


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 13.07.25

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на нагрівання асинхронного двигуна»

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

зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент
групи «ЕЕ2321»


(підпис студента)

/Дмитро ГРАБОВСЬКИЙ/
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:


(підпис)

/доц. Олексій БАЛІЙЧУК/
(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 – 2025 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: «Study of the influence of the asymmetry of the supply voltage on the heating of the asynchronous 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 EE2321: /Dmytro HRABOVSKYI/
Scientific Supervisor: /Oleksii BALIICHUK/
Normative controller: /Oksana KARZOVA/

Supervisors

<hr/>	//
(Chapter title heading)	(position, name, surname)
<hr/>	//
(Chapter title heading)	(position, name, surname)
<hr/>	//
(Chapter title heading)	(position, name, surname)
<hr/>	//
(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»

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студенту Грабовський Дмитро Сергійович

1. Тема роботи: «Дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на нагрівання асинхронного двигуна»

Керівник роботи: Балійчук Олексій Юрійович, доцент
затверджені наказом № 247 ст від 01.04.2024

2. Строк подання студентом 13.04.2025р.
роботи:

3. Вихідні дані до Теорія роботи асинхронних двигунів, теорія роботи: нагрівання електричних машин, норми показників якості електричної енергії

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

4.1 Аналітична частина: аналіз показників якості електричної енергії в загальнопромислових мережах, причини виникнення несиметрії напруги живлення, її нормовані значення. Оцінка впливу несиметрії напруги на додатковий нагрів асинхронного двигуна.

4.2 Основна частина: аналітичне дослідження впливу несиметрії напруги живлення асинхронного двигуна на додатковий нагрів його статорної обмотки порівняння отриманих результатів із результатами експериментального дослідження.





4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

4.4 Економічна частина: -

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Показники якості електричної енергії, норми та вплив на роботу електроприймачів. 2. Узагальнена теплова модель – метод оцінки теплового стану асинхронного двигуна при несиметрії живлячої напруги.

3. Аналітичний розрахунок додаткового перегріву при несиметричному живленні асинхронного двигуна. 4. Порівняння результатів аналітичного розрахунку із результатами практичного експерименту.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Основна частина	доц. Балійчук О.Ю.		
ОП та безпека при НС	доц. Балійчук О.Ю.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		5%
2	Розділ 1. Показники якості електричної енергії, їх вплив на роботу електроприймачів		20%
3	Розділ 2. Методи оцінки теплового стану асинхронного двигуна. Узагальнена теплова модель		20%
4	Розділ 3. Аналітичне дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на додатковий нагрів статорної обмотки асинхронного двигуна		20%
5	Розділ 4. Експериментальне дослідження додаткового нагріву асинхронного двигуна при несиметрії напруги живлення		20%
6	Розділ 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		10%
7	Загальні висновки та рекомендації		5%
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри		
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент


(підпис)

Дмитро ГРАБОВСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

доц. Олексій БАЛІЙЧУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

№ рядка	Формат	Позначення	Назва	Кільк. арк.	№ екз.	Прим
1			<u>Документація загальна</u>			
2			Заново розроблена			
3	A4	7.141.230805.ПЗ	Пояснювальна записка	60		
4						
5			Запозичена			
6						
7			<u>Графічна частина</u>			
8			Заново розроблена			
9	A4	7.141.230805.01	Показники якості електричної	1		
10			енергії, норми та вплив на			
11			роботу електроприймачів			
12	A4	7.141.230805.02	Узагальнена теплова модель	1		
13			метод оцінки теплового стану			
14			асинхронного двигуна при			
15			несиметрії живлячої напруги			
16	A4	7.141.230805.03	Аналітичний розрахунок	1		
17			додаткового перегріву при			
18			несиметричному живленні			
19			асинхронного двигуна			
20	A4	7.141.230805.04	Порівняння результатів	1		
21			аналітичного розрахунку із			
22			результатами практичного			
23			експерименту			
24			<u>Електронна частина</u>			

					7.141.230805.BP		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив.		Грабовський Д.С.			Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Балійчук О.Ю.		15.07.		5	60
Консульт					Відомість кваліфікаційної роботи МОН України. УДУНТ Кафедра ЕТЕМ, група ЕЕ2321		
Н. Контр.		Карзова О.О.		15.07.			
Зав.кафед.		Муха А.М.		15.07.			

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЇХ ВПЛИВ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ	12
1.1 Нормування якості електроенергії	12
1.2 Визначення показників якості електричної енергії	13
1.2.1 Відхилення напруги (ВН).....	13
1.2.2 Коливання напруги (КН)	13
1.2.3 Несиметрія напруг трифазної мережі	18
1.2.4 Несинусоїдність напруги.....	18
1.3 Вплив несиметрії та коливання напруги на роботу електроприймачів та технологічних установок	19
1.4 Вплив вищих гармонік на роботу споживачів електричної енергії	21
1.5 Висновки до розділу	22
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕПЛОВОГО СТАНУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА. УЗАГАЛЬНЕНА ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ	23
2.1 Нагрівання електричних машин	23
2.2 Визначення перегріву обмотки та застосування методу теплових схем	27
2.3 Метод узагальненої теплової моделі як спосіб визначення середнього перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна.....	31
2.4 Висновки до розділу	33

					<i>Пояснювальна записка</i>					
					Дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на нагрівання асинхронного двигуна					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Літ.	Маса	Масштаб		
		Грабовський Д.С.		13.02					1	1 : 1
		Балійчук О.Ю.		02.21						
						Арк.	7	Аркушів	60	
Т. Контр.					7.141.230805.ПЗ				МОН України, УДУНТ Кафедра ЕТЕМ Група ЕЕ2321	
Реценз.										
Н. Контр.		Карзова О.О.		13.04						
Затверд.		Муха А.М.		13.04						

ВСТУП

Зростання встановленої потужності нелінійних, а також несиметричних навантажень промислових підприємств призводить до суттєвого зростання рівня електромагнітних завад в системах електропостачання підприємств та електричних мережах. Ці завади, в залежності від їх характеру, інтенсивності та тривалості негативно впливають на силові установки, системи автоматики, релейного захисту і телекомунікацій, а також електрообладнання, що є джерелом електромагнітних завад. В ряді випадків це призводить до збільшення втрат електричної енергії, погіршенню якості та зниженню кількості продукції, яка випускається. Ці обставини обумовлюють практичну значимість проблеми якості електричної енергії.

Питання якості електричної енергії розглядають в контексті проблеми електромагнітної сумісності. Електромагнітна сумісність визначається як здатність електротехнічного пристрою нормально функціонувати в його електромагнітному оточенні, не впливаючи на це оточення, до якого належать також й інші пристрої [1].

Електричну енергію можна розглядати як товар, який характеризується певними властивостями і показниками, перелік і значення яких визначають споживацькі якості цього товару.

Якість електричної енергії є сукупністю параметрів, що описують особливості процесу передачі електричної енергії для її використання в нормальних умовах експлуатації, визначають неперервність електропостачання (тривалі і короткочасні перерви електропостачання) та характеризують напругу живлення (величину, несиметрію, частоту, форму хвилі).

Якість електричної енергії виражається ступенем задоволення споживача умовам електропостачання, що є безумовно важливо з точки зору практики. Якість електричної енергії залежить не тільки від умов електропостачання, а й також від особливостей електрообладнання, яке застосовується.

										7.141.230805.ПЗ	Арк.
											9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Розробкою та затвердженням норм якості електричної енергії займається Міжнародна електротехнічна комісія (ІЕС/МЕК). Ці норми є трьох типів: основоположні, які містять опис електромагнітного середовища, термінологію, вказівки стосовно обмеження рівнів генерування електромагнітних завад, вказівки стосовно вимірювання та тестування засобів вимірювання показників якості електричної енергії, рекомендації з виготовлення електрообладнання; загальні норми, де наведено допустимі рівні електромагнітних завад або їх допустимі рівні в електричних мережах побутового і промислового призначення; норми детальні, які містять вимоги до окремих виробів та пристроїв з точки зору показників якості електричної енергії [1].

З урахуванням комплексності питання показників якості електричної енергії в роботі буде розглянуто питання впливу на роботу електроприймачів традиційних показників якості електричної енергії – відхилення, колювання, несиметрія, несинусоїдність та провали напруги. Зокрема найбільшої уваги буде присвячено проблемі впливу несиметрії напруги живлення на роботу асинхронних двигунів.

Нормування показників якості електричної енергії відноситься до переліку головних питань проблеми якості електричної енергії. Систему таких показників утворюють кількісні характеристики повільних та швидких змін діючого значення живлячої напруги, її форми та симетрії в трифазній системі, а також частоти.

Персонал енергетичних служб підприємств не має змоги впливати на рівень частоти напруги в мережі. Принципи нормування показників якості електроенергії за напругою базуються на наступному. Показники якості по напрузі мають енергетичний зміст, тобто характеризують потужність спотворення кривої напруги; ступінь негативного впливу енергії спотворення на електрообладнання і технологічні процеси співставляється зі значенням показників якості електроенергії. Гранично допустимі значення показників якості обираються, виходячи із техніко-економічних міркувань. Показники

									7.141.230805.ПЗ	Арк.
										10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

якості нормуються впродовж певного інтервалу часу із заданою вірогідністю для отримання достовірних та співставних значень. Допустимі значення показників вказуються на затискачах електроприймачів та вузлах електричних мереж.

Система показників якості електричної енергії, що побудована на цих передумовах, може бути використана в проектній практиці, вона може забезпечити масове метрологічне забезпечення контролю за якістю електроенергії за допомогою відносно простих та недорогих приладів, а також реалізувати заходи і технічні засоби нормалізації якості електричної енергії [1].

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЇХ ВПЛИВ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ

1.1 Нормування якості електроенергії

В Україні станом на 01.01.2024 р. діє міждержавний стандарт ГОСТ 13109-97. В цьому стандарті в якості допустимих значень показників якості електричної енергії прийнято в основному рівні електромагнітної сумісності в системах електропостачання, які наводяться в публікаціях ІЕС/МЕК в якості рекомендацій для складання національних стандартів.

Відповідно до стандарту ГОСТ 13109-97, систему показників якості електричної енергії при живленні від електричних мереж трифазного струму утворюють:

- відхилення напруги (ВН) ΔU ;
- розмах зміни напруги δU_t (або амплітуда коливань напруги);
- інтенсивність (доза) флікера (ІФ) P_t ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої лінійної (фазної) напруги $k_{нс}$;
- коефіцієнт ν – і вищої гармоніки $K_{U(\nu)}$;
- коефіцієнт зворотної ε_2 та нульової ε_0 послідовності напруги;
- тривалість провалу напруги $\Delta t_{п}$;
- імпульс напруги $U_{імп}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{пер U}$;
- відхилення частоти Δf .

Даним стандартом закріплено два види норм на якість електричної енергії – нормально допустимі та гранично допустимі величини. Оцінка відповідності показників якості електричної енергії вимогам стандарту виконується впродовж розрахункового часу, що дорівнює 24 год [1, 2].

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.2 Визначення показників якості електричної енергії

1.2.1 Відхилення напруги (ВН)

ВН визначається різницею між дійсним U та номінальним $U_{\text{НОМ}}$ значеннями напруги.

У вольтах це відхилення визначається за формулою:

$$\Delta U = U - U_{\text{НОМ}}, \quad (1)$$

або те ж саме у відсотках:

$$\Delta U = \frac{U - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}}.$$

В якості дійсної напруги U в трифазних системах приймають напругу прямої послідовності основної частоти. Відповідно до вимог нормативних документів нормально допустимі ВН становлять $\pm 5\%$, а гранично допустимі - $\pm 10\%$ [1, 2].

1.2.2 Коливання напруги (КН)

До КН відносять швидкі зміни діючого значення напруги, які відбуваються зі швидкістю 1...2% на секунду і більше. КН характеризуються амплітудою (розмахом зміни напруги) δU ; частотою f та інтервалами між настаючими одна за одною зміною напруги Δt_k ; інтенсивністю мерехтіння ламп розжарювання, що викликає подразнюючий вплив на зір людини (ІФ або флікером напруги ФН) (див. рис. 1.1).

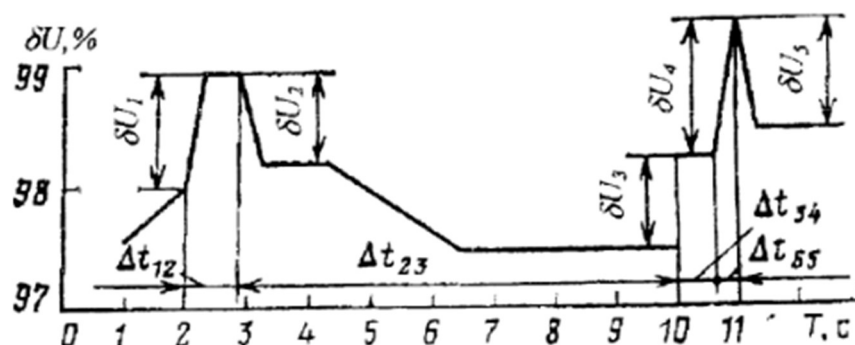


Рисунок 1.1 – Коливання напруги

										Арк.
										13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Амплітуда коливань визначається різницею між сусідніми екстремумами огинаючої діючих значень напруги:

$$\delta U = U_{\max} - U_{\min}, \quad (2)$$

або те саме у %:

$$\delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}}. \quad (3)$$

Частота змін напруги при їх кількості m за час T :

$$f = \frac{m}{T}. \quad (4)$$

Значення ІФ, яке інколи називають «дозою флікера», пов'язано із потужністю КН та визначається інтегралом:

$$P = \frac{k}{\theta} \int_{t-\theta}^t dt \int_0^{35} g^2(f) G(f, t) df, \quad (5)$$

де $g(f)$ - амплітудно-частотна характеристика зорового аналізатора; $G(f, t)$ - частотний спектр процесу зміни напруги в момент часу t ; θ - інтервал усереднення, який враховує ефект пам'яті сприйняття, $\theta = 300$ мс.

