

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при
стохастичності змін рівнів навантаження**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-22

Олена РЕВА

Керівник випускної роботи _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

Нормо контролер _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

РЕВА Олена Анатоліївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження теплових режимів у обмотках тягових
електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів; II. Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження; III. Розподіл температури у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Залежність температури двигуна від часу нагрівання; II. Залежність температури повітря у внутрішній порожнині тягового двигуна від часу нагріву та охолодження; III. Залежність температури обмотки якоря двигуна від часу нагріву, охолодження та площі отворів на виході вентиляційного потоку; IV. Розподіл температури обмотки по довжині якоря.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Тетяна БЕРІДЗЕ		
II	Тетяна БЕРІДЗЕ		
III	Тетяна БЕРІДЗЕ		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Вимірювання температури у обмотках тягових електродвигунів	24.05.26
2	Побудова графічних залежностей для теплових режимів	29.05.26
3	Вимірювання температури у обмотках при стохастичності змін рівнів навантаження	02.06.26
4	Побудова графічних залежностей при стохастичності змін рівнів навантаження	11.06.26
5	Розподіл температури у обмотках тягових електродвигунів	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олена РЕВА
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження»

42 с., 10 рис., 30 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення експлуатаційної надійності та довговічності тягових електромеханічних систем шляхом комплексного аналізу теплових процесів у обмотках електродвигунів за умов динамічно змінного графіка навантаження та розробки рекомендацій щодо оптимізації систем охолодження, а також визначення закономірностей розподілу температурних полів у структурі обмоток тягових електродвигунів в умовах динамічної зміни тягових навантажень для розробки методів предиктивної діагностики та запобігання передчасному тепловому старінню ізоляції.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести аналіз фізичної природи виділення теплоти (втрат енергії) в активних матеріалах тягових двигунів різних типів під час їх роботи на різних ділянках тягового циклу (розгін, вибіг, рекуперативне гальмування).

Проаналізувати специфіку формування електричних (джоулевих) втрат в обмотках якоря (статора) та збудження під час характерних режимів роботи локомотива (рушання з місця, розгін, рух на затяжний підйом, вибіг).

Розробити еквівалентну теплову схему заміщення електродвигуна, що враховує теплоємність міді обмоток, сталі магнітопроводу та тепловий опір ізоляційних матеріалів.

Дослідити процеси теплопередачі між струмопровідними жилами, шарами корпусної ізоляції, магнітопроводом та охолоджувальним повітрям із урахуванням теплової інерції матеріалів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Дослідити перехідні теплові процеси за допомогою диференціальних рівнянь теплового балансу при випадкових та детермінованих коливаннях струму навантаження.

Розробити динамічну теплову модель (еквівалентну теплову схему заміщення), яка дозволяє в режимі реального часу розраховувати температуру найбільш нагрітої точки обмотки на основі даних про поточний струм навантаження.

Оцінити вплив пікових температурних перевантажень на швидкість теплового старіння електроізоляційних матеріалів (за законом Арреніуса).

Оцінити вплив короточасних пікових перевантажень на накопичений термомеханічний знос ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості.

Запропонувати критерії вибору систем примусового охолодження (повітряного чи рідинного) залежно від класу нагрівостійкості ізоляції та очікуваної інтенсивності експлуатації.

Сформулювати рекомендації щодо оптимізації алгоритмів мікропроцесорного захисту тягового приводу, які б враховували не лише миттєві значення струму, але й теплову передісторію двигуна.

ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ, ОБМОТКИ, ПЕРЕГРІВ ОБМОТОК, ТЕПЛОВІДДАЧА, ТЕПЛОВЕ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ, ПОСТІЙНА ЧАСУ НАГРІВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ, ЗМІНА НАВАНТАЖЕННЯ, ПЕРЕГРІВ, ТЕПЛОВА ІНЕРЦІЯ, ІЗОЛЯЦІЯ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів	14
1.1. Вимірювання температури у обмотках тягових електродвигунів при змін рівнів навантаження	14
1.2. Побудова графічних залежностей для теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при змін рівнів навантаження	15
Розділ 2. Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження	24
2.1. Вимірювання температури у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження	24
2.2. Побудова графічних залежностей для теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження....	25
Розділ 3. Розподіл температури у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження	28
3.1. Розподіл температури обмотки по довжині якоря та обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження	28
Висновки	30
Список використаних джерел	32
Додаток А.....	36
Додаток Б	37
Додаток В	38
Додаток Г	39
Додаток Д.....	40

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Додаток Е	41
Додаток Ж	42

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	Әпис	Дата		

Вступ

Природа тепловиділення в тягових машинах

Тягові електродвигуни залізничного, промислового та міського електричного транспорту функціонують у вкрай складних умовах, які кардинально відрізняються від умов роботи стаціонарних загальнопромислових машин.

Головною особливістю тяги є глибока та безперервна зміна рівнів навантаження.

Під час зрушення важкого поїзда з місця або подолання крутого підйому тягові двигуни споживають струми, що можуть у кілька разів перевищувати номінальні значення.

Оскільки електричні втрати в міді обмоток зростають пропорційно квадрату сили струму, такі режими супроводжуються інтенсивним виділенням колосальної кількості тепла безпосередньо всередині пазів магнітопровода.

Проблема теплової інерції та термомеханічних напружень

Дослідження теплових режимів при змінному навантаженні ускладнюється явищем теплової інерції.

Мідні провідники обмоток мають порівняно невелику масу, але є основним джерелом тепла.

Вони нагріваються дуже швидко.

Водночас масивне сталеве осердя статора (або ротора) нагрівається значно повільніше і діє як тепловий акумулятор.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Така різниця у швидкості нагрівання призводить до виникнення значних градієнтів температур між міддю та сталлю під час різких стрибків навантаження.

Це викликає небезпечні термомеханічні напруження: мідні стрижні розширюються швидше за сталеві пази, що призводить до механічного тертя, перетирання міканітової або полімерної ізоляції та виникнення мікротріщин.

Критичність контролю для збереження ізоляції

Температура є головним ворогом електричної ізоляції.

Навіть короточасне перевищення гранично допустимої температури (наприклад, понад 200°C для ізоляції класу C) запускає незворотні хімічні процеси деградації діелектрика.

Ізоляція стає крихкою, втрачає свої вологовідштовхувальні властивості, що неминуче завершується витковим або корпусним замиканням.

Традиційні температурні датчики (термопари або термоопори), встановлені на корпусі двигуна або у лобових частинах обмоток, мають значне запізнення і часто не здатні зафіксувати миттєвий перегрів провідників глибоко в пазах під час пікових навантажень.

Наукова та практична значущість

Актуальність цього дослідження полягає у створенні точних математичних та комп'ютерних моделей теплових процесів.

Розуміння того, як саме розподіляється тепло в обмотках при динамічній зміні струму, дозволяє розробити "віртуальні датчики температури".

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Бортовий контролер локомотива зможе обчислювати температуру найгарячішої точки обмотки в реальному часі, спираючись на графік струму навантаження.

Практичне впровадження результатів дозволить реалізувати адаптивні системи керування: автоматично обмежувати тяговий момент при наближенні температури до критичної межі, оптимізувати роботу вентиляторів охолодження та значно подовжити експлуатаційний ресурс найдорожчого вузла локомотива, уникаючи раптових аварійних виходів з ладу.

Проблема температурних обмежень у тягових приводах

Надійність роботи електричного рухомого складу (локомотивів, електропоїздів, міського електротранспорту) критично залежить від безперебійного функціонування тягових електродвигунів (ТЕД).

