t \leq 0.000000001 \\ C\Phi(Y_1) \cdot Y_1 - \begin{cases} Msn \text{ if } t \leq 0.01 \\ Msn + (Mnom - Msn) \cdot \left(\frac{Y_2}{\omega_{nom}} \right)^2 \text{ otherwise} \end{cases} \\ Jnd + \frac{G \cdot R_{hp}^2 \cdot \sin^2 \left[Y_2 \cdot t + \operatorname{asin} \left(\frac{R_{hp}}{L} \cdot \sin(Y_2 \cdot t) \right) \right]}{\cos^2 \left(\operatorname{asin} \left(\frac{R_{hp}}{L} \cdot \sin(Y_2 \cdot t) \right) \right)} \end{bmatrix} \text{ otherwise}$$

Матриця початкових умов

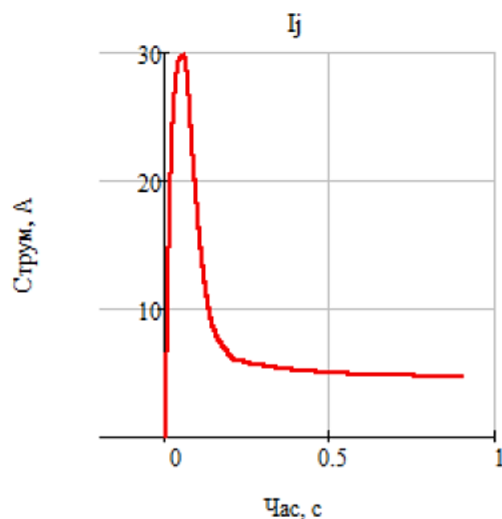
$$vNU := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$N := 5000$$

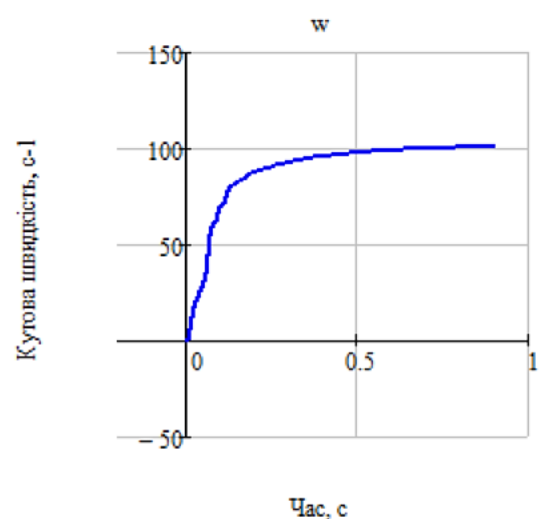
$$t_1 := 0 \quad tend := 0.9$$

$$MR := Rkadapt(vNU, t_1, tend, N, fD)$$

Графік залежності струму якоря від часу



Графік залежності частоти обертання валу компресора



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

7.141.190040.ПЗ

Лист

68

$$\sum MR^{(2)} = 3.791 \times 10^4$$

$$I_{ekv} := \frac{\sum MR^{(2)}}{N}$$

$$I_{ekv} = 7.582$$

величина еквівалентного струму, А

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б
Графічні роботи

					7.141.190040.ПЗ	Лист
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Статистичні дані по виходу з ладу двигунів ДК-406(409) по гітарі двигуна
спостереження один рік)

Вид несправності	Кількість пошкоджень	Відсоток від загальної кількості пошкоджень, %
Прогар обмотки якоря	25	44,6
Знос сальника	4	7,1
Брак моторно-якірного підшипника	5	8,9
Пробій обмотки збудження	8	14,3
Обрив валу	4	7,1
Зношення валу	2	3,6
Прогар обмоток головного полюса	6	10,7
Зношення колектору	1	1,8
Вихід з ладу моторно-якірного підшипника	1	1,8
Разом	56	100



Причини (ймовірні) втрати правцездатності електродвигуном компресора:

- відхилення фактичного значення тривалості роботи (ТВ) електроприводу компресора від унормованої величини, спричинене живленням приводного електродвигуна неномінальною напругою;
- перевантаження якірної обмотки електродвигуна ДК-406(409) надвисокими струмами на етапі запуску, що спричинені підвищеним моментом опору в механізмі, який викликаний загусанням мастила за низьких температур навколишнього середовища.