Коефіцієнт k у виразі (5) обирають таким чином, щоб значення $P=1$ відповідало порогу візуального сприйняття утворення неприємних відчуттів. Більш високі значення P будуть означати, що ІФ перебільшує поріг його сприймання і може стати подразнюючою або нестерпною [1].

Інтенсивність флікера напруги характеризує потужність коливання напруги з урахуванням характерних особливостей зорового і мозкового сприйняття людиною коливань світлового потоку ламп розжарювання, які є повністю подібними коливанням напруги. Лампи розжарювання є найбільш розповсюдженим видом навантаження, чутливим до КН в більшій мірі, ніж інші види електроспоживачів. Інтенсивність флікера виражається в безрозмірних одиницях. Ординати стандартної кривої допустимих значень КН $\delta U_*(f)$ (див. рис 1.2) відповідають значенню ІФ, визначеному впродовж 10 хв, з вірогідністю $P_{st} = 1\ 99\%$

										Арк.
										14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

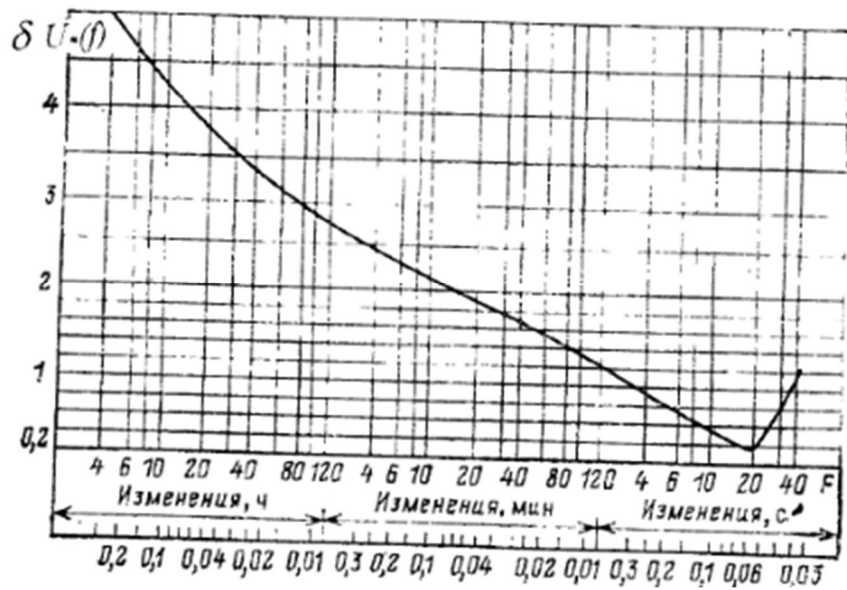


Рисунок 1.2 – Крива допустимих значень $\delta U_*(f)$

P_{st} називається інтенсивністю короткочасного флікера напруги.

Процес зорового сприйняття при коливаннях напруги моделюється на основі теорії проходження складного сигналу через нелінійну динамічну систему. Велика кількість багаторічних експериментальних досліджень дозволила побудувати амплітудно-частотну характеристику зорового аналізатора. Цю характеристику показано на рис. 1.3.

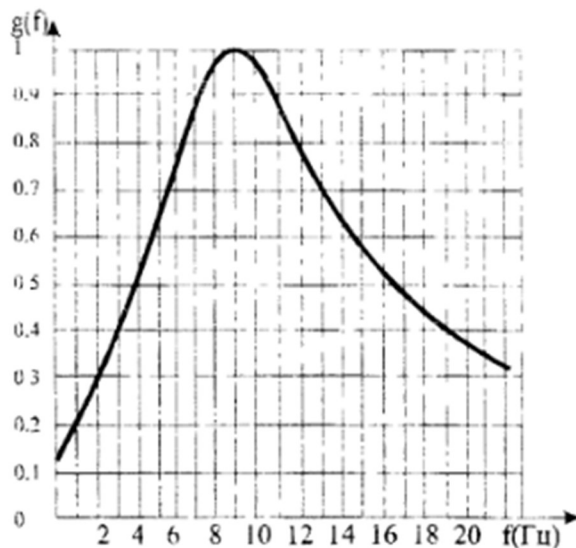


Рисунок 1.3 – Амплітудно-частотна характеристика зорового аналізатора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

7.141.230805.ПЗ

Арк.

15

Верхня межа частоти коливання напруги, що впливають на зір, з урахуванням сталої часу спіралей ламп розжарювання складає приблизно 35 Гц при $\delta U_* \leq 10\%$ [1].

При вивченні процесу зорового сприйняття коливань ІФ повинна досліджуватися впродовж достатньо тривалого часу. У зв'язку із тим, що характер коливань є випадковим, необхідно визначати не тільки максимально допустимі рівні P , але і час підвищення заданих рівнів за інтервал спостереження. Для цього будують залежність між рівнями відчуття ІФ та відповідною їх тривалістю впродовж часу спостереження. По завершенню часу спостереження може бути побудовано залежність ІФ від часу (див. рис. 1.4) та впорядкована діаграма (інтегрально-ймовірнісна функція), яка їй відповідає (див. рис. 1.5) [1].

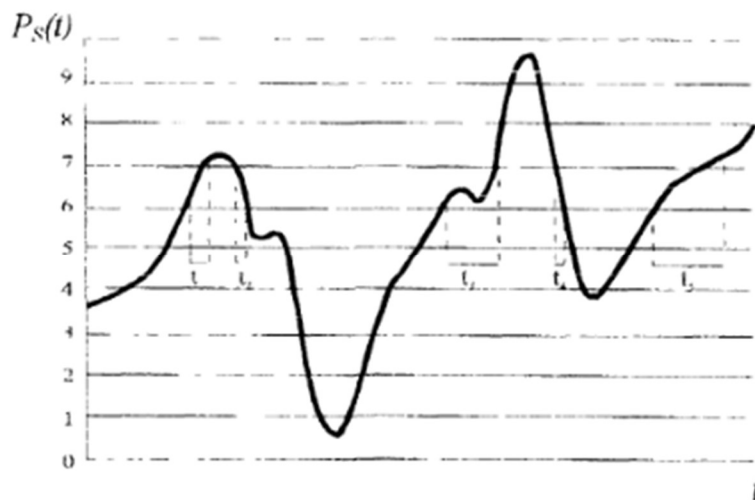


Рисунок 1.4 – Залежність $P_s(t)$

Графік, який показано на рис. 1.5 найбільш близько можна охарактеризувати виразом у вигляді:

$$P_s = \sqrt{\sum K_i P_i}, \quad (6)$$

де P_s - величина ІФ; K_i - вагові коефіцієнти; P_i - рівні ІФ окремих джерел коливання напруги. Інтервал спостереження КН приймають рівним 10 хв. ІФ на такому інтервалі позначають P_{st} . Дослідження показали, що для

оцінки P_{st} достатньо використовувати 5 рівнів [1]: $P_{0,1}$ - рівень, що перевищувався впродовж 0,1% періоду спостереження; P_1 - рівень, що перевищувався впродовж 1% періоду спостереження; P_3 - рівень, що перевищувався впродовж 3% часу спостереження; P_{10} - рівень, що перевищувався впродовж 10% часу спостереження. Вихідна точка P_{50} характеризує середній рівень флікера, так як відповідає рівню, що перевищувався впродовж 50% часу спостереження.

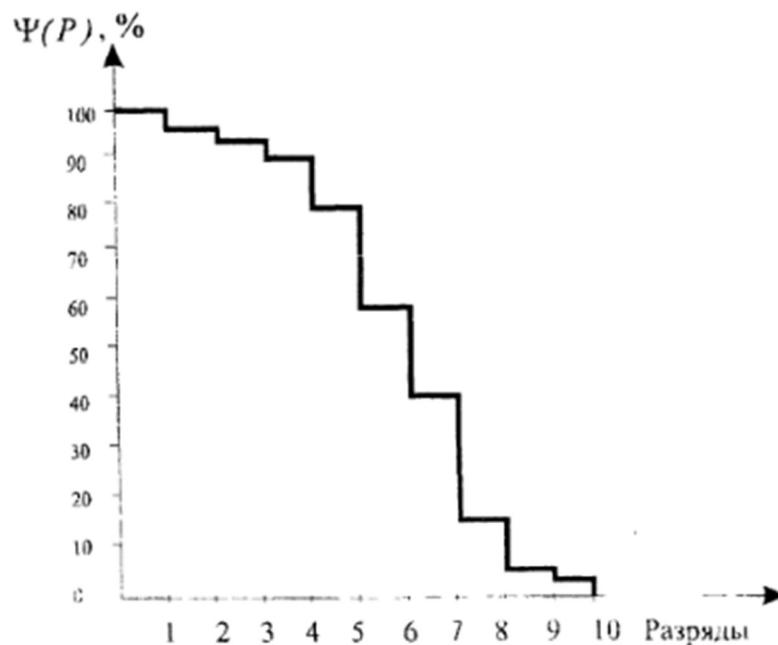


Рисунок 1.5 – Інтегрально-ймовірнісна функція ІФ для 10 розрядів

Значення вагових коефіцієнтів K_i відповідно: $K_1 = 0,0314$ для 0,1% рівня; $K_2 = 0,0525$ для 1,0% рівня; $K_3 = 0,0657$ для 3,0% рівня; $K_4 = 0,28$ для 10% рівня; $K_5 = 0,08$ для 50% рівня.

Для інтервалу спостереження 10 хв ІФ викликаного роботою прокатними станами, насосами та побутовим обладнанням визначається за виразом:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (7)$$

У випадку, коли КН викликані роботою різкозмінних навантажень, що характеризуються випадковим характером роботи, інтенсивність флікера P_{lt}

за проміжок часу, що розглядається знаходять як сукупність 10-хвилинних значень, відповідно до виразу [1]:

$$P_{lt} = 3 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_t P_{st_i}^3} \quad (8)$$

Значення величин, отриманих із виразів (7) та (8), регламентуються вимогами діючих нормативних документів.

1.2.3 Несиметрія напруг трифазної мережі

Несиметрія напруг трифазної мережі характеризується *коефіцієнтом зворотної послідовності напруг* ε_2 , %, який визначається як відношення напруги зворотної послідовності U_2 до номінальної напруги:

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (9)$$

Значення ε_2 в межах до 2% тривало допускається на затискачах будь-якого трифазного симетричного приймача електричної енергії. Гранично допустиме значення - 4% [1].

Коефіцієнт нульової послідовності напруг визначається відношенням напруги нульової послідовності основної частоти до номінальної фазної напруги $U_{ном.ф}$, %:

$$\varepsilon_0 = \frac{U_0}{U_{ном.ф}} \cdot 100. \quad (10)$$

Відповідно до [2] в розподільчих мережах з однофазними освітлювальними та побутовими приймачами електроенергії нормально допустиме значення ε_0 відповідає 4%, а гранично допустиме значення – 4% [1].

1.2.4 Несинусоїдність напруги

Несинусоїдність напруги характеризується значенням коефіцієнта спотворення кривої напруги $k_{нс}$, який визначається відношенням діючого значення вищої гармоніки напруги U_v до напруги основної частоти U_1 або номінальної напруги:

										Арк.
										18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.230805.ПЗ					

$$k_{\text{НС}} = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^{\infty} U_{\nu}^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^n U_{\nu}^2}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \quad (11)$$

U_{ν} - діюче значення напруги ν -ї гармоніки; n - номер останньої із врахованих гармонік. Допустимі та гранично допустимі значення наведено в [1, 2].

Окрім $k_{\text{НС}}$ [2] нормує також значення коефіцієнта ν -ї гармонійної складової напруги:

$$K_{U(\nu)} = \frac{U_{\nu}}{U_1} \cdot 100.$$

1.3 Вплив несиметрії та коливання напруги на роботу електроприймачів та технологічних установок

Несиметрію напруги в електричних мережах підприємств обумовлюють потужні однофазні навантаження (індукційні плавильні печі, нагрівальні печі, зварювальні агрегати та ін.), а також трифазні навантаження, що тривало працюють в несиметричних режимах (наприклад, електродугова сталеплавильна піч). Також трифазна система підприємства може бути несиметричною при живленні мережі підприємства від тягової підстанції змінного струму [1].

При несиметрії напруг в трифазних мережах з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін служби ламп та електрообладнання, знижуються економічні показники його роботи.

При несиметрії напруг в електричних машинах змінного струму виникають магнітні поля, які обертаються не тільки із синхронною швидкістю в напрямку обертання ротора, але й з подвійною синхронною швидкістю в напрямку, протилежному обертанню ротора. В результаті цього виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струму подвійної частоти.