У процесі електромеханічного перетворення енергії частина потужності неминуче втрачається у вигляді тепла.

Основна частка цих втрат (до **60-70%**) припадає на електричні втрати в міді обмоток статора і ротора, які пропорційні квадрату струму навантаження.

Специфіка залізничного та міського транспорту полягає в тому, що тягові двигуни ніколи не працюють у стаціонарному номінальному режимі (режим S1 за класифікацією IEC).

Рух поїзда супроводжується частими пусками з максимальними струмами, подоланням затяжних підйомів, режимами вибігу (коли струм відсутній) та гальмуванням.

Такі різкі коливання навантаження викликають інтенсивні термоциклічні напруження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Перевищення допустимої температури навіть на **8-10°C** скорочує термін служби ізоляції вдвічі (правило Монтсінгера).

Тому точне моделювання теплових режимів є фундаментом для запобігання міжвитковим замиканням та пробоям ізоляції на корпус.

Математичний опис теплових процесів

Процес нагрівання однорідного твердого тіла з внутрішнім джерелом тепла описується класичним диференціальним рівнянням теплового балансу.

У спрощеному вигляді для обмотки двигуна воно має простий вигляд.

Розв'язок цього рівняння для випадку постійного навантаження дає експоненційну залежність зростання температури.

Проте для тягового приводу потужність втрат є нелінійною функцією часу, що залежить від профілю колії та ваги поїзда.

У такому випадку розрахунок здійснюється методом суперпозиції або шляхом чисельного інтегрування багатомасових еквівалентних теплових схем, де двигун розбивається на окремі вузли (обмотка, пазова ізоляція, зубці статора, ярмо, корпус), між якими існують теплові опори.

Вплив режимів роботи на вибір ізоляції

Для сучасних ТЕД найчастіше використовують ізоляційні матеріали класів нагрівостійкості **F** (гранична температура **155°C**), **H** (**180°C**) або **C** (понад **200°C**).

Оцінка впливу коливань навантаження на тепловий стан наведена в таблиці нижче.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Режим роботи (ІЕС 60034-1)	Характер навантаження	Особливості теплого процесу в обмотках
S1 (Тривалий)	Рух поїзда з постійною швидкістю на рівнинній ділянці.	Температура досягає усталеного значення. Нагрів є стабільним та прогнозованим.
S2 (Короткочасний)	Подолання короткого, але стрімкого підйому.	Струм значно перевищує номінальний. Обмотка швидко нагрівається, але не встигає досягти. Критичною є теплоємність міді.
S3-S6 (Повторно- короткочасний)	Робота міського транспорту (трамвай, метро) з частими зупинками.	Температура коливається (пилкоподібний графік). Важливим є ефективне відведення тепла під час пауз (вибіг, стоянка).

Практичне значення досліджень

Дослідження теплових режимів при зміні рівнів навантаження дозволяє оптимізувати масо-габаритні показники проєктованих двигунів.

Розуміння того, як саме розподіляються температурні поля всередині паза статора при пікових струмах, дає змогу інженерам розробляти більш ефективні системи вентиляції (наприклад, перехід від незалежного повітряного охолодження до рідинних "водяних сорочок").

Впровадження бортових мікропроцесорних систем моніторингу, які розраховують теплову модель ТЕД у реальному часі без застосування прямих фізичних датчиків температури всередині обмотки (алгоритми термомодельовання), є передовим словом у запобіганні аваріям на транспорті.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Розділ 1. Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів

1.1. Вимірювання температури у обмотках тягових електродвигунів при змін рівнів навантаження

Дослідження теплового режиму проведено на стенді.

Вимірювання температури обмоток, витрати, напору та швидкості охолоджуючого повітря виконані за методикою, викладеною в [11].

При проведенні експериментальних досліджень струм навантаження, швидкість обертання, витрата повітря, що охолоджує, підтримувалися постійними в кожному режимі роботи тягового двигуна і фіксувалися наступні параметри:

- температура закладених в обмотки двигуна термопар;
- струм та швидкість двигуна;
- температура повітря в зонах колектора та лобових частин обмотки якоря;
- температура повітря, що нагнітається, на виході з двигуна та навколишнього вимірювальні прилади;
- витрата та напір охолоджуючого повітря;
- час нагрівання двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08				
Зм.З	Лист	№ докум.	Підпис	Пі	Дата				
Розробив	Рева О.А.				Розділ 1	Літ.	Лист	Ар	Листів
Перевірів	Берідзе Т.М.							1414	10
Реценз.									
Н. Контр.	Берідзе Т.М.								
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЗЕЕМ-22			

1.2. Побудова графічних залежностей для теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при змін рівнів навантаження

Використовуючи отримані при цьому дані побудовані графічні залежності температури обмоток двигуна від часу нагрівання та охолодження у годинному та тривалому режимах роботи та заданих витратах повітря, що охолоджує.

Спочатку досліджено тепловий режим при природній вентиляції тягового двигуна.

Графіки, що відображають залежність від часу нагрівання та охолодження температури обмоток, будуть представлені на рисунках, а температури повітря у внутрішній порожнині двигуна показано на графічних залежностях.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

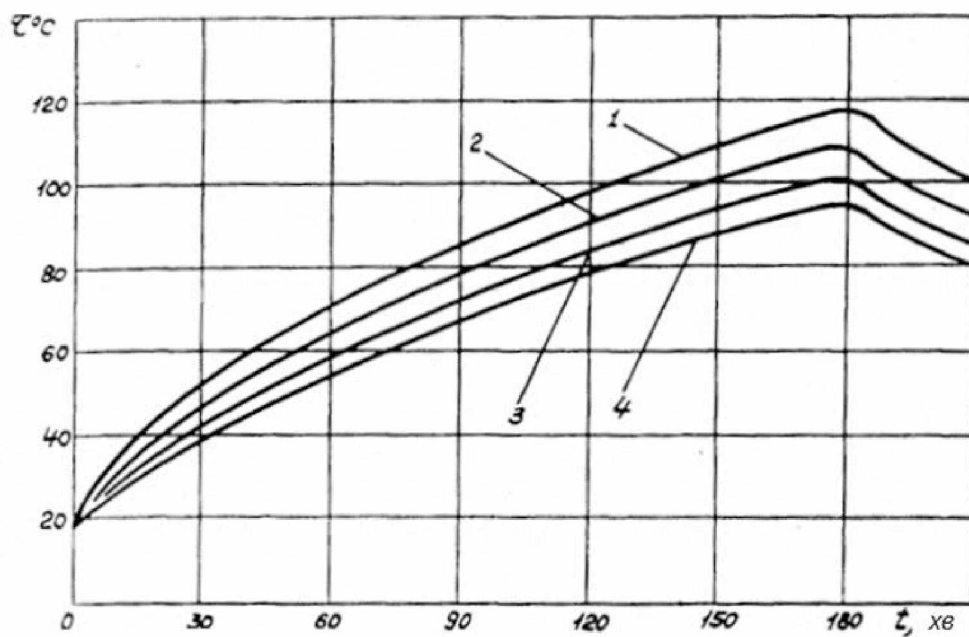


Рис. 1.1. Залежність температури двигуна від часу нагрівання та охолодження при $J=120A$, $n=750$ об/хв: 1 і 2 — зони, відповідно півників та лобових частин якірної обмотки; 3 - обмотка головних полюсів; 4 - обмотка додаткових полюсів