					Фактори, що впливають на працездатність електропривода компресора ЕК-7Б		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Зав. кафедр.	Муха А.М.			27.12	Додаток Б 7.141.190040.01		
Н. контр.	Карзова О.О.			27.12			
Осн. керів.	Устименко Д.В.			27.12			
Розробив	Гурбич І.С.			25.12			
					Стад.	Аркуш	Аркушів
						71	74
					Український державний університет науки і технологій, група ЕЕ2221		

Кінематична схема кривошипно-шатунного механізму поршневого компресора ЕК-7Б

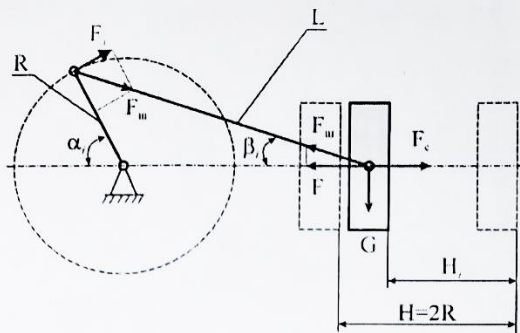
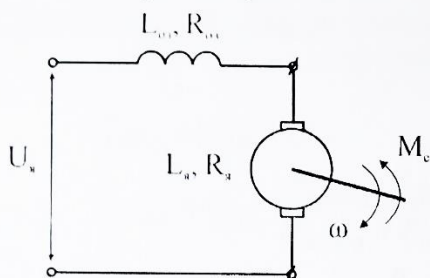
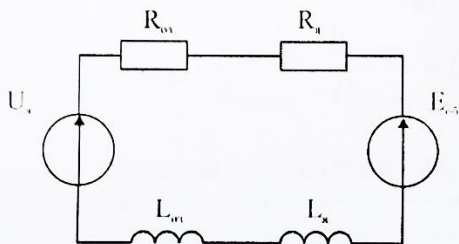


Схема двигуна постійного струму послідовного збудження ДК-406(409):
- електрична принципова



- електрична заміщення



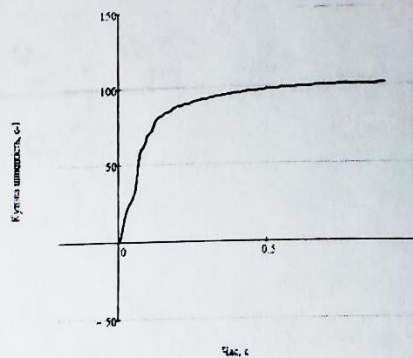
Система, що описує електро механічні процеси в електроприводі компресора

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{U_n(t)}{L_z} - \frac{c \cdot \Phi(I(t)) \cdot \omega(t)}{L_z} - \frac{R_z \cdot I(t)}{L_z}$$

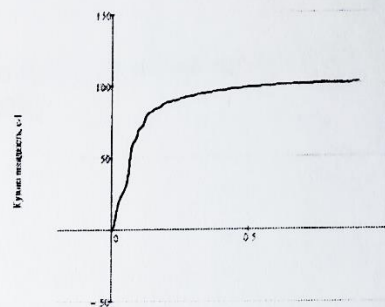
$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{c \cdot \Phi(I(t)) \cdot I(t) - \left[M_{с.пoc} + (M_{с.ном} - M_{с.пoc}) \cdot \left(\frac{\omega(t)}{\omega_{ном}} \right)^p \right]}{\left(\frac{m \cdot R^2 \cdot \sin^2(\alpha + \beta)}{\cos^2(\beta)} \right) + \left(\frac{0.6 \cdot D_1^4 \cdot (l_p + 0.3 \cdot D_2 + 0.75 \cdot P_{ном})}{10^2} \right)}$$

$$c \cdot \Phi(I(t)) = \begin{cases} c \cdot \Phi_{01} + k_{\Phi 1} \cdot I(t) \\ c \cdot \Phi_{02} + k_{\Phi 2} \cdot I(t) \\ \vdots \\ c \cdot \Phi_{0i} + k_{\Phi i} \cdot I(t) \end{cases}$$