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.230805.ПЗ				

В асинхронних двигунах при коефіцієнтах зворотної послідовності напруг, що мають місце на практиці ($0,05 \leq \varepsilon_2 \leq 0,06$), зниження обертового моменту виявляється малим [1]. Вплив несиметрії на втрати в електродвигуні і, як наслідок, нагрівання і скорочення терміну служби його ізоляції проявляються в більшій мірі [1, 3].

При роботі асинхронного двигуна з номінальним обертовим моментом і коефіцієнтом зворотної послідовності напруг, що дорівнює 4%, термін служби його ізоляції скорочується приблизно в 2 рази лише за рахунок додаткового нагріву. Відповідно, якщо напруга на одній із фаз буде суттєво перебільшувати номінальне значення, скорочення терміну служби ізоляції буде ще більшим. Для забезпечення нормальних умов роботи електродвигунів в такому випадку необхідно знижувати їх потрібну потужність, а при проектуванні – збільшувати номінальну потужність електродвигунів, якщо не передбачено додаткових заходів стосовно симетрування напруги мережі [1, 3].

При несиметрії напруги мережі в синхронних двигунах разом із виникненням додаткових втрат і нагріванням статора і ротора можуть виникати небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних обертових моментів і тангенційних сил, що пульсують із подвійною частотою мережі. При суттєвій несиметрії вібрація може бути небезпечною, особливо при недостатній міцності чи наявності дефектів зварювальних з'єднань. При несиметрії струмів, яка не перевищує 30%, небезпечні перенапруження в елементах конструкцій, як правило, не виникають [1].

Додаткові втрати потужності в синхронних двигунах при несиметричному навантаженні викликають виникнення місцевих (локальних) нагрівів обмотки збудження, що призводить до необхідності знижувати струм збудження і тим самим зменшувати величину реактивної потужності, що віддається в мережу. При цьому може виникнути потреба в зниженні активного навантаження генератора чи момент на валу синхронного двигуна [1].

									Арк.
									20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

7.141.230805.ПЗ

Несиметрія напруг помітно не впливає на роботу повітряних та кабельних ліній електропередач, але в той самий час нагрів трансформаторів і скорочення їх терміну служби може бути суттєвим. У випадку несиметрії струмів трансформатора нагрів масла буде дещо менше, ніж у випадку симетричного навантаження фаз при струмі, що буде рівним струму найбільш завантаженої фази. Це можна пояснити більш інтенсивним охолодженням обмотки даної фази [1]. Проте, сказане стосується в більшій мірі лише випадків, коли наявність несиметричного навантаження не викликає утворення струмів нульової послідовності, тобто в мережах підприємств з ізольованою, або компенсованою нейтраллю [1].

Коливання напруги негативно впливають на роботу великої кількості споживачів електричної енергії. При коливаннях напруги знижується продуктивність електролізних установок, скорочується термін їх служби через підвищений знос анодів. На заводах хімічного волокна внаслідок коливань частоти обертання асинхронних двигунів намотувальних пристроїв синтетичні нитки рвуться або набувають різної товщини, що призводить до браку та зниженню кількості виробленої продукції.

Коливання амплітуди i , в більшій мірі, фази напруги живлення викликають вібрації електродвигунів насосів, механічних конструкцій, трубопровідної арматури. Це призводить до знижень міцності металу, скорочується термін його служби, та ін. [1].

1.4 Вплив вищих гармонік на роботу споживачів електричної енергії

При наявності вищих гармонік в системах електропостачання виникають додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах та мережах, ускладнюється компенсація реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів, скорочується термін служби ізоляції електричних машин та апаратів, погіршується робота пристроїв автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Так, при роботі асинхронних двигунів в умовах несинусоїдальної напруги їх коефіцієнт потужності та обертаючий момент на валу знижуються, проте

									Арк.
									21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

7.141.230805.ПЗ

практичний вплив вищих гармонік на названі показники асинхронних двигунів можна не враховувати через те, що, наприклад, при амплітуді 5-ї та 7-ї гармонік напруги, які складають відповідно 20% та 15% амплітуди основної гармоніки, коефіцієнт потужності двигуна зменшується лише на 2,6%. Те саме стосується і моментів, що розвиває двигун під впливом вищих гармонійних складових напруги живлення. Вони не перевищують декількох десятих відсотка моменту, який розвиває машина при роботі від промислової частоти.

Суттєво вищі гармоніки впливають на ізоляцію електричних машин і конденсаторів, а також на вимірювальні прилади та пристрої автоматики. Викривлення форми кривої напруги активізує виникнення та протікання іонізаційних процесів в ізоляції електричних машин і трансформаторів [1]. При цьому розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що призводить до збільшення діелектричних втрат і скороченню терміну служби.

1.5 Висновки до розділу

Встановлено, що поняття «якість електричної енергії» є складним комплексним поняттям. Для оцінки якості електроенергії існує ряд показників, які в більшій мірі пов'язано із станом напруги в системі електропостачання.

Міждержавний стандарт ГОСТ 13109-97 гармонізує сукупність всіх показників якості електричної енергії та регламентує їх нормально допустимі та граничного допустимі значення.

З точки зору впливу на асинхронний двигун, як основний споживач електроенергії на промисловому підприємстві, найбільш вагомим із всіх показників якості електроенергії є несиметрія живлячої напруги. Вона викликає додатковий нагрів обмоток двигуна і вже при граничного допустимих значеннях коефіцієнту зворотної послідовності напруг – 4% може призвести до скорочення терміну служби ізоляції асинхронного двигуна вдвічі.

										Арк.
										22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

7.141.230805.ПЗ

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕПЛОВОГО СТАНУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА. УЗАГАЛЬНЕНА ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ

2.1 Нагрівання електричних машин

Для виявлення загальних закономірностей нагрівання з метою спрощення задачі розглядають асинхронний двигун як однорідне тіло. Нехай Q - кількість тепла, яке виділяється в тілі за одиницю часу. Тоді за час dt в тілі виділиться Qdt одиниць тепла. У загальному випадку одна частина цього тепла піде на нагрівання тіла й буде сприяти підвищенню його температури, а друга розсіюється в навколишнє середовище, наприклад, у повітря.

Приймаємо, що за час dt температура тіла зросла на $d\theta$. Якщо G - маса тіла і C - його теплоємність, то кількість тепла dQ_C , яке піде на нагрівання тіла за час dt , дорівнює: $dQ_C = GC(d\theta)$.

Кількість тепла, яка розсіюється тілом у навколишнє середовище за 1 с, залежить, по-перше, від величини розсіювальної поверхні, по-друге, від здатності цієї поверхні розсіювати тепло і, по-третє, від того, наскільки перевищує температура нагрітого тіла температуру навколишнього середовища, тобто від перегріву тіла. Якщо S - площа поверхні тіла; здатність поверхні розсіювати тепло враховується коефіцієнтом теплорозсіяння λ . Нехай температура тіла перевищила температуру навколишнього середовища на $\Delta\theta$ градусів. Досвід показує, що кількість розсіяного тілом тепла в одиницю часу можна вважати пропорційною усім трьом вказаним величинам, тобто рівним $S\lambda(\Delta\theta)$. Тому за час dt кількість розсіяного тілом у навколишнє середовище тепла $dQ_\lambda = S\lambda(\Delta\theta)dt$. Отже рівняння нагрівання можна записати в такому вигляді:

$$Qdt = GC(d\theta) + S\lambda(\Delta\theta)dt \quad (12)$$

В охолоджуюче середовище тепла енергія передається шляхами: випромінювання, теплопровідності та конвекції. У перший момент нагрівання, коли перевищення температури тіла $\Delta\theta = 0$, уся тепла енергія йде на підвищення температури тіла. Якщо прийняти, що $O = const$, то через деякий

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

час тіло нагріється настільки, що все тепло, яке виділяється в ньому, буде розсіюватися в навколишнє середовище. У цьому випадку підвищення температури тіла припиняється і настає тепловий режим, який характеризується найбільш можливим у даних умовах кінцевим перевищенням температури $(\Delta\theta)_C$. Із (12) випливає, що при сталому тепловому режимі $Qdt = S\lambda(\Delta\theta)_C dt$, звідки

$$(\Delta\theta)_C = \frac{Q}{S\lambda}. \quad (13)$$

Таким чином, кінцеве перевищення температури тіла не залежить ні від його маси, ні від його теплоємності; воно визначається тільки кількістю тепла Q , розмірами поверхні тіла S і властивостями λ теплорозсіювальної поверхні.

Підставляючи в рівняння (12) значення Q із (13), отримують:

$$S\lambda(\Delta\theta)_C dt = GC(d\theta) + S\lambda(\Delta\theta)dt,$$

звідки

$$\frac{\Delta\theta}{(\Delta\theta)_C - \Delta\theta} = \frac{dt}{GC/S\lambda} = \frac{dt}{T},$$

де

$$T = \frac{GC}{S\lambda} \quad (14)$$

Якщо замість $S\lambda$ підставити його значення із (13), то

$$T = GC(\Delta\theta)_C / Q.$$

Із формули (14) видно, що T - величина стала, оскільки G та S можна вважати сталими, а C та λ - практично сталі. Крім того, $GC(\Delta\theta)_C$ - кількість тепла, яке потрібно витратити, щоб нагріти тіло до кінцевої температури, а Q - кількість тепла, яке витрачається для цього в одиницю часу. Отже, T визначається як час, потягом якого перевищення температури тіла з масою G і теплоємністю C досягло б $(\Delta\theta)_C$, якби в ньому в кожен секунду виділялось

										Арк.
										24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Q одиниць тепла без розсіювання його в навколишнє середовище. Тому T називають сталою часу нагрівання. Процес нагрівання машини характеризується залежністю перевищення температури $\Delta\theta$ від часу $\Delta\theta = f(t)$. Розв'язуючи диференціальне рівняння (12) за умови, що в початковий момент електрична машина вже мала деяке перевищення температура $(\Delta\theta)_0$ над навколишнім середовищем, отримаємо:

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_C \left(1 - e^{-t/T}\right) + (\Delta\theta)_0 e^{-t/T}, \quad (15)$$

де $(\Delta\theta)_0$ - початкове перевищення температури;

T - стала часу нагрівання.

Із (15) випливає, що величина $\Delta\theta$ у процесі нагрівання та охолодження машини змінюється за експоненціальним законом.

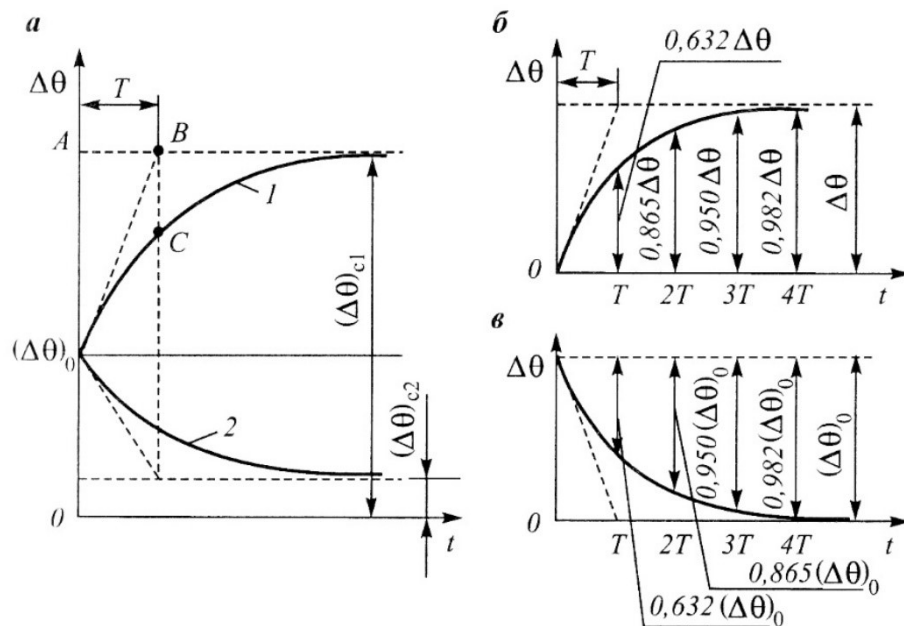


Рисунок 2.1 – Криві нагрівання та охолодження електричної машини

При нагріванні перевищення температури $\Delta\theta$ зростає (див. рис. 2.1, а, крива 1), асимптотично наближаючись до сталою значення $(\Delta\theta)_{C1}$, яке відповідає певним значенням $\sum p_1, S, \lambda_1$. Це можна спостерігати при зростанні навантаження машини або зменшенні інтенсивності її охолодження.

При охолодженні перевищення температури $\Delta\theta$ зменшується (див. рис. 2.1, а, крива 2) до сталого значення $(\Delta\theta)_{C2}$, яке відповідає певним значенням $\sum p_2$, λ_2 . Це може відбуватися при зменшенні втрат потужності або збільшенні інтенсивності охолодження [4].

В початковій точці $(\Delta\theta)_0$ (при $t = 0$) похідна $\frac{d(\Delta\theta)}{dt} = \frac{(\Delta\theta)_C - (\Delta\theta)_0}{T}$.