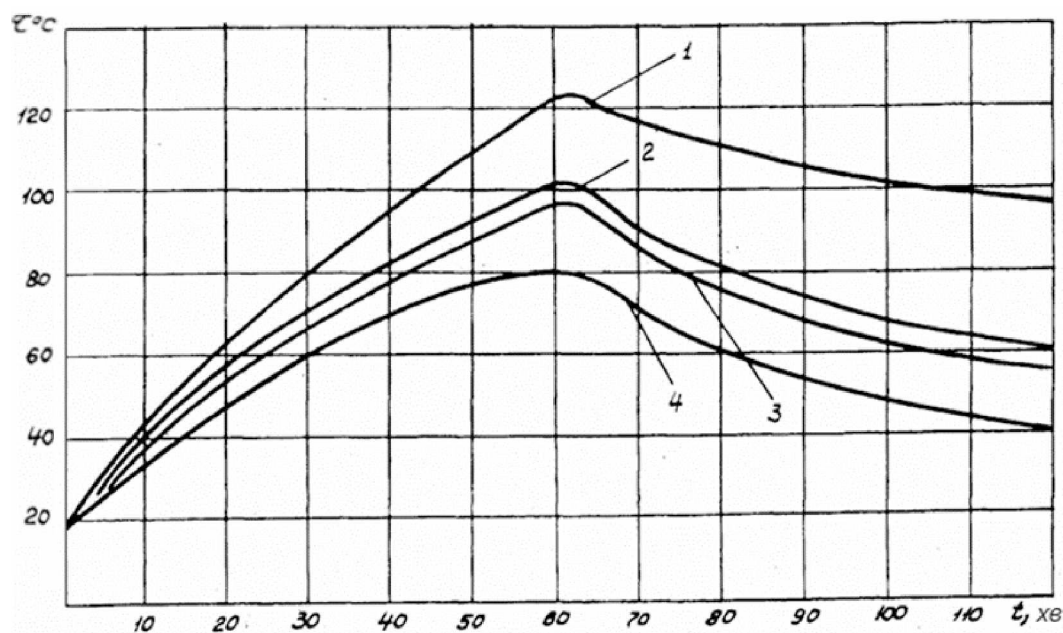


Рис. 1.2. Залежності температури якірної обмотки двигуна від часу нагрівання та охолодження: 1 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 0\text{ м / хв}$; 2 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 3\text{ м / хв}$; 3 - при $J=200\text{A}$, $n=1200\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 5\text{ м / хв}$

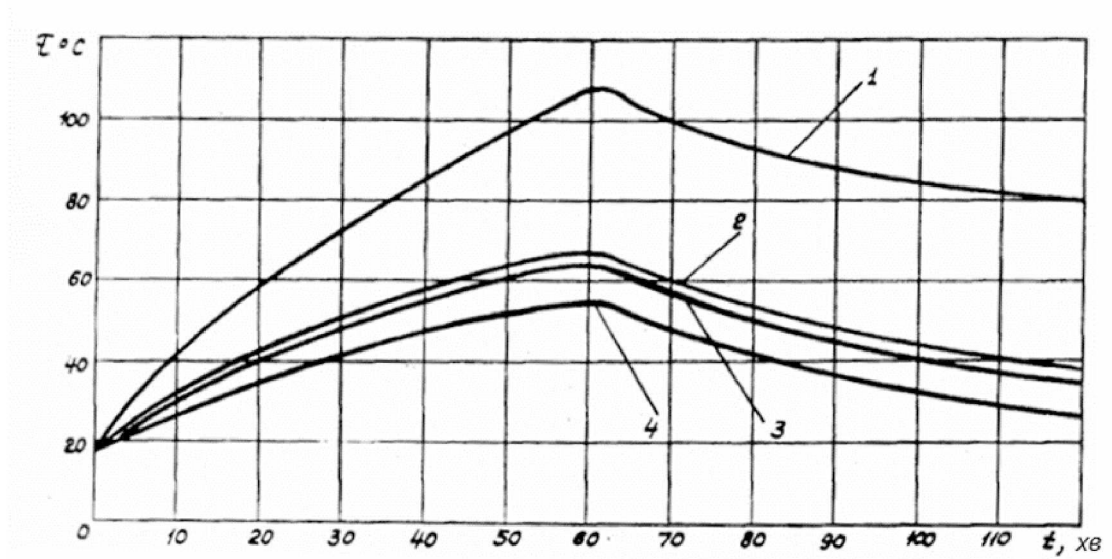


Рис. 1.3. Залежності температури обмотки основних полюсів тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 0\text{ м / хв}$; 2 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 3\text{ м / хв}$; 3 - при $J=200\text{A}$, $n=1200\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 5\text{ м / хв}$

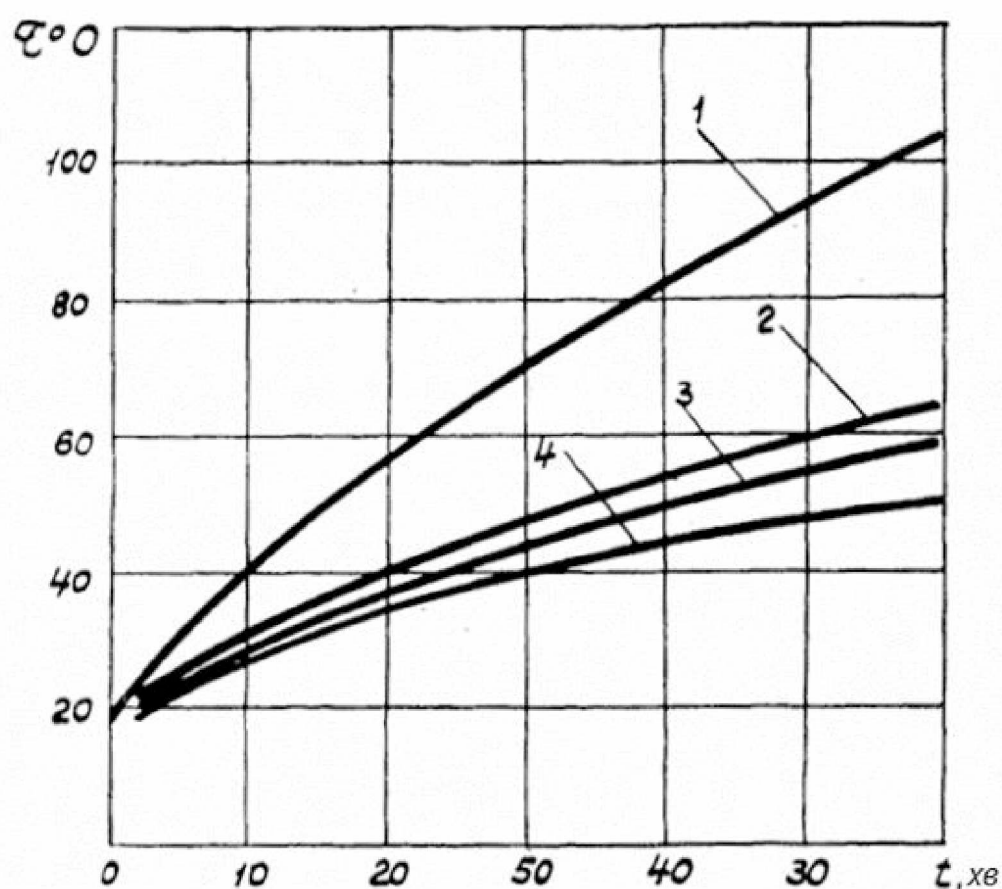


Рис. 1.4. Залежність температури обмотки додаткових полюсів тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 0\text{ м / хв}$; 2 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 3\text{ м / хв}$; 3 - при $J=200\text{A}$, $n=1200\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J = 200\text{A}$, $n = 1200\text{ об / хв}$, $Q = 5\text{ м / хв}$