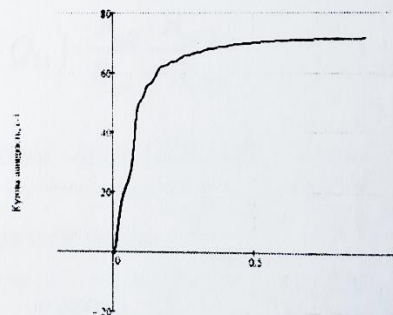
$$U_{я} = U_{я.ном} = 1500 \text{ В}, T_{н.сер} = +20^\circ\text{С}, TB = 50\%$$



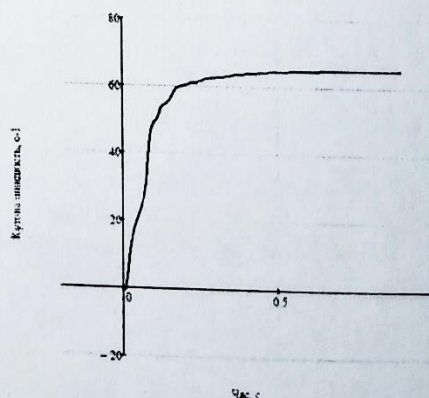
$$U_{я} = U_{я.мах} = 2000 \text{ В}, T_{н.сер} = +20^\circ\text{С}, TB = 22\%$$



$$U_{я} = U_{я.мин} = 1100 \text{ В}, T_{н.сер} = +20^\circ\text{С}, TB = 83\%$$



$$U_{я} = U_{я.мин} = 1100 \text{ В}, T_{н.сер} = -10^\circ\text{С}, TB = 89\%$$



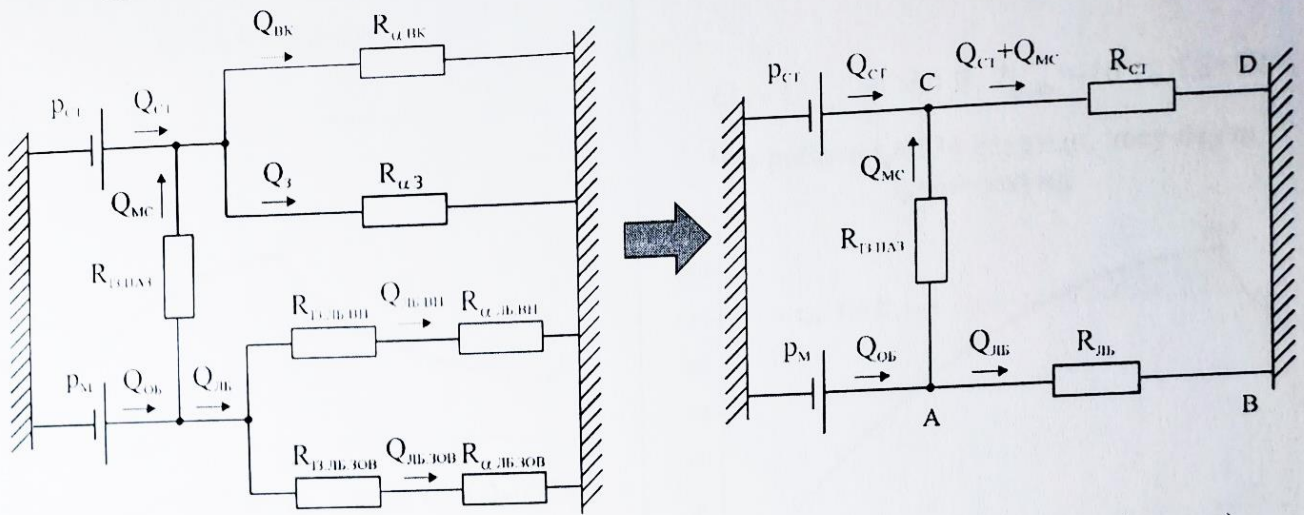
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.	Муха А.М.			27.12
Н. контр.	Карзова О.О.			27.12
Осн. керів.	Устименко Д.В.			27.12
Розробив	Гурбіч І.С.			25.12