Отже, стала часу T може бути подана у вигляді відрізка АВ, який відсікається дотичною, що проведена до кривої нагрівання при $t = 0$, на прямій, паралельній осі абсцис і відповідній сталому перевищенню температури $(\Delta\theta)_C$. Якщо машина починає працювати після відносно тривалого відключення (коли вона набула температуру навколишнього середовища), то $(\Delta\theta)_0 = 0$ (див. рис. 2.1, б) і рівняння (15) запишеться таким чином:

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_C \left(1 - e^{-(t/T)} \right) \quad (16)$$

Рівняння (16) показує, що теоретично тіло досягає сталого перевищення температури $(\Delta\theta)_C = const$ тільки через нескінченно великий час. Але на практиці температура тіла відносно швидко досягає практично кінцевої величини. Нехай $t = T, 2T, 3T \dots$ Тоді відповідно до формули (16)

$\frac{\Delta\theta}{(\Delta\theta)_C} = 1 - e^{-(t/T)}$. Підставивши в останній вираз замість t його значення із

вказаного діапазону отримаємо, що при $t = T$ $\frac{\Delta\theta}{(\Delta\theta)_C} = 0,632$; при $t = 2T$

$\frac{\Delta\theta}{(\Delta\theta)_C} = 0,865$; при $t = 3T$ $\frac{\Delta\theta}{(\Delta\theta)_C} = 0,950$; при $t = 4T$ $\frac{\Delta\theta}{(\Delta\theta)_C} = 0,982$. Тобто

вже при $t = 4T$ можна вважати, що практично тепловий режим встановився, т.я. різниця між $\Delta\theta$ та $(\Delta\theta)_C$ становить менше 2%.

										Арк.
										26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

7.141.230805.ПЗ

Для електричних машин різних потужностей значення $T = (0,3...2)$ год, для мікромашин $T = (3...10)$ хв [4].

Реальна електрична машина не однорідне тіло, так як складається із ряду частин, кожна з яких має свої характеристики, тобто масу, поверхню, теплоємність та коефіцієнт теплорозсіання, і в кожній з яких виділяється певна кількість тепла. Крім того, повітря або інший охолоджуючий агент при протіканні по вентиляційних каналах нагрівається, і тому температура охолоджуючого середовища для різних частин охолоджуючої поверхні має різні значення. Таким чином криві нагрівання та охолодження електричних машин не є, строго кажучи, експоненціальними. Але практичний досвід показує, що в більшості випадків прийняття цих кривих експоненційними не вносить яких-небудь значних похибок у визначенні кінцевої температури нагрівання чи охолодження електричної машини з використанням теорії нагрівання ідеального твердого тіла [4].

2.2 Визначення перегріву обмотки та застосування методу теплових схем

Метод теплових схем, як і метод температурних полів, дозволяє визначити перегрів обмотки. Цей метод ґрунтується на поданні елементів машини у вигляді вузлів (джерел теплоти) з тепловиділенням в них, усередненим по всьому об'єму елемента [5].

Метод теплових схем порівняно простий у математичному відношенні і тому може використовуватись в реальних практичних розрахунках. При цьому використовуються нижче наведене рівняння і для визначення величини усталеного (кінцевого) перегріву рівняння (13).

$$Qdt - S\lambda(\Delta\theta)dt = mCd\theta, \quad (17)$$

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

S - площа поверхні тепловіддачі;

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

λ - коефіцієнт тепловіддачі, що враховує в цілому відведення теплоти в навколишнє середовище випромінюванням і конвекцією;

$\Delta\theta$ - перегрів тіла;

m - маса тіла;

C - питома теплоємність тіла;

$d\theta$ - величина, на яку підвищилась температура тіла за час dt .

Згідно з рівнянням теплового балансу (17) в сталій тепловій рівновазі, коли $d\theta = 0$, вся енергія теплових втрат передається в навколишнє середовище, причому потік теплоти іде в напрямку спадання теплового потенціалу. Це означає, що температура зовнішнього шару ізоляції повинна бути нижче температури внутрішніх шарів, які безпосередньо прилягають до нагрітих провідників обмотки, а температура повітря, яке оточує зовнішні шари ізоляції, повинна бути в свою чергу ще нижчою. Крім того, як було сказано вище, слід враховувати, що повітря, проходячи всередині машини і відбираючи теплоту від її нагрітих частин також нагрівається. Таким чином, при визначенні середнього перегріву обмотки треба враховувати ряд факторів:

- перепад температури по товщині ізоляції;
- перепад температури від поверхні ізоляції до охолоджуючого повітря;
- підігрів охолоджуючого повітря [5].

На рис. 2.2 показано схему теплопередачі обмотки збудження двополюсної машини постійного струму, на основі якої буде показано методику визначення перегріву за допомогою теплових схем.

Як видно із представленого рисунку, тепловий потік від нагрітої обмотки іде по декількох різнорідних за фізичним складом і обмиванням охолоджуючим повітрям поверхнях. Одна частина потоку - Q_1 - через вентилявану поверхню S_1 з товщиною ізоляції та коефіцієнтом теплопровідності відповідно β_1 та λ_{i31} видаляється вентиляючим повітрям. Друга частина потоку - Q_2 передається остову і полюсам, які, зважаючи на їх

										Арк.
										28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

7.141.230805.ПЗ

високу теплопровідність, можуть прийматись як одне тіло із загальною температурою $\tau_{ст}$. Параметри поверхні для потоку Q_2 відповідно S_2 , β_2 , $\lambda_{із2}$.

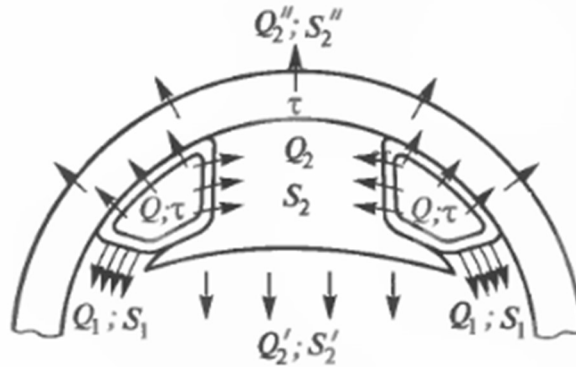


Рисунок 2.2 – Схема теплопередачі обмотки збудження дво полюсної машини

Тепловий потік Q_2 передається вентиляючому повітрю (Q_2' , S_2' , $\alpha'_{вент}$) частково через внутрішню поверхню, а також через зовнішню поверхню остова, яка може обдуватися зовнішнім повітрям (Q_2'' , S_2'' , $\alpha''_{об}$).

Таким чином, $Q = Q_1 + Q_2$ і $Q_2 = Q_2' + Q_2''$. Якщо перегрів обмотки $\Delta\theta$, а перегрів поверхні S_1 - $\Delta\theta_1$, то перепад температури по товщині ізоляції β_1 буде:

$$\Delta\theta - \Delta\theta_1 = \theta_{\beta_1} = \frac{Q_1 \beta_1}{S_1 \lambda_{із1}}. \quad (18)$$

Перегрів поверхні, яка вентиляється повітрям, що проходить всередині машини S_1 $\Delta\theta_1 = Q_1 / (S_1 \cdot \alpha_{вент1})$; підставивши цю величину в (18), отримаємо:

$$\Delta\theta = Q_1 \left(\frac{\beta_1}{S_1 \lambda_{із1}} + \frac{1}{S_1 \alpha_{вент1}} \right). \quad (19)$$

Або:

$$\Delta\theta = Q_1 (R_1 + R_{вент1}). \quad (20)$$

Цілком аналогічно для потоку теплоти Q_2 :

$$\Delta\theta - \Delta\theta_{\text{ст}} = \theta_{\beta_2} = \frac{Q_2\beta_2}{S_2\lambda_{132}}, \quad (21)$$

Але перегрів сталених частин машини $\Delta\theta_{\text{ст}} = \frac{Q'_2}{S'_2\alpha'_{\text{вент}}} = \frac{Q''_2}{S''_2\alpha''_{\text{об}}}$, отже

$$Q_2 = Q'_2 + Q''_2 = \Delta\theta_{\text{ст}} (S'_2\alpha'_{\text{вент}} + S''_2\alpha''_{\text{об}})$$

$$\Delta\theta_{\text{ст}} = \frac{Q'_2}{S'_2\alpha'_{\text{вент}} + S''_2\alpha''_{\text{об}}}. \quad (22)$$

Підставивши (22) в (21) отримують:

$$\Delta\theta_{\text{ст}} = Q_2 \left(\frac{\beta_2}{S_2\lambda_{132}} + \frac{1}{S'_2\alpha'_{\text{вент}} + S''_2\alpha''_{\text{об}}} \right). \quad (23)$$

У рівнянні (23) величини в дужках – теплові опори, причому:

$$R_2 = \frac{\beta_2}{S_2\lambda_{132}}, \quad R_3 = \frac{1}{S'_2\alpha'_{\text{вент}}}, \quad R_4 = \frac{1}{S''_2\alpha''_{\text{об}}}.$$

Неважно побачити, що опори R_3 та R_4 включені паралельно, тобто

$$\Delta\theta = Q_2 \left(R_2 + \frac{R_3R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (24)$$

Шуканий перегрів $\Delta\theta$ може бути інтерпретований як різниця потенціалів, тому згідно з рівняннями (20) та (24) можна зобразити схему заміщення, що відповідає тепловій системі на рис. 2.2 [5].

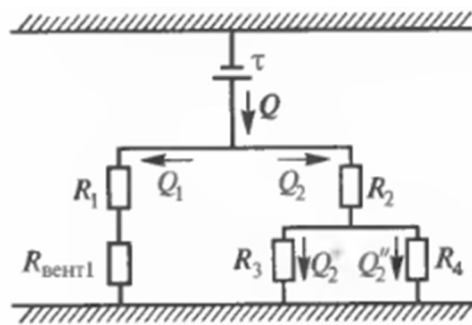


Рисунок 2.3 – Схема заміщення теплової системи на рис. 2.2

Як можна бачити на рис. 2.3, на схемах заміщення використовуються елементи електричних схем заміщення, які за своєю суттю є подібними. Так, джерело тепла замінюється джерелом напруги; потік теплоти – електричним

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.230805.ПЗ				

струмом; теплові опори – електричними. Це дає можливість для розрахунку теплових систем використовувати раніше відомі закони електричних кіл.

На основі схеми заміщення знаходять її результуючий опір $R_{рез}$, а потім перегрів

$$\Delta\theta = Q \cdot R_{рез} \quad (25)$$

При використанні методу теплових схем для вирішення поставленої задачі немає необхідності визначати всі складові теплового потоку, треба лише правильно встановити шляхи відводу теплоти, теплові опори, що відповідають цим шляхам, скласти схему заміщення і знати величину Q [5].

Аналогічно розглядаються теплові системи й інших частин електричних машин всіх типів.

2.3 Метод узагальненої теплової моделі як спосіб визначення середнього перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна

Проведений аналіз методик визначення перегріву обмоток електричних машин показав, що розглянуті вище методи мають ряд незручностей при точному визначенні величин Q , теплових опорів ізоляційних шарів, осердь та ін. Натомість в [3, 6] пропонується метод для знаходження нагріву ізоляції обмотки статора з використанням узагальненої теплової моделі.

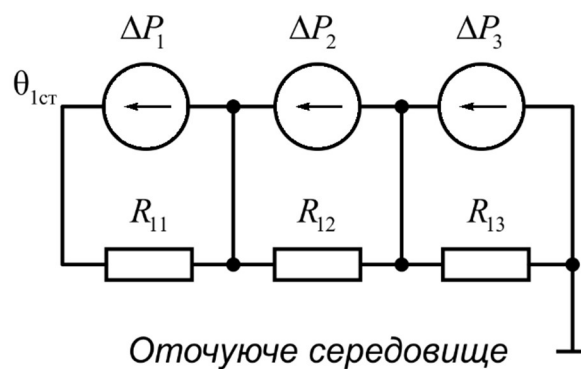


Рисунок 2.4 – Узагальнена теплова модель асинхронного двигуна

На рис. 2.4 прийнято:

θ_1 - середнє перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна в нормальних умовах;

$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ - електричні втрати в обмотці статора, електричні втрати в обмотці ротора і втрати в сталі відповідно, Вт;

R_{11}, R_{12}, R_{13} - узагальнені теплові опори еквівалентної теплової схеми заміщення, $\left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \right]$.

Подібно до інших видів теплових моделей в узагальненій тепловій моделі нехтують втратами на тертя в підшипниках і тертя ротора об повітря в наслідок їх малості.

Величини електричних втрат в обмотках статора, ротора і втрати сталі для двигунів малої потужності на підставі [7] приймемо у наступному відсотковому співвідношенні до повних втрат в двигуні.

Відомо, що сумарні втрати в двигуні

$$\sum p = P_1 \cdot (1 - \eta). \quad (26)$$

З них:

- електричні втрати в обмотці статора $\Delta P_1 = 0,5 \cdot \sum p$;
- електричні втрати в обмотці ротора $\Delta P_2 = 0,25 \cdot \sum p$;
- втрати в сталі складають $\Delta P_3 = 0,2 \cdot \sum p$.