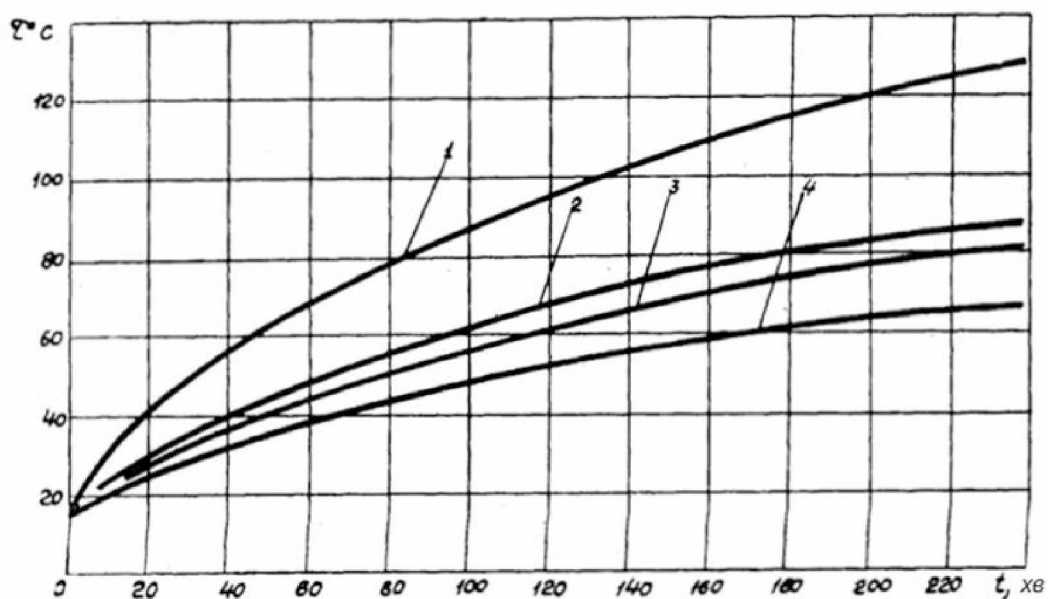


Рис. 1.5. Залежності температури обмотки якоря тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 120\text{A}$, $n = 750\text{ об/хв}$, $Q = 0\text{ м}^3/\text{хв}$; 2 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=3\text{ м}^3/\text{хв}$; 3 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=5\text{ м}^3/\text{хв}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08

Арк.

20

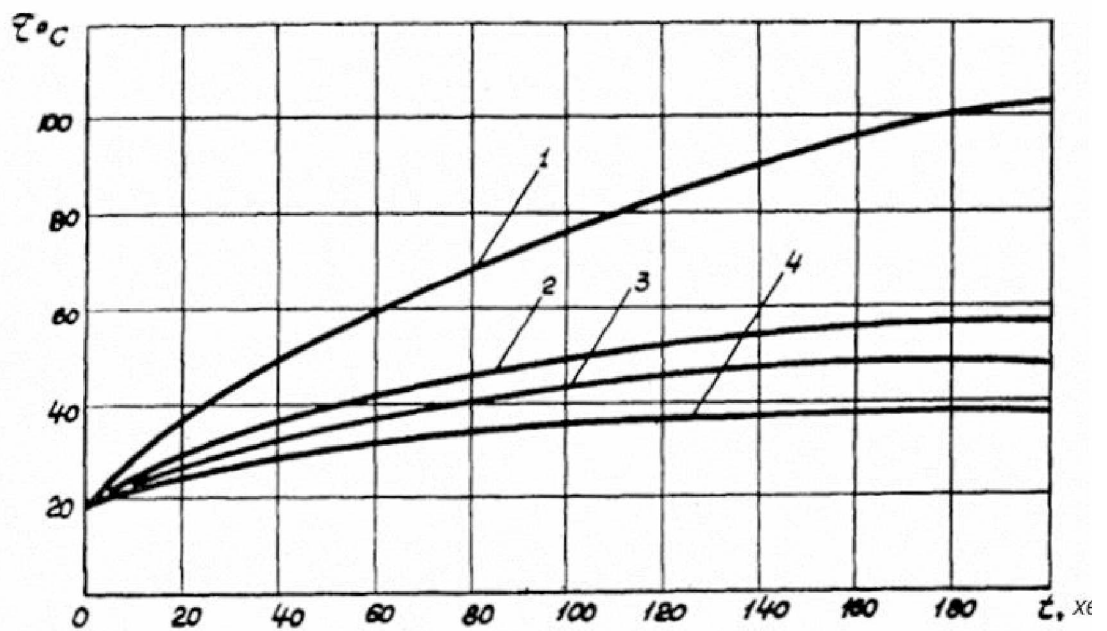


Рис. 1.6. Залежність температури обмотки збудження тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 120\text{A}$, $n = 750\text{ об / хв}$, $Q = 0\text{ м / хв}$; 2 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=3\text{ м}^3/\text{хв}$; 3 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=5\text{ м}^3/\text{хв}$

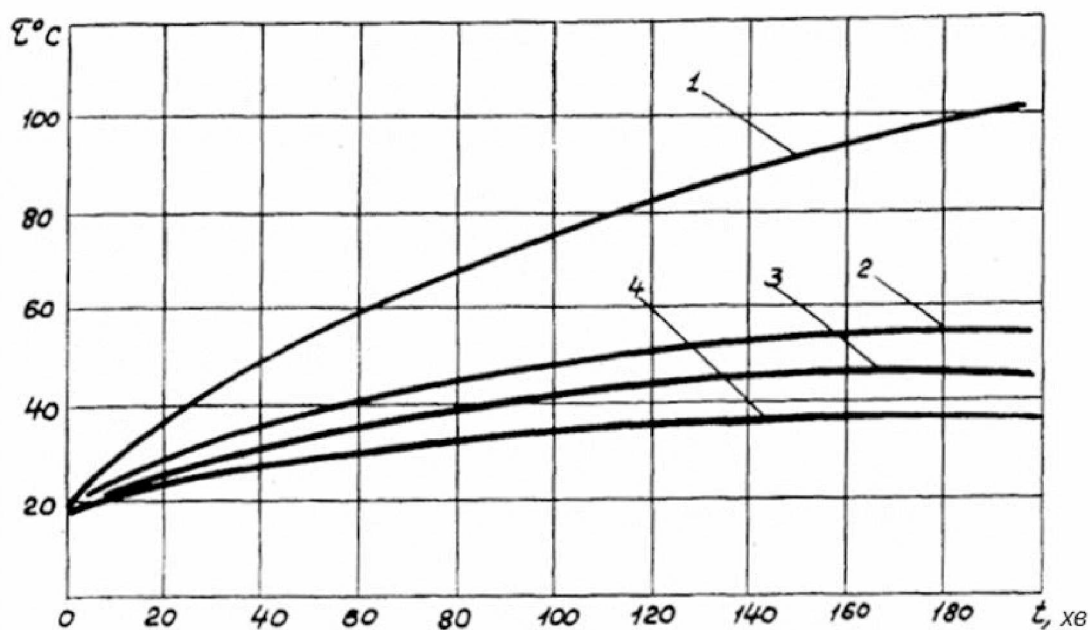


Рис. 1.7. Залежність температури обмотки додаткових полюсів тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 120\text{A}$, $n = 750\text{ об / хв}$, $Q = 0\text{ м / хв}$; 2 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=3\text{ м}^3/\text{хв}$; 3 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=5\text{ м}^3/\text{хв}$

Аналіз цих графіків показує таке:

- температура нагрівання обмоток якоря вище ніж обмоток головних та додаткових полюсів у годинному та тривалому режимах роботи на $15 \div 30^\circ\text{C}$;
- максимальна температура нагріву якірної обмотки в годинному режимі роботи за даними вимірювань 125°C , а з урахуванням перепаду температури на ізоляції становить $135\text{-}145^\circ\text{C}$;
- температура нагрівання обмотки якоря в зонах півнів та лобових частин має відповідно найбільше та найменше значення;

- розподіл температури за довжиною обмотки якоря має лінійний характер і перепад температур у тривалому режимі становить 8-10°C;
- перепад температур між повітрям у зонах колектора та лобових частин досягає у годинному режимі 30°C.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Дослідження теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження

2.1. Вимірювання температури у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження

Нерівність температур нагріву обмоток спричинена неоднаковими втратами та умовами охолодження.