Електромеханічна модель електропривода компресора ЕК-7Б

Додаток Б
7.141.190040.02

Стад.	Аркуш	Аркушів
	72	74
Український державний університет науки і технологій, група ЕЕ2221		

Загальна схема теплових потоків в якорі (роторі) електродвигуна ДК-406(409)



Система рівнянь, що описує процеси в еквівалентній тепловій схемі якоря (ротора) електричного двигуна ДК-406(409)

$$\begin{cases} Q_{OB} = Q_{LB} + Q_{MC} \\ \tau_{OБM} = Q_{LB} \cdot \frac{R_{LB,ЗОВ} \cdot R_{LB,ВН}}{R_{LB,ЗОВ} + R_{LB,ВН}} \\ \tau_{CT} = (Q_{CT} + Q_{MC}) \cdot \frac{R_{\alpha 3} \cdot R_{\alpha BK}}{R_{\alpha 3} + R_{\alpha BK}} \\ Q_{LB} \cdot \frac{R_{LB,ЗОВ} \cdot R_{LB,ВН}}{R_{LB,ЗОВ} + R_{LB,ВН}} = Q_{MC} \cdot R_{IЗ.ПАЗ} + (Q_{CT} + Q_M) \cdot \frac{R_{\alpha 3} \cdot R_{\alpha BK}}{R_{\alpha 3} + R_{\alpha BK}} \end{cases}$$

Значення теплових опорів, що входять до теплової моделі ДК-406

Тепловий опір	Розрахункова величина, $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bt}$
$R_{\alpha LB,ЗОВ}$	0,077
$R_{\alpha LB,ВН}$	0,12
$R_{\alpha 3}$	0,191
$R_{\alpha BK}$	0,048
$R_{IЗ.ПАЗ}$	99,931
$R_{IЗ.ЛБ.ЗОВ}$	4,152
$R_{IЗ.ЛБ.ВН}$	0,055

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафед.		Муха А.М.	<i>[Signature]</i>	27.12
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>[Signature]</i>	27.12
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>[Signature]</i>	27.12
Розробив		Гурбіч І.С.	<i>[Signature]</i>	25.12

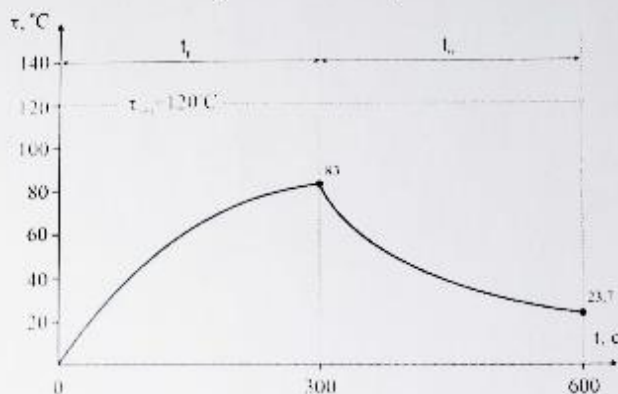
Теплова модель якоря (ротора) електродвигуна ДК-406(409)

Додаток Б
7.141.190040.03

Стад.	Аркуш	Аркушів
	73	74
Український державний університет науки і технологій, група EE2221		

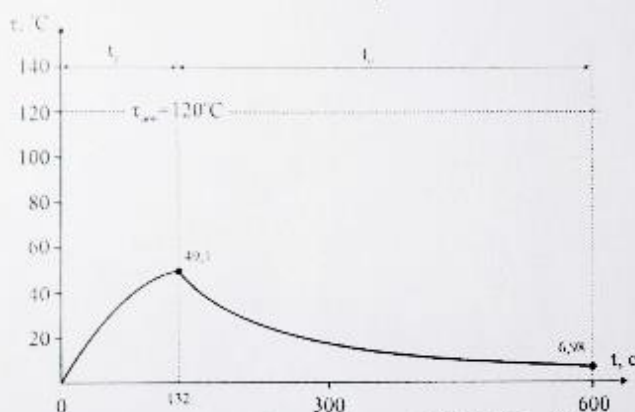
$U_{\text{н}} = U_{\text{н.ном}} = 1500 \text{ В}, T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}, \text{ТВ} = 50\%$