Інші втрати займають лише 5% від сумарних втрат в двигуні

Така теплова схема заміщення, показана на рис. 2.4, дозволяє розрахувати середнє перевищення температури $\theta_{1\text{ном}}$ обмотки статора:

$$\theta_{1\text{ном}} = R_{11}\Delta P_1 + R_{12}\Delta P_2 + R_{13}\Delta P_3. \quad (27)$$

При цьому теплові опори визначаємо за допомогою емпіричних виразів

$$R_{11} = \frac{K}{D_{a1}l_1}; \quad (28)$$

$$R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6R_{11}, \quad (29)$$

де D_{a1} - зовнішній діаметр осердя статора;

									Арк.
									32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

l_1 - довжина осердя статора;

K - коефіцієнт, що дорівнює $27 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}}$ для асинхронних двигунів потужністю 0,5...10 кВт і $35 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}}$ – для АД потужністю 11...250 кВт.

Як випливає з вказаних залежностей узагальненої теплової моделі, виконати розрахунок середнього перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна можливо лише за наявності паспортних даних на двигун, а також на основі геометричних розмірів осердя його статора, які можна отримати шляхом обмірів реального конкретного двигуна, або із відповідних довідників [3].

Такий метод на практиці є дуже зручним.

2.4 Висновки до розділу

З метою знаходження зручного методу, що дозволить визначити додатковий перегрів обмотки статора асинхронного двигуна, розглянуто деякі питання теорії нагрівання електричних машин. Встановлено, що остання в цілому базується на теорії нагрівання однорідного тіла. Таке припущення дозволяє знехтувати рядом складних теплообмінних процесів в середині структури машини, спростити їх; проте із прогнозованою точністю дозволяє отримати дані для оцінки теплового стану електричної машини.

Існує ряд практичних методів аналітичного визначення перегріву обмоток електричної машини, серед яких добре відомими є методи теплових схем та метод узагальненої теплової моделі.

Найбільш зручним для оцінки перегріву електричної машини в реальній експлуатації є метод узагальненої теплової моделі. Зручність методу полягає у використанні при визначенні теплових опорів машини простих емпіричних залежностей, до яких входять лише геометричні розміри машини та узгоджуючі коефіцієнти.

										7.141.230805.ПЗ	Арк.
											33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

РОЗДІЛ 3 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ НА ДОДАТКОВИЙ НАГРІВ СТАТОРНОЇ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1 Застосування методу узагальненої теплової моделі двигуна для визначення перевищення температури його статорної обмотки

В розділі 2 представлено метод визначення перегріву обмотки статора асинхронного двигуна на основі його узагальненої теплової моделі. Використовуючи наведену методику визначимо величину перегріву статорної обмотки асинхронного двигуна загальнопромислового виконання АОЛ2 31-4.

В таблиці 3.1 наведено паспортні та деякі обмоткові дані двигуна АОЛ2 31-4

Таблиця 3.1 – Технічні дані асинхронного двигуна АОЛ2 31-4

P , кВт	U , В	I , А	η	$\cos \varphi$	n , об/хв	D_{al} , мм	l_1 , мм
2,2	220/380	7,8/4,5	0,85	0,87	1380	191	100

Потужність, споживана двигуном із мережі становить:

$$P_1 = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta} = \frac{2200}{0,85} = 2588 \text{ Вт}$$

За виразом (26) визначимо сумарні втрати в двигуні в номінальному режимі.

$$\sum p = P_1 \cdot (1 - \eta) = 2588 \cdot (1 - 0,85) = 388,2 \text{ Вт}$$

При цьому електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta P_1 = 0,5 \cdot \sum p = 0,5 \cdot 388,2 = 194,1 \text{ Вт},$$

електричні втрати в обмотці ротора:

$$\Delta P_2 = 0,25 \cdot \sum p = 0,25 \cdot 388,2 = 97,05 \text{ Вт},$$

Втрати в сталі статора становлять:

$$\Delta P_3 = 0,2 \cdot \sum p = 0,2 \cdot 388,2 = 77,64 \text{ Вт}.$$

За виразом (28) з урахуванням того, що для двигуна АОЛ2 31-4 $K = 27$ визначимо R_{11} .

$$R_{11} = \frac{K}{D_{a1}l_1} = \frac{27}{19,1 \cdot 10} = 0,14 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

За виразом (29)

$$R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6R_{11} = 0,6 \cdot 0,14 = 0,084 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

Тоді за виразом (27) величина середнього перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна АОЛ2 31-4 в номінальному режимі становить:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{ном}} &= R_{11}\Delta P_1 + R_{12}\Delta P_2 + R_{13}\Delta P_3 = \\ &= 0,14 \cdot 194,1 + 0,084 \cdot 97,05 + 0,084 \cdot 77,64 = 41,8^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3.2 Визначення додаткового перегріву обмотки статора від несиметрії живлячої напруги

Вплив амплітудної несиметрії живлячої напруги на кінцевий перегрів статорної обмотки асинхронного двигуна можна визначити за виразом [3, 6]:

$$\theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{ном}}, \quad (30)$$

де K_{2U} - коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю.

Тоді, перегрів θ_1 статорної обмотки асинхронного двигуна з урахуванням несиметрії живлячої напруги можна визначити за виразом:

$$\theta_1 = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{ном}} + \theta_{\text{ном}} = \theta_{\text{ном}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \right) \quad (31)$$

Вираз (31) для двигуна АОЛ2 31-4 матиме вигляд:

$$\theta_1 = 41,8 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \right) \quad (32)$$

										7.141.230805.ПЗ	Арк.
											35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Прийmemo, що K_{2U} змінюється в діапазоні 0...10%. Тоді, за виразом (32) з урахуванням зміни K_{2U} визначимо перегрів θ_1 статорної обмотки двигуна АОЛ2 31-4.

При $K_{2U} = 0$:

$$\theta_1 = 41,8 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \right) = 41,8 \cdot (1 + 0) = 41,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Аналогічно визначимо θ_1 при інших значеннях K_{2U} . Результати розрахунку представимо в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Перегрів θ_1 асинхронного двигуна АОЛ2 31-4 при зміні K_{2U}

K_{2U} , %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ_1 , °C	41,8	42,6	45,1	49,3	55,2	62,7	71,9	82,8	95,3	109,5	125,4

За даними табл. 3.2 побудуємо графік залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для асинхронного двигуна АОЛ2 31-4.

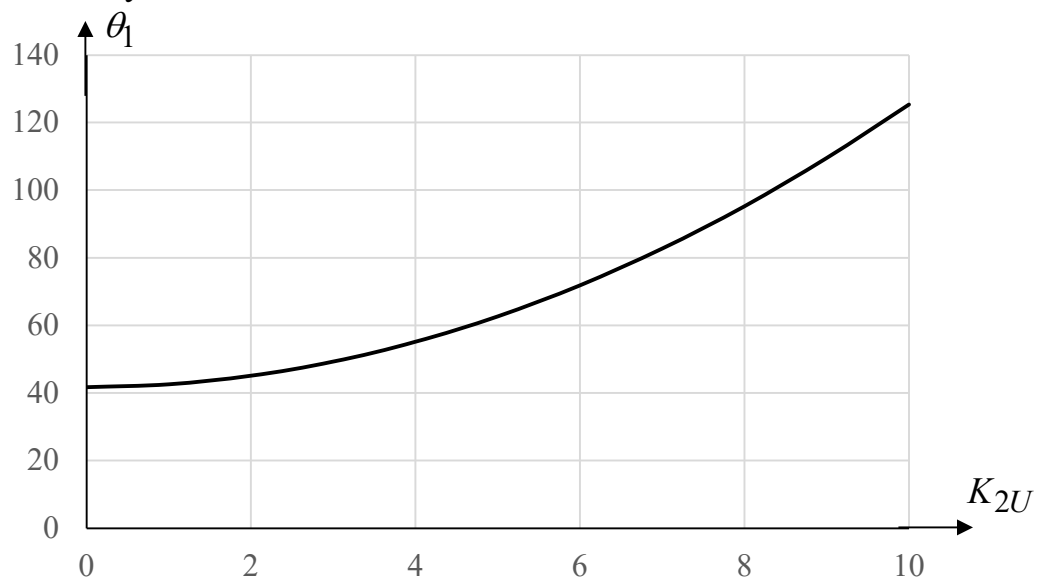


Рисунок 3.1 - Графік залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для асинхронного двигуна АОЛ2 31-4

На рис. 3.1 побудовано графік залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для асинхронного двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні, отриманий шляхом аналітичного розрахунку.

3.3 Висновки до розділу

Використовуючи метод узагальненої теплової моделі, аналітичним шляхом було визначено середній перегрів обмотки статора реального асинхронного двигуна АОЛ2 31-4, який працює в номінальному режимі.

Розглянуто метод визначення додаткового перегріву, що виникає при живленні асинхронного двигуна несиметричною за своєю амплітудою напругою. Отримано аналітичний вираз залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при його роботі із номінальним навантаженням.

Побудовано графік залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при його роботі із номінальним навантаженням. Із графіка встановлено, що при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги в межах 0...10% перегрів обмотки статора двигуна лежить в діапазоні 41,8...125,4°C.

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВОГО НАГРІВУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

4.1 Схема експериментального стенду та опис її роботи

Порівнюємо результати аналітичного дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на перегрів обмотки статора асинхронного двигуна із експериментальним дослідженням на реальному двигуні.

З цією метою в лабораторії електричних машин електроприводу Українського державного університету науки і технологій зібрано дослідну схему, яку показано на рис. 4.1.

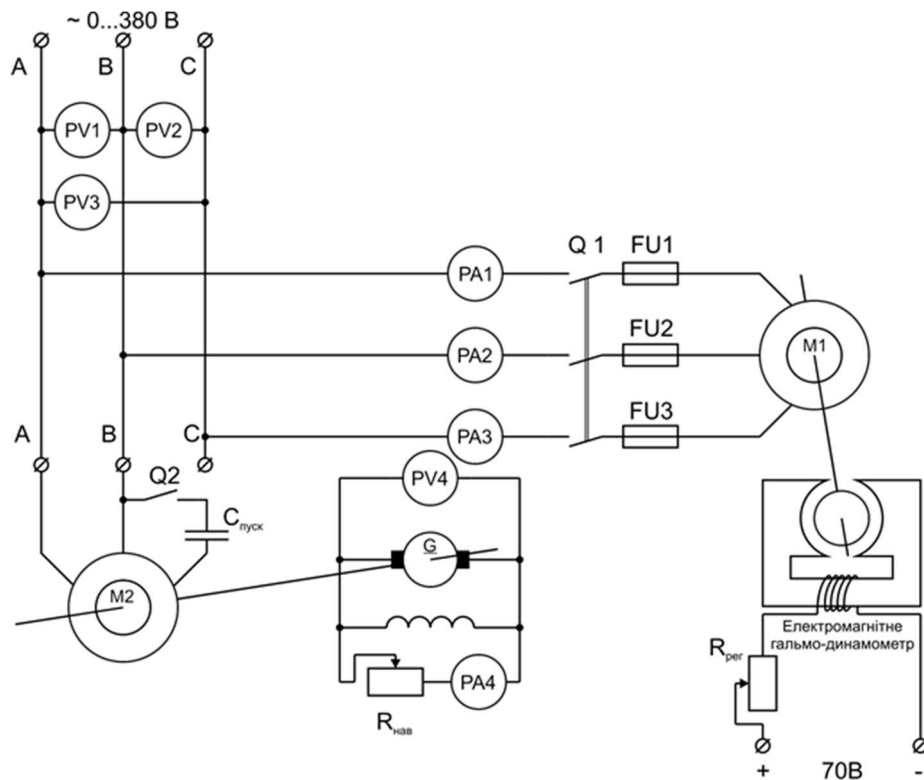


Рисунок 4.1 - Принципова схема дослідів для випробування асинхронного двигуна на перегрів при несиметрії живлячої напруги

Схема рис. 4.1 містить в собі наступні елементи:

M1 – досліджуваний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором типу АОЛ 2-31-4;

M2 – трифазний асинхронний двигун типу А51-4;

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

G – генератор постійного струму типу П-42;

$R_{\text{нав}}$ – водяний реостат навантаження;

$R_{\text{рег}}$ – регулювальний реостат РШ -100 Ом, 1 А

$C_{\text{пуск}}$ – пусковий конденсатор;

Q1 – триполюсний рубильник;

Q2 – однополюсний рубильник пусковий;

PV1, PV2, PV3 – вольтметри змінного струму типу Е-59;

PV4 – вольтметр постійного струму типу Е-59;

PA1, PA2, PA3 – амперметри змінного струму Е-59;

PA4 – амперметр постійного струму Е-59;

FU1, FU2, FU3 – плавкі запобіжники.

Живлення схеми здійснюється від джерела регульованої напруги змінного струму. В якості джерела живлення використовується індукційний регулятор, який дає можливість змінювати вхідну трифазну напругу схеми в діапазоні 0...380 В в симетричному режимі.

Асинхронний двигун М2 працює в однофазному режимі. Для його пуску застосовується пусковий конденсатор $C_{\text{пуск}}$, який короткочасно підключається до двигуна через рубильник Q2. Двигун М2 обертає генератор постійного струму паралельного збудження G, який навантажено водяним реостатом $R_{\text{нав}}$. Зміна опору реостату $R_{\text{нав}}$ призводить до зміни струму якоря генератора G, моменту на валу двигуна М2 і відповідно лінійних струмів у фазах А та В. Таке схемне рішення дозволяє отримувати несиметрію системи лінійних напруг стенда в межах $K_{2U} = 0...12\%$.