Нерівномірність нагрівання обмотки якоря за довжиною двигуна має самі причини.

Відмінність умов тепловіддачі в розглянутих зонах обмотки якоря переважно пов'язані з підвищенням температури навколишнього повітря у бік від колектора до лобової частини обмотки.

Значний перепад температури повітря за довжиною обмотки якоря свідчить про недостатню циркуляцію повітря у внутрішній порожнині двигуна між зонами колектора та лобових частин обмотки якоря.

За даними заводу-виробника обмотка якоря тягових двигунів виконується з ізоляцією класу F, а обмотки головних та додаткових полюсів – класу H. Рекомендується при зазначених класах ізоляції приймати граничну температуру нагрівання для обмотки якоря 140 ° C, обмоток полюсів 165 ° C [12].

Запас по нагріванню обмотки якоря у годинному режимі становить лише 5 ÷ 10°C, а обмоток головних та додаткових полюсів 60°C.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив	Рева О.А.				Розділ 2	Літ.	Лист
Перевірив	Берідзе Т.М.						24
Реценз.							4
Н. Контр.	Берідзе Т.М.					КНУ ЗЕЕМ-22	
Затвердив	Пересунько І.І.						

2.2. Побудова графічних залежностей для теплових режимів у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження

Результати досліджень нагрівання та охолодження тягового двигуна при стохастичності змін рівнів навантаження представлені на рис. 2.1 - 2.2.

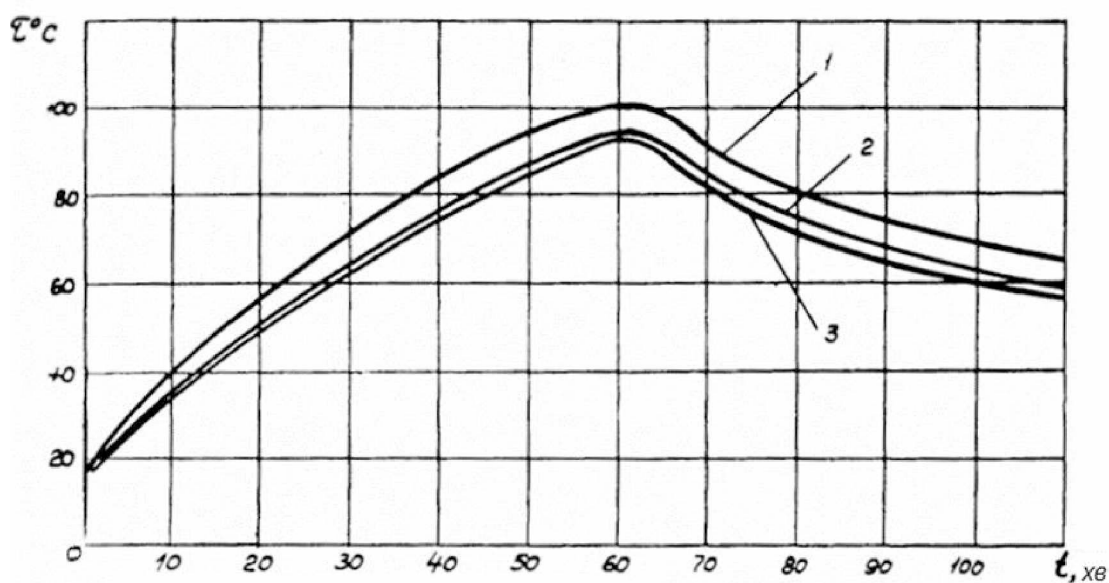


Рис. 2.1. Залежність температури обмотки якоря двигуна від часу нагріву, охолодження та площі отворів на виході вентиляційного потоку при $Q=4 \text{ м}^3/\text{хв}$: 1 - при $J=200\text{А}$, $n=1200 \text{ об/хв}$, $S=7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; 2 - при $J = 200\text{А}$, $n = 1200 \text{ об / хв}$, $S = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; 3 - при $J = 200\text{А}$, $n = 1200 \text{ об / хв}$, $S = 14,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

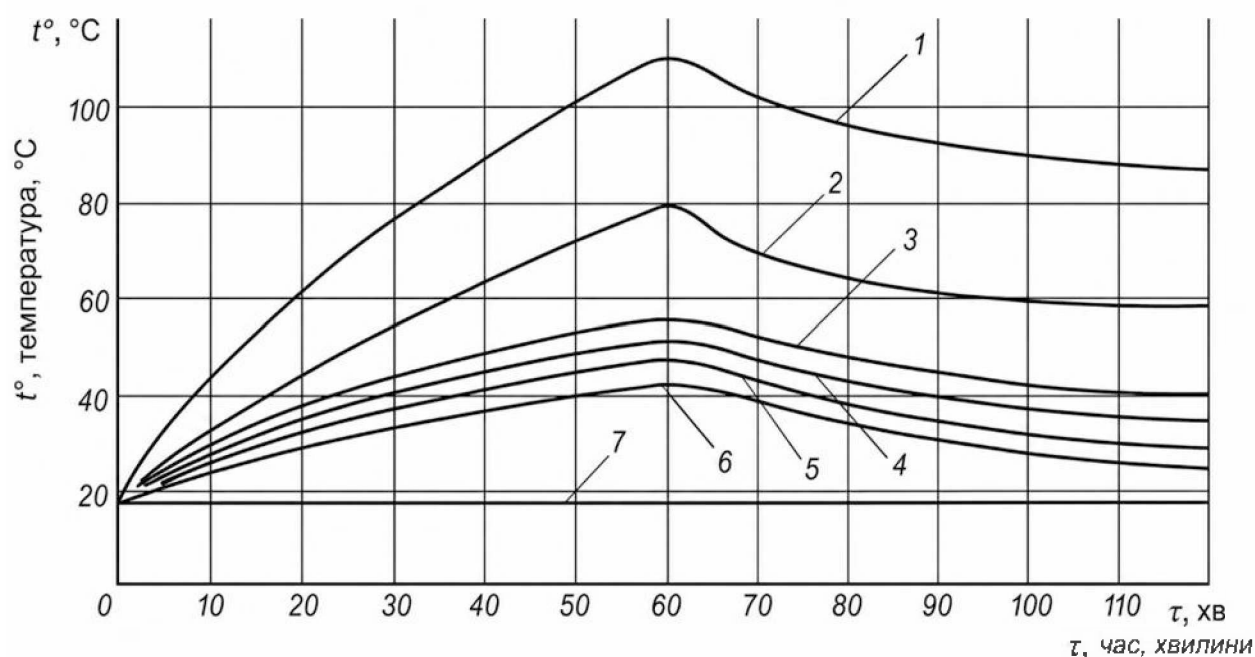


Рис. 2.2. Залежність температури повітря у внутрішній порожнині тягового двигуна від часу нагріву та охолодження при $J=200\text{A}$ та $n=1200$ об/хв: 1 — навколоколекторний простір при $Q=0$ м³/хв; 2 - в зоні розташування лобової частини обмотки якоря $Q = 0$ м / хв; 3 - навколоколекторний простір при $Q = 3$ м / хв; 4 - в зоні розташування лобових частин обмотки якоря $Q = 3$ м / хв; 5 - навколоколекторний простір при $Q = 5$ м / хв; 6 - в зоні лобових частин обмотки якоря при $Q = 5$ м / хв; 7 — температура повітря, що нагнітається при $Q=5$ м³/хв

Аналіз яких показує наступне:

- примусова вентиляція при витраті повітря, що охолоджує, 5 м³/хв дозволяє знизити температуру обмотки якоря на 45°C, а обмоток головних і додаткових полюсів на 50÷55°C.