$t_p = t_n = 300 \text{ секунд}$



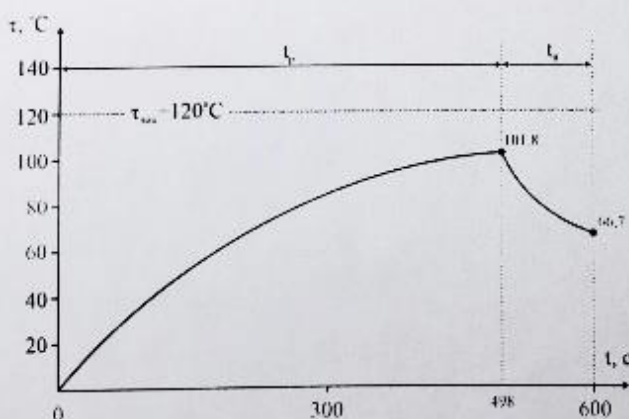
$U_{\text{н}} = U_{\text{н.мах}} = 2000 \text{ В}, T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}, \text{ТВ} = 22\%$

Час роботи $t_p = 132 \text{ секунди}$, часу паузи $t_n = 468 \text{ секунд}$



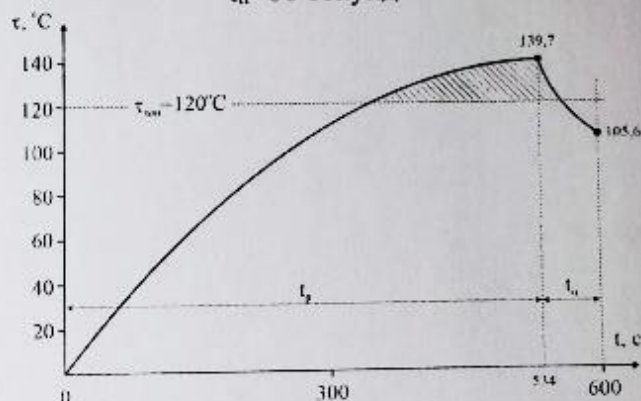
$U_{\text{н}} = U_{\text{н.мін}} = 1100 \text{ В}, T_{\text{н.сер}} = +20^{\circ}\text{C}, \text{ТВ} = 83\%$

Час роботи $t_p = 498 \text{ секунд}$, часу паузи $t_n = 102 \text{ секунди}$



$U_{\text{н}} = U_{\text{н.мін}} = 1100 \text{ В}, T_{\text{н.сер}} = -10^{\circ}\text{C}, \text{ТВ} = 89\%$

Час роботи $t_p = 534 \text{ секунди}$, часу паузи $t_n = 66 \text{ секунд}$



Результати розрахунків величини перегріву ізоляції якірної обмотки ДК-409 в залежності від напруги живлення та температури навколишнього середовища

Напруга живлення, В	Температура навколишнього середовища, °C	Величина перегріву, °C	
		По закінченню часу роботи t_p	По закінченню часу паузи t_n
1500	+20	83	23,7
2000		49,1	6,98
1100		101,8	66,7
	-10	139,7	105,6

Аналіз теплового стану ДК-406(409) в залежності від величини напруги живлення та температури навколишнього середовища				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.	Муха А.М.		<i>[Signature]</i>	27.12
Н. контр.	Карзова О.О.		<i>[Signature]</i>	27.12
Осн. керів.	Устименко Д.В.		<i>[Signature]</i>	27.12
Розробив	Гурб'іч І.С.		<i>[Signature]</i>	25.12

Додаток Б

7.141.190040.04

Стад.	Аркуш	Аркушів
	74	74

Український державний університет науки і технологій, група ЕЕ2221