Контроль за поточним діючим значенням лінійних напруг системи здійснюється трьома вольтметрами змінного струму PV1...PV3. При цьому значення коефіцієнта несиметрії можна визначити за виразом:

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{л ном}}} \cdot 100 = \frac{0,62 \cdot (U_{\text{л max}} - U_{\text{л min}})}{U_{\text{л ном}}} \cdot 100,$$

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

де $U_{л\max}$, $U_{л\min}$ - відповідно найбільше і найменше значення лінійної напруги отримані із показань вольтметрів PV1...3;

$U_{л\text{ном}} = 220 \text{ В}$ – номінальна лінійна напруга.

Досліджуваний асинхронний двигун М1 підключається до несиметричної системи живлячої напруги через рубильник Q1. Лінійні струми, споживані двигуном, визначаються за допомогою трьох амперметрів змінного струму PA1...PA3. Лінія, що живить двигун М1 захищена від струмів короткого замикання і перевантаження плавкими запобіжниками FU1...FU3. Двигун М1 працює із безпосереднім навантаженням на валу, в якості якого застосовується електромагнітне гальмо з динамометром. Величина гальмівного моменту електромагніту регулюється струмом збудження за допомогою реостата $R_{\text{рег}}$.

4.2 Постановка експерименту

Номінальний момент на валу двигуна АОЛ2 31-4 дорівнює:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n} = 9,55 \cdot \frac{2200}{1380} = 15,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Регулюючи струм збудження електромагніту, будемо підтримувати значення 15,2 Нм на відліковому пристрої динамометра впродовж всього дослідження.

Суть дослідження полягає в наступному: виставивши за допомогою навантаження однофазного асинхронного двигуна М2 певного значення k_{2U} запустити двигун М1, навантажити його номінальними моментом і тримати його ввімкненим до завершення процесу нагрівання (3...4T) після цього зафіксувати величину усталеного перегріву обмотки двигуна М1.

Виходячи із переліку наявного обладнання, перегрів обмотки статора будемо визначати за властивістю мідного проводу змінювати свій опір при нагріванні.

Чисельне значення перегріву обмотки статора асинхронного двигуна визначаємо за формулою [5, 8]:

										7.141.230805.ПЗ	Арк.
											40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

$$\theta_1 = \frac{r_{\text{пер}} - r_{\text{хол}}}{r_{\text{хол}}} (230 + \vartheta_{\text{хол}}) + \vartheta_{\text{хол}} - \vartheta_0, \quad (33)$$

де $r_{\text{пер}}$ - опір обмотки в нагрітому стані;

$r_{\text{хол}}$ - опір обмотки в холодному стані;

$\vartheta_{\text{хол}}$ - температура холодної обмотки;

ϑ_0 - температура охолоджуючого середовища.

Для визначення опору обмотки використовується метод амперметра-вольтметра [8], вимірювальну схему якого представлено на рис 4.2.

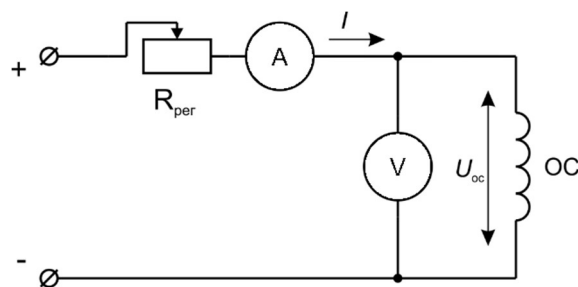


Рисунок 4.2 – Схема вимірювання опору обмотки статора асинхронного двигуна методом амперметра-вольтметра

Електричний опір постійному струмові обмотки статора асинхронного двигуна R_{oc} визначається із виразу [8]:

$$R_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{oc}}}{I}.$$

4.3 Хід виконання та результати експерименту

При $K_{2U} = 0$ проведемо випробування двигуна на нагрів із номінальним навантаженням.

З метою отримання часових діаграм процесу нагрівання асинхронного двигуна весь час нагрівання розділимо на рівномірні проміжки часу $t = 5$ хв, через які буде вимірюватися температура обмотки в найбільш завантаженій фазі асинхронного двигуна М1.

									7.141.230805.ПЗ	Арк.
										41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

На рис. 4.3 показано залежність $\theta_1 = f(t)$ при $K_{2U} = 0$, яку отримано експериментальним шляхом.

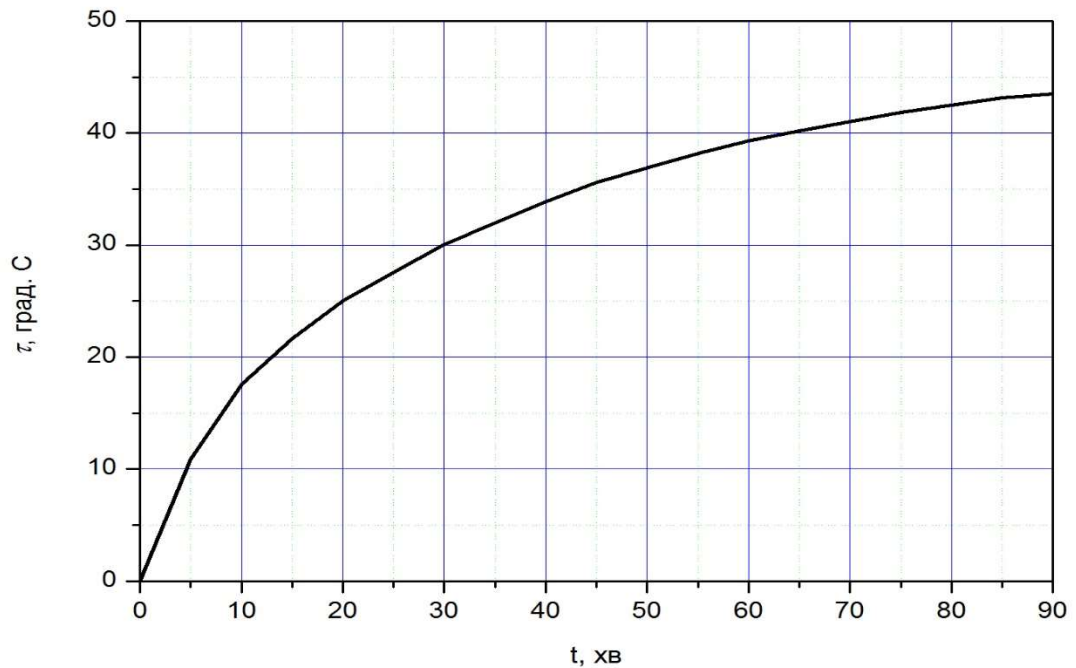


Рисунок 4.3 – Експериментальна залежність $\theta_1 = f(t)$ при $K_{2U} = 0$ для двигуна АОЛ2 31-4.

Усталена температура перегріву обмотки статора за виразом (33):

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{r_{\text{пер}} - r_{\text{хол}}}{r_{\text{хол}}} (230 + \vartheta_{\text{хол}}) + \vartheta_{\text{хол}} - \vartheta_0 = \\ &= \frac{2,16 - 1,84}{1,84} (230 + 20) + 20 - 20 = 43,47^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Із залежності на рис.4.3 видно, що час, за який обмотка статора досягає усталеного перегріву становить $4T = 90$ хв.

За допомогою зміни навантаження однофазного двигуна М2 встановимо значення $K_{2U} = 2,44\%$ та знімемо криву нагрівання двигуна (див. рис. 4.4).

Усталена температура перегріву обмотки статора при таких умовах за виразом (33) становить:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{r_{\text{пер}} - r_{\text{хол}}}{r_{\text{хол}}} (230 + \vartheta_{\text{хол}}) + \vartheta_{\text{хол}} - \vartheta_0 = \\ &= \frac{2,14 - 1,8}{1,8} (230 + 19) + 19 - 19 = 45,52^\circ\text{C} \end{aligned}$$

										Арк.
										42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.230805.ПЗ					

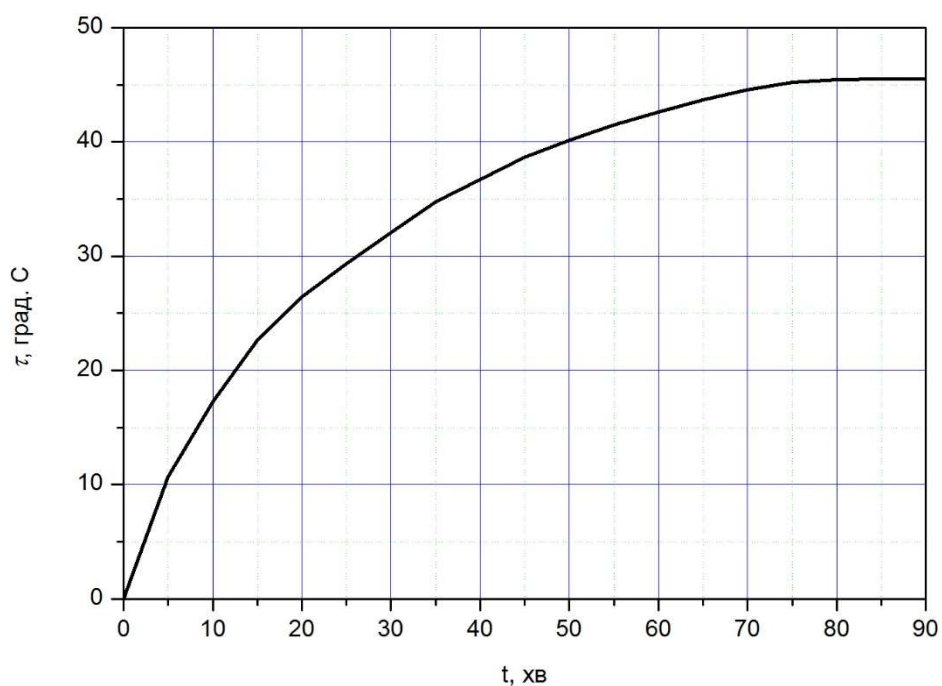


Рисунок 4.4 - Експериментальна залежність $\theta_1 = f(t)$ при $K_{2U} = 2,44\%$ для двигуна АОЛ2 31-4.

Знімемо криву нагрівання для двигуна АОЛ2 31-4 при $K_{2U} = 7,03\%$ (див. рис. 4.5).

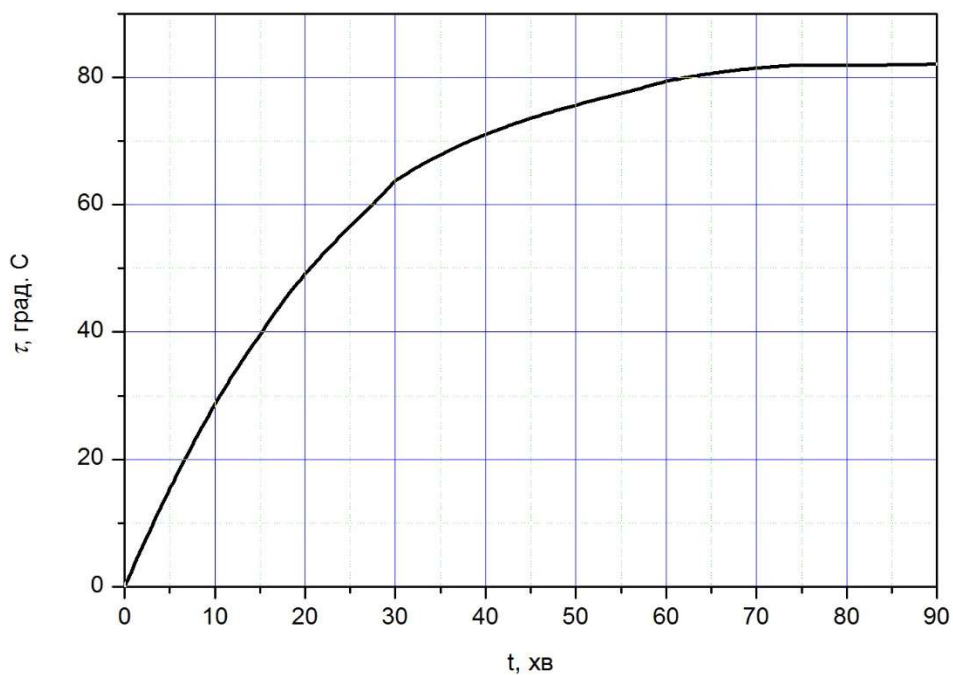


Рисунок 4.5 - Експериментальна залежність $\theta_1 = f(t)$ при $K_{2U} = 7,03\%$ для двигуна АОЛ2 31-4.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для побудови експериментальної залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$

$K_{2U}, \%$	0	2,44	7,03	9,12
$\theta_1, ^\circ\text{C}$	43,47	45,52	82,13	110,97

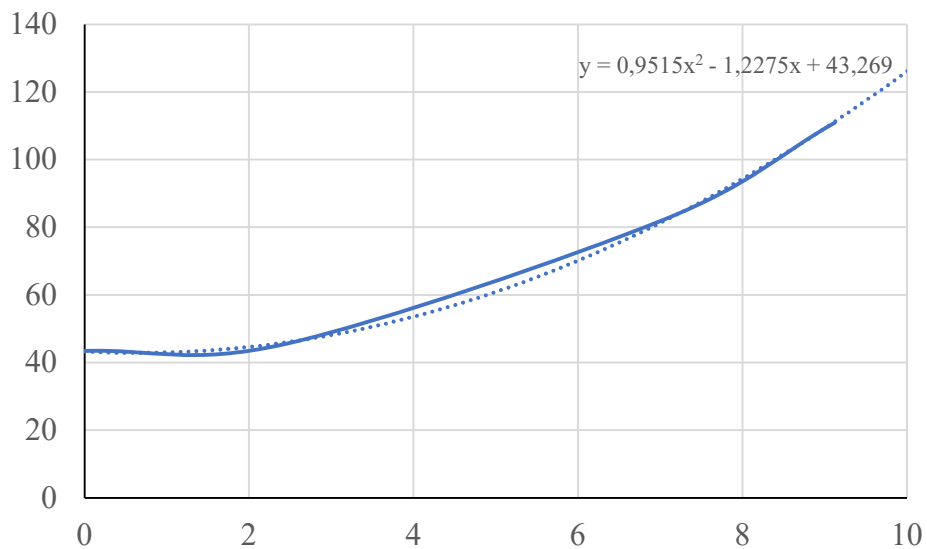


Рисунок 4.7 – Графіки експериментальної та апроксимованої залежностей $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні

На рис. 4.7 суцільною лінією синього кольору показано експериментально отриману залежність $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні, а пунктирною лінією – результат її апроксимації поліномом другого порядку, рівняння якого має вигляд:

$$\theta_1 = 0,9515 \cdot K_{2U}^2 - 1,2275 \cdot K_{2U} + 43,268.$$

Порівняємо раніше отриману аналітичну залежність $\theta_1 = f(K_{2U})$ із отриманою в результаті експерименту.