- температура обмоток якоря, головних та додаткових полюсів при вентиляції з витратою 5 м³/хв і годинному навантаженні не перевищують відповідно 80°C, 55°C та 45°C;
- збільшення витрати охолоджуючого повітря призводить до перерозподілу температур нагріву обмоток по довжині двигуна і при витраті понад 5 м³/хв всі зони обмотки якоря мають однакову температуру;
- збільшення витрати повітря більше 5 м³/хв призводить до переміщення зони максимального нагріву в лобову частину обмотки якоря;
- запас нагріву обмотки якоря становить 55÷65°C, а обмоток головних і додаткових полюсів 90÷100°C у годинному режимі роботи.

Дослідження залежності необхідних напорів охолоджуючого повітря від заданих витрат показали, що при 6 вихідних отворах загальною площею 143 см напір в 20 кг/м² забезпечує витрату 5 м³ / хв.

З метою оцінки впливу аеродинамічного опору на нагрівання якірної обмотки проведено нагрівання та охолодження тягового двигуна з одночасним регулюванням площі вихідних отворів, рис. 2.1.

Встановлено, що найсприятливіші умови охолодження при повністю відкритих цих отворах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Розподіл температури у обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження

3.1. Розподіл температури обмотки по довжині якоря та обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження

Розподіл температури обмотки по довжині якоря та обмотках тягових електродвигунів при стохастичності змін рівнів навантаження представлено на рис. 3.1.

Дослідження швидкості руху охолоджуючого повітря показали:

- швидкість повітря міжполюсному просторі значно змінюється за висотою полюса;
- у міжполюсному просторі переважає аксіальна складова швидкості повітря, середнє значення якої 6,8 м/сек при витраті 5 м/хв.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат							
Розробив	Рєва О.А.				Розділ 3			Лім.	Лист	Листів	
Перевірів	Берідзе Т.М.									28	2
Реценз.								КНУ ЗЕЕМ-22			
Н. Контр.	Берідзе Т.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

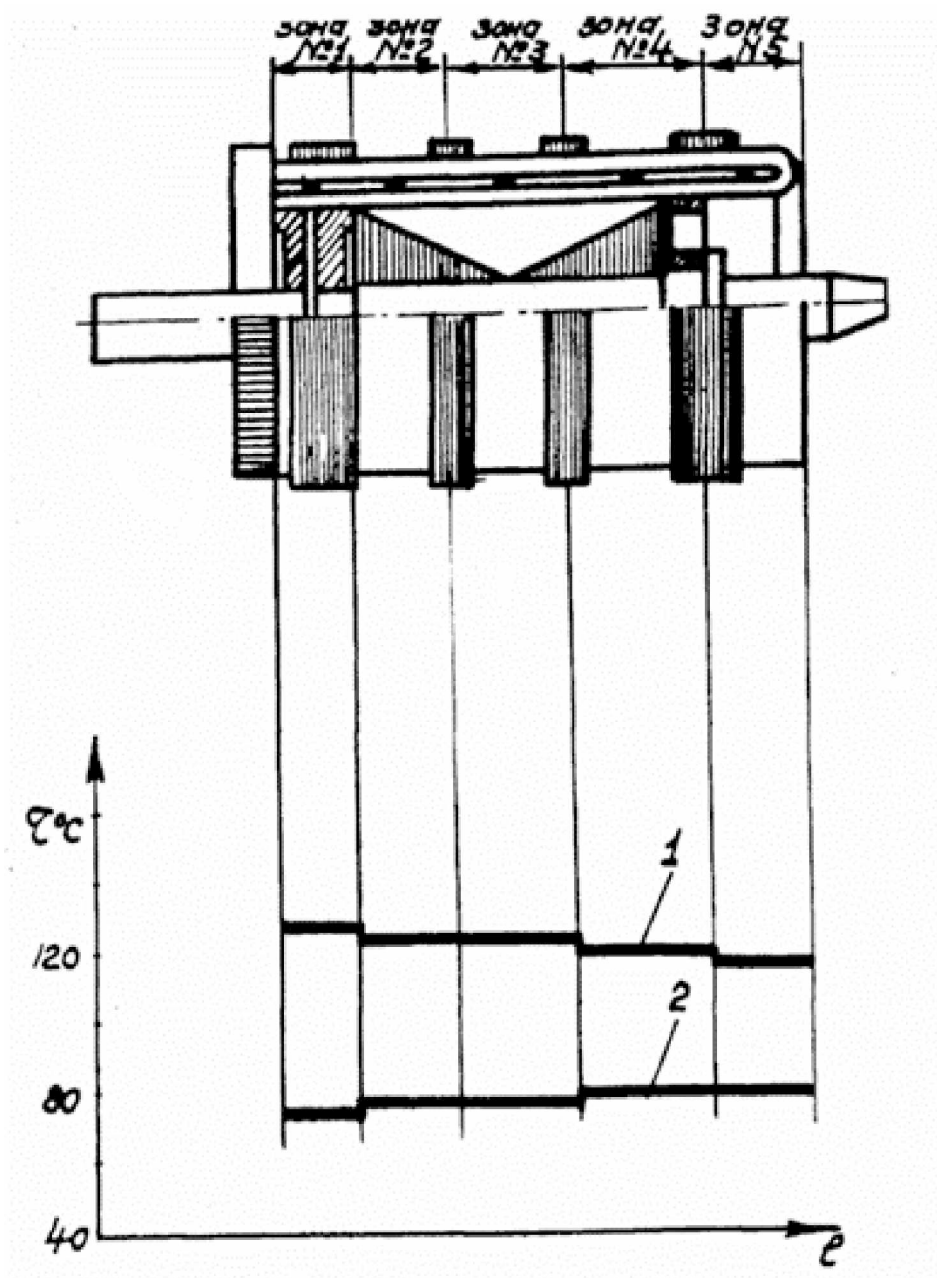


Рис. 3.1. Розподіл температури обмотки по довжині якоря: 1 - при $J = 200\text{A}$, $Q = 0\text{ м / хв}$; 2 - при $J=200\text{A}$, $Q=5\text{ м}^3/\text{хв}$

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Провести аналіз фізичної природи виділення теплоти (втрат енергії) в активних матеріалах тягових двигунів різних типів під час їх роботи на різних ділянках тягового циклу (розгін, вибіг, рекуперативне гальмування).

Проаналізувати специфіку формування електричних (джоулевих) втрат в обмотках якоря (статора) та збудження під час характерних режимів роботи локомотива (рушання з місця, розгін, рух на зтяжний підйом, вибіг).

Розробити еквівалентну теплову схему заміщення електродвигуна, що враховує теплоємність міді обмоток, сталі магнітопроводу та тепловий опір ізоляційних матеріалів.

Дослідити процеси теплопередачі між струмопровідними жилами, шарами корпусної ізоляції, магнітопроводом та охолоджувальним повітрям із урахуванням теплової інерції матеріалів.

Дослідити перехідні теплові процеси за допомогою диференціальних рівнянь теплового балансу при випадкових та детермінованих коливаннях струму навантаження.

Розробити динамічну теплову модель (еквівалентну теплову схему заміщення), яка дозволяє в режимі реального часу розраховувати температуру найбільш нагрітої точки обмотки на основі даних про поточний струм навантаження.

Оцінити вплив пікових температурних перевантажень на швидкість теплового старіння електроізоляційних матеріалів (за законом Арреніуса).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінити вплив короткочасних пікових перевантажень на накопичений термомеханічний знос ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості.

Запропонувати критерії вибору систем примусового охолодження (повітряного чи рідинного) залежно від класу нагрівостійкості ізоляції та очікуваної інтенсивності експлуатації.

Сформулювати рекомендації щодо оптимізації алгоритмів мікропроцесорного захисту тягового приводу, які б враховували не лише миттєві значення струму, але й теплову передісторію двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
2. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). Design of Rotating Electrical Machines (2nd ed.). John Wiley & Sons. (Contains extensive chapters on thermal analysis).
3. Mellor, P. H., Roberts, D., & Turner, D. R. (1991). Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 138(5), 205-218.
4. Staton, D. A., & Cavagnino, A. (2008). Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3509-3516.
5. Sciascera, C., Giangrande, P., Papini, L., Gerada, C., & Galea, M. (2017). Analytical thermal model for fast stator winding temperature prediction. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(8), 6116-6126.
6. Galea, M., Gerada, C., Rashed, M., & Bradley, K. J. (2012). A thermal improvement technique for the phase insulation of electrical machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 48(1), 79-87.
7. Kondo, K. (2010). Recent trend and future prospects of traction drives. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(4), 411-416.
8. Nerg, J., Rilla, M., & Pyrhonen, J. (2008). Thermal analysis of radial-flux electrical machines with a high power density. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3543-3554.

9. Simpson, N., Wrobel, R., & Mellor, P. H. (2013). Estimation of equivalent thermal parameters of impregnated electrical windings. IEEE Transactions on Industry Applications, 49(6), 2505-2515.
10. Wallmark, O., Lundko, H., & Bongiorno, M. (2012). Inverter temperature estimation for AC drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(1), 406-414. (Relevant context for drive systems).
11. Nategh, S., Huang, Z., Krings, A., Wallmark, O., & Leksell, M. (2013). Evaluation of stator and rotor lamination materials for thermal management of a PMaSRM. IEEE Transactions on Industry Applications, 49(5), 2054-2061.
12. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., & Mejuto, C. (2009). Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(3), 871-882.
13. Zhai, S., & Wu, X. (2018). Hazard identification and safety evaluation of mine power supply system based on fuzzy analytical hierarchy process. International Journal of Mining Science and Technology, 28(5), 821-827. (Background on extreme operation environments).
14. IEC 60034-1:2022. Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance. International Electrotechnical Commission.
15. IEEE Std 117-2015. IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery. IEEE Standards Association.
16. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., & Mejuto, C. (2009). Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(3), 871-882.
17. Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2014). Design of Rotating Electrical Machines (2nd ed.). Wiley.

18. Staton, D. A., & Cavagnino, A. (2008). Convective heat transfer and flow distribution in cooling channels of electrical machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3491-3499.
19. Mellor, P. H., Roberts, D., & Turner, D. R. (1991). Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 138(5), 205-218.
20. Yamazaki, K., & Seto, T. (2014). Thermal analysis of traction motors running under cyclic driving modes. IEEE Transactions on Magnetics, 50(11), 1-4.
21. Standard IEC 60034-1:2017. Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance. International Electrotechnical Commission.
22. Nategh, S., Wallmark, O., & Leksell, M. (2012). Thermal analysis of a permanent-magnet traction motor with forced cooling. IEEE Transactions on Energy Conversion, 27(2), 226-235.
23. Gerling, D., & Dajaku, G. (2014). Novel methods for reducing the thermal resistance of electric machines. IET Electric Power Applications, 8(8), 303-311.
24. Chin, Y. K., & Staton, D. A. (2005). Thermal analysis of traction motors. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems, 1, 484-489.
25. Sciascera, C., Giangrande, P., Papini, L., Gerada, C., & Galea, M. (2017). Analytical thermal model for fast stator winding temperature prediction. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(8), 6116-6126.
26. Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2014). Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair (2nd ed.). John Wiley & Sons.

27. Kulan, M. C., Baker, N. J., & Turvey, S. (2020). Transient thermal analysis of electric machine windings with consideration of encapsulation. IEEE Transactions on Industry Applications, 56(5), 4867-4876.

28. Milanfar, A., & Bakhshai, A. (2016). Real-time thermal condition monitoring of induction motor windings. IEEE Transactions on Power Electronics, 31(12), 8508-8518.

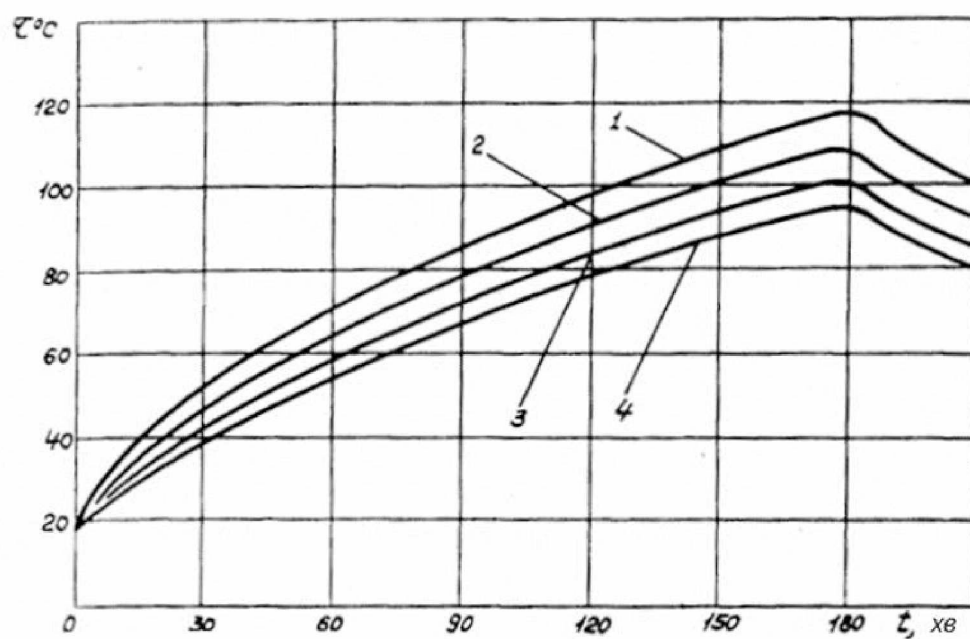
29. Steimel, A. (2012). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply. Oldenbourg Industrieverlag.