На рис. 4.8 лінія червоного кольору – експериментально отримана залежність $\theta_1 = f(K_{2U})$; лінія чорного кольору – аналітично отримана залежність $\theta_1 = f(K_{2U})$. Аналіз числових даних показав, що відносна похибка по основним точкам залежності не перевищує 3,4%.

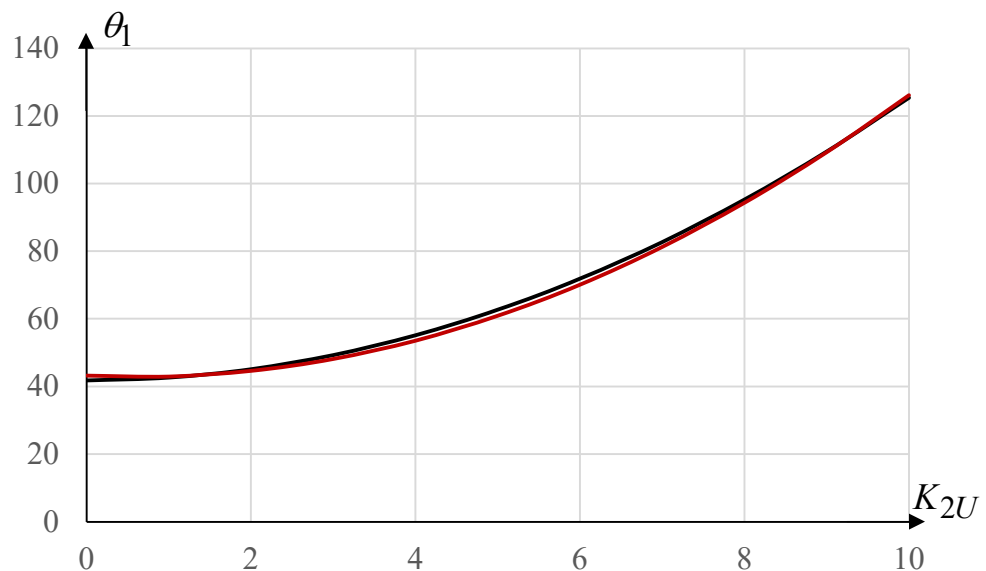


Рисунок 4.8 – Порівняльний аналіз аналітичної та експериментальної залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні

Отриманий вище аналітичний вираз для двигуна АОЛ2 31-4 можна використовувати, наприклад, для математичного моделювання процесів нагрівання обмоток даного двигуна при живленні несиметричною напругою із більшим значенням K_{2U} .

4.4 Висновки до розділу

Виконано експериментальне дослідження по визначенню залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні.

Графік $\theta_1 = f(K_{2U})$ апроксимовано поліномом другого порядку, отримано аналітичний вираз залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для реального двигуна АОЛ2 31-4, що працює із номінальним навантаженням.

Порівняно аналітично отриману залежність $\theta_1 = f(K_{2U})$ із експериментальною. Встановлено, що розбіжність між результатами розрахунку та експерименту не перевищує 3,4%, що підтверджує високу точність обраного методу аналітичного розрахунку додаткового перегріву обмотки статора двигуна АОЛ2 31-4.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Вимоги безпеки праці під час виконання робіт по експлуатації електроприводів

Електричний двигун (електропривод) є діючою електроустановкою, тобто являє собою установку або частину її, яка перебуває під напругою, або на яку напруга може бути подана вмиканням комутаційних апаратів. При експлуатації електроприводів мають місце шкідливі і небезпечні виробничі фактори.

Шкідливий фактор – це виробничий фактор, вплив якого на працюючого в певних умовах може призвести до захворювання або зниження працездатності [9]. До шкідливих виробничих факторів при експлуатації електроприводів відносять шум, вібрацію та в окремих випадках дію сильних електромагнітних полів. Гранично допустимі рівні шуму, вібрації та електромагнітних завад при роботі електропривода обумовлюються чинними нормативними документами, вимоги яких повинні бути враховані як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації електроприводу.

Небезпечний фактор – це виробничий фактор, вплив якого на працюючого в певних умовах призводить до травми, гострого отруєння або іншого раптового різкого погіршення здоров'я або смерті [9]. Серед можливих небезпечних виробничих факторів при експлуатації електроприводів є ураження електричним струмом при дотиканні до струмоведучих частин, а також травматизація при потраплянні персоналу під дію обертових частин механізму.

Вимоги стосовно безпеки праці, зокрема в частині електробезпеки та пожежної безпеки, застосовуються до електроприводів, як на етапі їх проектування, так і під час їх промислової експлуатації. Основними нормативними документами в цій галузі є Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						47
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

(НПАОП 40.1-1.21-98) та Правила будови електроустановок. Пожежна безпека електроустановок. Інструкція (НАПБ В.01.056-2013/111).

Вимоги безпеки при експлуатації електродвигунів відповідно до [10, 11, 12].

1. На електродвигунах та механізмах, які вони приводять у дію, повинні бути нанесені стрілки, що вказують напрямок обертання їх рухомих частин, а також написи з назвою агрегату, до якого вони належать.

2. На комутаційних апаратах (вимикачах, контакторах, магнітних пускачах, пускорегулювальних пристроях, запобіжниках тощо) повинні бути нанесені написи, що вказують, до якого електродвигуна вони належать.

3. Плавкі вставки запобіжників повинні бути калібровані із зазначенням на клеймі номінальної сили струму вставки. Клеймо ставиться підприємством-виробником або електротехнічною лабораторією. Застосовувати некалібровані плавкі вставки забороняється.

4. У разі короткочасного припинення електроживлення повинен бути забезпечений самозапуск електродвигунів відповідальних механізмів після повторної подачі напруги, якщо збереження механізмів у роботі необхідне (за умов технологічного процесу) і допустиме за умов безпеки та зниження напруги електромережі.

Перелік електродвигунів відповідальних механізмів, які беруть участь у самозапуску, із зазначенням уставок захистів і допустимого часу перерви живлення затверджує особа, відповідальна за електрогосподарство.

5. Захисти елементів електричної мережі споживачів, а також технологічне блокування вузлів електричної мережі виконуються таким чином, щоб забезпечувався самозапуск електродвигунів відповідальних механізмів.

Для полегшення самозапуску відповідальних механізмів, як правило, повинен бути передбачений захист мінімальної напруги, що вимикає на час зниження (зникнення) напруги електродвигуни, які не беруть участі в процесі самозапуску.

										Арк.
										48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.230805.ПЗ					

6. Електродвигуни, що тривалий час перебувають у резерві, та пристрої автоматичного вмикання резерву (АВР) повинні оглядатись та випробуватись разом із механізмами відповідно до графіка, затвердженого особою, відповідальною за електрогосподарство. У цьому разі в електродвигунів зовнішнього розташування, які не мають обігріву, а також двигунів на напругу 6 кВ, що тривалий час перебувають у резерві, повинен бути перевірений опір ізоляції обмотки статора і коефіцієнт абсорбції.

7. Електродвигуни з короткозамкненими роторами допускається запускати з холодного стану два рази поспіль, з гарячого - один раз, якщо інструкція підприємства-виробника не передбачає більшої кількості пусків. Наступні пуски допускаються після їх охолодження протягом часу, обумовленого інструкцією підприємства-виробника для відповідного типу електродвигуна.

Повторні увімкнення електродвигунів у разі їх вимкнення основними захистами допускаються після обстеження, проведення контрольних вимірів опору ізоляції і перевірки справності захистів.

Для електродвигунів відповідальних механізмів, що не мають резерву, допускається одне повторне увімкнення після дії основних захистів за результатами зовнішнього огляду двигуна.

Наступне увімкнення електродвигунів у разі дії резервних захистів до з'ясування причин вимкнення заборонене.

8. Для спостереження за пуском і роботою електродвигунів, регулювання технологічного процесу яких здійснюється за значенням сили струму, а також усіх електродвигунів змінного струму потужністю більше ніж 100 кВт на пусковому щитку чи панелі керування встановлюють амперметр, який вимірює силу струму у колі статора електродвигуна (потужністю менше 100 кВт, якщо він передбачений підприємством-виробником). Амперметр встановлюють також у колі збудження синхронних електродвигунів. На шкалі амперметра червоною рисою позначають значення допустимої сили струму (вище номінального значення сили струму електродвигуна на 5%).

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. У багатошвидкісного електродвигуна, що працює, обмотка, яка не використовується, і кабель, що її живить, слід розглядати як такі, що перебувають під напругою.

29. Під час роботи на електродвигуні заземлення може бути встановлене на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з розподільчим устаткуванням (збіркою). Під час роботи на механізмі, не пов'язаній з доторканням до частин, що обертаються, і у випадку роз'єднання з'єднувальної муфти заземлювати кабельну лінію не слід.

30. Якщо на відключеному електродвигуні роботи не провадять або їх перервано на кілька днів, то від'єднана від нього кабельна лінія має бути заземлена з боку електродвигуна. В тих випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається у електродвигунів напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником, перетином не меншим від перетину жили кабелю, чи з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення і з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативному журналі нарівні з переносним заземленням.

31. На однотипових або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому провадять роботи, слід вивісити плакати «Стій! Напруга» незалежно від того, перебувають вони в роботі чи у резерві.

32. Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід провадити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені.

33. Під час видавання дозволу робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу — в оперативному журналі цеху (дільниці), що провадить випробування.

34. Ремонт і налагоджування електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконавчим механізмом, регулювальних органів і запірної арматури можна провадити за розпорядженням. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на виведення електроприводу в ремонт, налагодження. Про це слід зробити запис під час оформлення розпорядження.

										7.141.230805.ПЗ	Арк.
											53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

35. Вмикання електродвигуна для випробування до повного закінчення роботи здійснюється після виведення бригади з робочого місця. Після випробування провадиться повторний допуск з оформленням у наряді.

Під час виконання роботи за розпорядженням на повторний допуск розпорядження дається знову.

5.2 Дії працівників (персоналу) в аварійних (надзвичайних) ситуаціях

Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів [10] у разі виникнення аварійної ситуації передбачено негайне вимкнення електродвигуна персоналом.

Електродвигун (обертова машина) повинен бути негайно відключений від мережі у таких випадках:

- нещасний випадок (чи загроза) з людиною;
- поява диму, вогню або запаху горілої ізоляції з корпусу електродвигуна або його пускорегулювальної апаратури;
- вібрація понад допустимі норми, яка загрожує виходу з ладу електродвигуна або механізму;
- вихід з ладу привідного механізму;
- нагрівання підшипників або контрольованих вузлів понад допустиме значення температури, зазначене в інструкції підприємства-виробника ;
- виникнення КЗ в електричній схемі;
- значне зниження частоти обертання;
- швидке зростання температури обмоток або сталі статора.

В експлуатаційній інструкції можуть бути вказані й інші випадки, за якими електродвигуни (обертові машини) повинні бути негайно вимкнені, а також указаний порядок їх усунення [10].

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Використовуючи метод узагальненої теплової моделі, аналітичним шляхом було визначено середній перегрів обмотки статора реального асинхронного двигуна АОЛ2 31-4, який працює в номінальному режимі.

Розглянуто метод визначення додаткового перегріву, що виникає при живленні асинхронного двигуна несиметричною за своєю амплітудою напругою. Отримано аналітичний вираз залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при його роботі із номінальним навантаженням.

Побудовано графік залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при його роботі із номінальним навантаженням. Із графіка встановлено, що при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги в межах 0...10% перегрів обмотки статора двигуна лежить в діапазоні 41,8...125,4°C.

Виконано експериментальне дослідження по визначенню залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні.

Графік $\theta_1 = f(K_{2U})$ апроксимовано поліномом другого порядку, отримано аналітичний вираз залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для реального двигуна АОЛ2 31-4, що працює із номінальним навантаженням.

Порівняно аналітично отриману залежність $\theta_1 = f(K_{2U})$ із експериментальною. Встановлено, що розбіжність між результатами розрахунку та експерименту не перевищує 3,4%, що підтверджує високу точність обраного методу аналітичного розрахунку додаткового перегріву обмотки статора двигуна АОЛ2 31-4.

										7.141.230805.ПЗ	Арк.
											56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

11. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [текст]. – Х.: Видавництво «Форт», 2012. – 374 с.

12. НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [текст]. – Х.: Видавництво «Форт», 2008. – 192 с.

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

1. Показники якості електричної енергії, норми та вплив на роботу електроприймачів.
2. Узагальнена теплова модель – метод оцінки теплового стану асинхронного двигуна при несиметрії живлячої напруги.
3. Аналітичний розрахунок додаткового перегріву при несиметричному живленні асинхронного двигуна.
4. Порівняння результатів аналітичного розрахунку із результатами практичного експерименту.

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					7.141.230805.ПЗ	Арк.
						60
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, НОРМИ ТА ВПЛИВ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ

Відповідно до стандарту ГОСТ 13109-97, систему показників якості електричної енергії при живленні від електричних мереж трифазного струму утворюють:

- відхилення напруги (ВН) ΔU ;
- розмах зміни напруги δU_t (або амплітуда коливань напруги);
- інтенсивність (доза) флікера (ІФ) P_f ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої лінійної (фазної) напруги $k_{нс}$;
- коефіцієнт ν -ї вищої гармоніки $K_{U(\nu)}$;
- коефіцієнт зворотної ε_2 та нульової ε_0 послідовності напруги;
- тривалість провалу напруги $\Delta t_{п}$;
- імпульс напруги $U_{імп}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{пер U}$;
- відхилення частоти Δf .

Визначення найбільш значущих показників якості електричної енергії

Відхилення напруги (ВН)	Коливання напруги (КН)	Коефіцієнт зворотної послідовності напруг	Коефіцієнт нульової послідовності напруг
$\Delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}}$	$\delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{ном}}$	$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100$	$\varepsilon_0 = \frac{U_0}{U_{ном.ф}} \cdot 100$

					<i>Показники якості електричної енергії, норми та вплив на роботу електроприймачів</i>				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на нагрівання асинхронного двигуна	Лім.	Маса	Масштаб	
Розроб.		Грабовський Д.С.	<i>[Підпис]</i>	13.01.21				1	1 : 1
Перевір.		Балійчук О.Ю.	<i>[Підпис]</i>	13.01.21					
Т. Контр.						Арк.	1	Аркушів	4
Реценз.									
Н. Контр.		Карцова О.О.	<i>[Підпис]</i>	13.01.21	Додаток А 7.141.230805.01				
Затверд.		Муха А.М.	<i>[Підпис]</i>	13.01.21	МОН України, УДУНТ Кафедра ЕТЕМ Група ЕЕ2321				

УЗАГАЛЬНЕНА ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ – МЕТОД ОЦІНКИ ТЕПЛОВОГО СТАНУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ

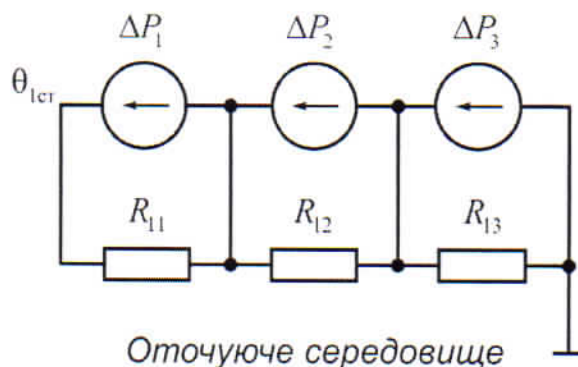


Рисунок А.1 – Узагальнена теплова модель асинхронного двигуна

θ_1 - середнє перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна в нормальних умовах;

$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ - електричні втрати в обмотці статора, електричні втрати в обмотці ротора і втрати в сталі відповідно, Вт;

R_{11}, R_{12}, R_{13} - узагальнені теплові опори еквівалентної теплової схеми заміщення, $\left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}} \right]$.

$$R_{11} = \frac{K}{D_{a1} l_1};$$

$$R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6 R_{11},$$

Середнє перевищення температури $\theta_{1\text{ном}}$ обмотки статора:

$$\theta_{1\text{ном}} = R_{11} \Delta P_1 + R_{12} \Delta P_2 + R_{13} \Delta P_3.$$

					Узагальнена теплова модель метод оцінки теплового стану асинхронного двигуна при несиметрії живлячої напруги			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на нагрівання асинхронного двигуна	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.		Грабовський Д.С.	<i>[Signature]</i>	15.01.22			1	1:1
Перевір.		Балійчук О.Ю.	<i>[Signature]</i>	15.01.22				
Т. Контр.						Арк. 2	Аркушів 4	
Реценз.					Додаток А 7.141.230805.02	МОН України, УДУНТ Кафедра ЕТЕМ Група ЕЕ2321		
Н. Контр.		Карзова О.О.	<i>[Signature]</i>	13.11				
Затверд.		Муха А.М.	<i>[Signature]</i>	13.11				

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВОГО ПЕРЕГРІВУ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ ЖИВЛЕННІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Таблиця А.1 – Технічні дані асинхронного двигуна АОЛ2 31-4

P, кВт	U, В	I, А	η	cos φ	n, об/хв	D _{al} , мм	l ₁ , мм
2,2	220/380	7,8/4,5	0,85	0,87	1380	191	100

Для двигуна АОЛ2 31-4 $K = 27$, тоді: Вираз $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна

$$R_{11} = \frac{K}{D_{al}l_1} = \frac{27}{19,1 \cdot 10} = 0,14 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

АОЛ2 31-4 матиме вигляд:

$$R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6R_{11} = \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

$$= 0,6 \cdot 0,14 = 0,084$$

$$\theta_{1\text{НОМ}} = R_{11}\Delta P_1 + R_{12}\Delta P_2 + R_{13}\Delta P_3 =$$

$$= 0,14 \cdot 194,1 + 0,084 \cdot 97,05 +$$

$$+ 0,084 \cdot 77,64 = 41,8^\circ\text{C}$$

$$\theta_1 = 41,8 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \right)$$

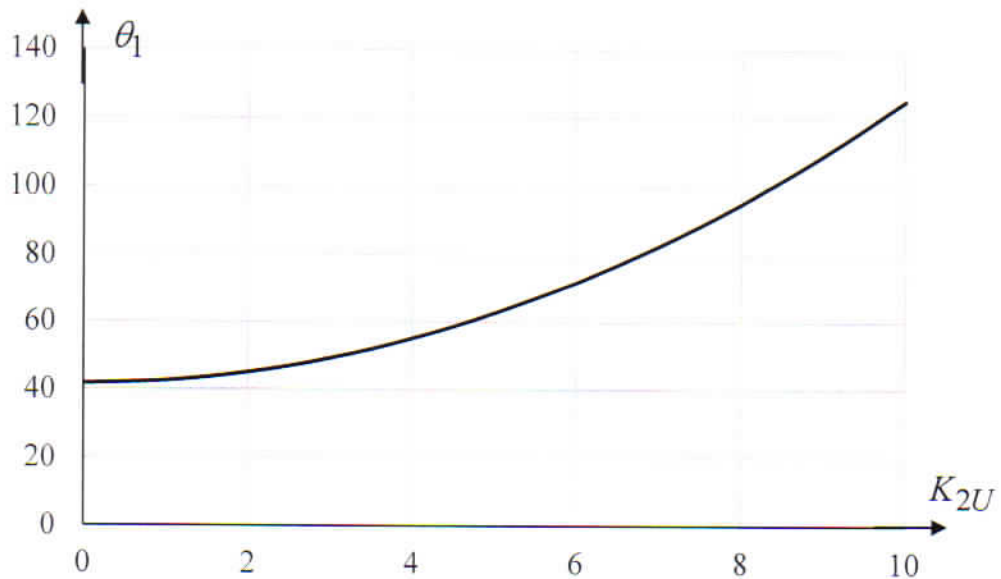


Рисунок А.2 - Графік залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для асинхронного двигуна
АОЛ2 31-4

					Аналітичний розрахунок додаткового перегріву при несиметричному живленні асинхронного двигуна				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на нагрівання асинхронного двигуна		Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.		Грабовський Д.С.	<i>[Підпис]</i>	2022					
Перевір.		Балійчук О.Ю.	<i>[Підпис]</i>	2022					
Т. Контр.							Арк. 3	Аркушів 4	
Реценз.					Додаток А 7.141.230805.03		МОН України, УДУНТ Кафедра ЕТЕМ Група ЕЕ2321		
Н. Контр.		Карзова О.О.	<i>[Підпис]</i>	2022					
Затверд.		Муха А.М.	<i>[Підпис]</i>	2022					

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ІЗ РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРАКТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

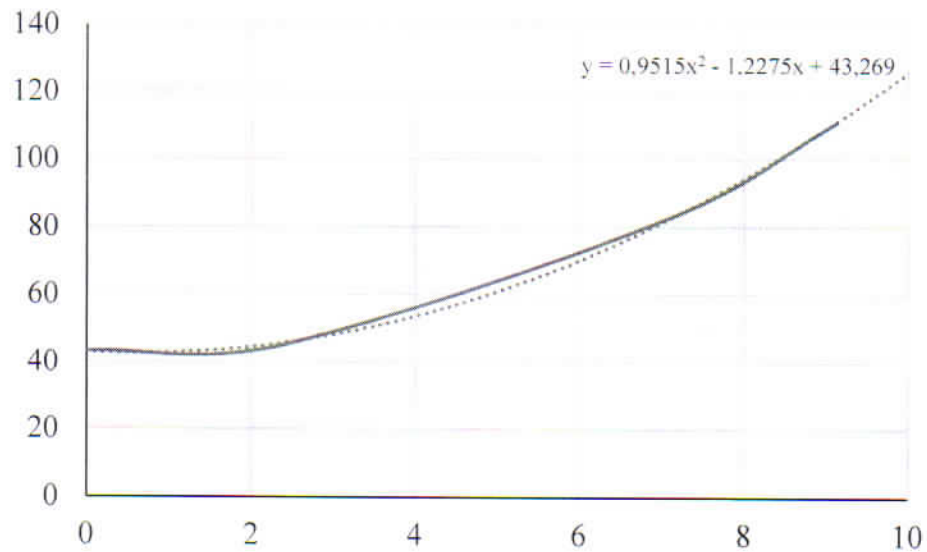


Рис. А.3 – Графіки експериментальної та апроксимованої залежностей $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні

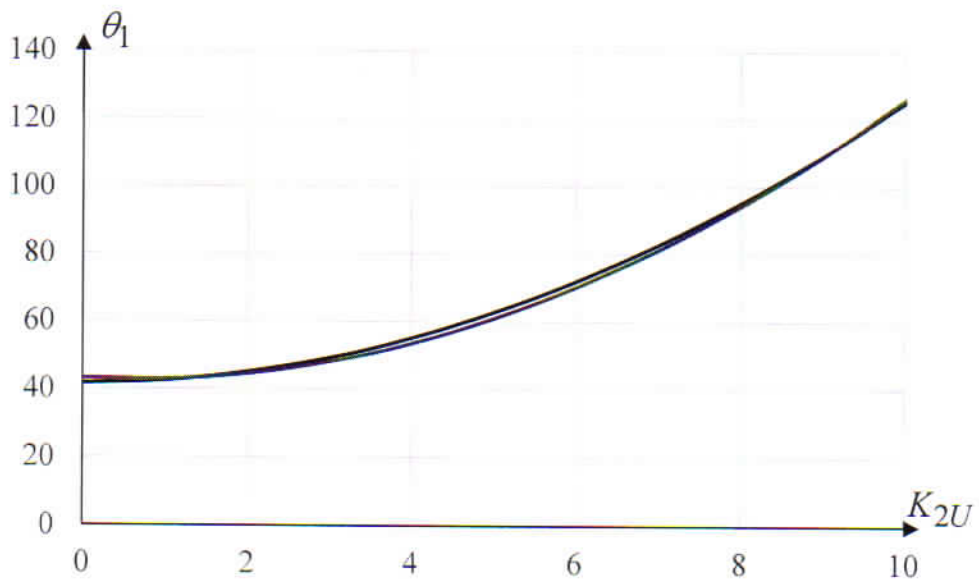


Рис. А.4 – Порівняльний аналіз аналітичної та експериментальної залежності $\theta_1 = f(K_{2U})$ для двигуна АОЛ2 31-4 при номінальному навантаженні

					<i>Порівняння результатів аналітичного розрахунку із результатами практичного експерименту</i>				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на нагрівання асинхронного двигуна	Лім.	Маса	Масштаб	
Розроб.		Грабовський Д.С.	<i>[Підпис]</i>	8.01.25			1	1 : 1	
Перевір.		Балійчук О.Ю.	<i>[Підпис]</i>	8.01.25					
Т. Контр.						Арк.	4	Аркушів	4
Реценз.						Додаток А 7.141.230805.04			
Н. Контр.		Карзова О.О.	<i>[Підпис]</i>	13.11		МОН України, УДУНТ Кафедра ЕТЕМ Група ЕЕ2321			
Затверд.		Муха А.М.	<i>[Підпис]</i>	14.11					