30. Simpson, N., Wrobel, R., & Mellor, P. H. (2013). Estimation of equivalent thermal parameters of impregnated electrical windings. IEEE Transactions on Industry Applications, 49(6), 2505-2515.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

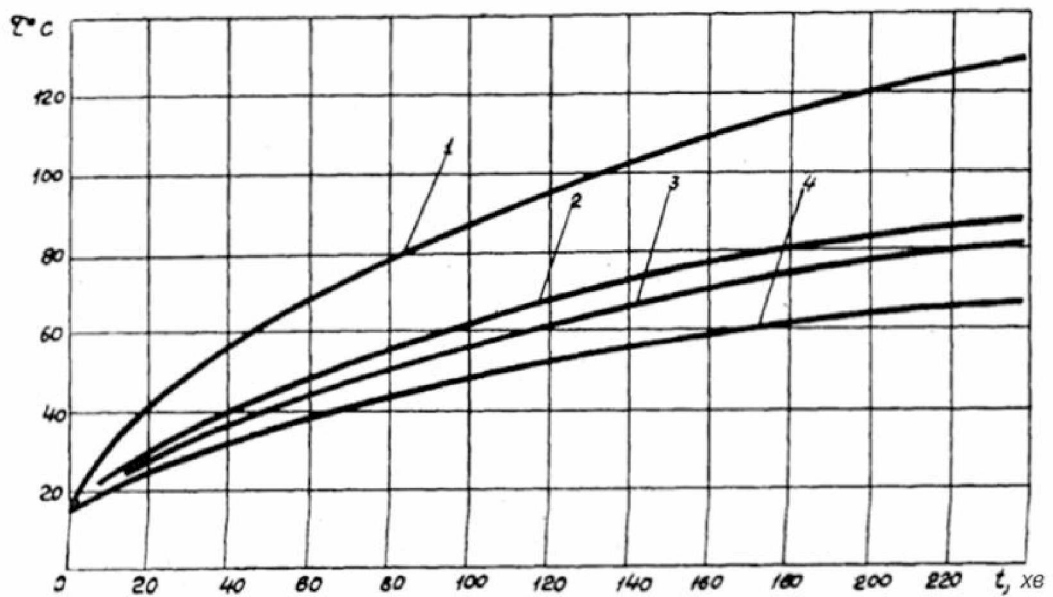
Додаток А

Залежність температури двигуна від часу нагрівання та охолодження при $J=120A$, $n=750$ об/хв: 1 і 2 — зони, відповідно півників та лобових частин якірної обмотки; 3 - обмотка головних полюсів; 4 - обмотка додаткових полюсів



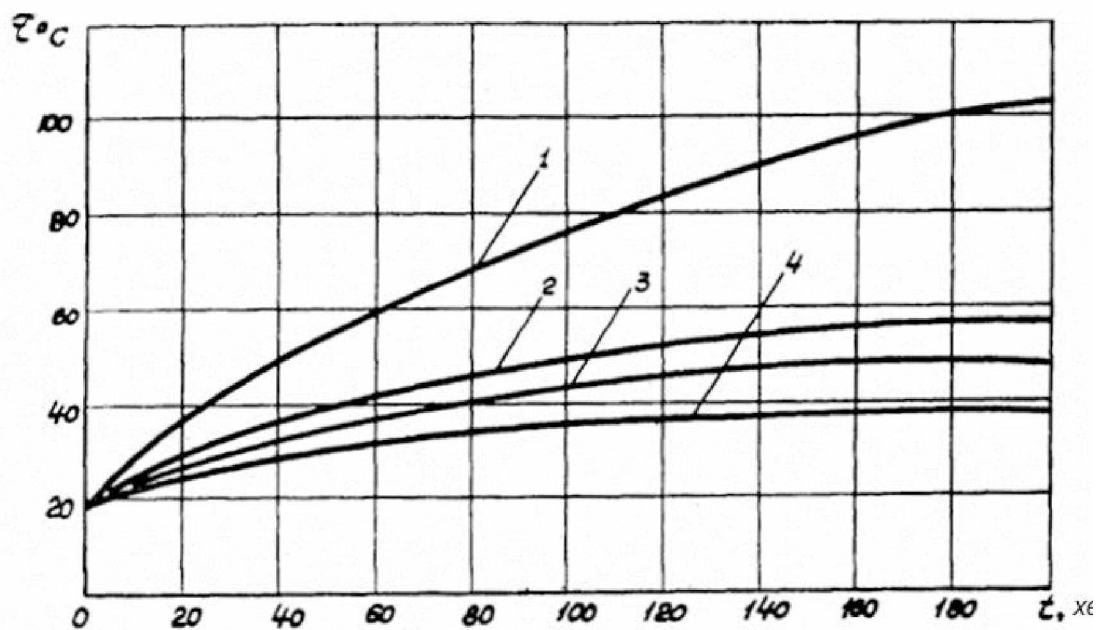
Додаток Б

Залежності температури обмотки якоря тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 120\text{А}$, $n = 750\text{ об/хв}$, $Q = 0\text{ м/хв}$; 2 - при $J=120\text{А}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=3\text{ м}^3/\text{хв}$; 3 - при $J=120\text{А}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J=120\text{А}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=5\text{ м}^3/\text{хв}$



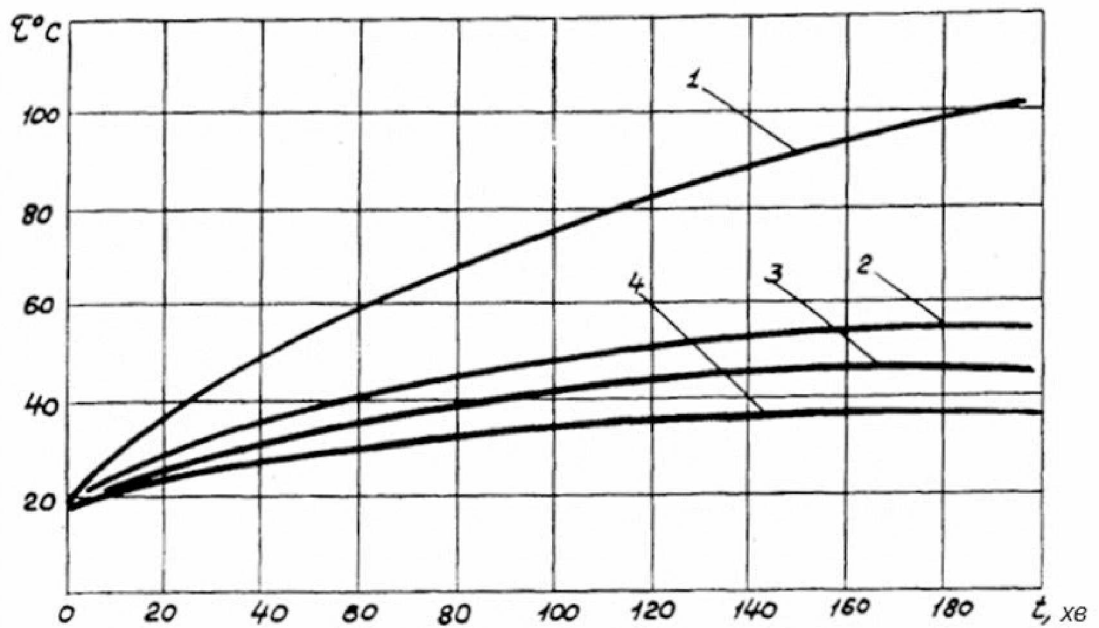
Додаток В

Залежність температури обмотки збудження тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 120\text{A}$, $n = 750\text{ об/хв}$, $Q = 0\text{ м/хв}$; 2 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=3\text{ м}^3/\text{хв}$; 3 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=4\text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J=120\text{A}$, $n=750\text{ об/хв}$, $Q=5\text{ м}^3/\text{хв}$



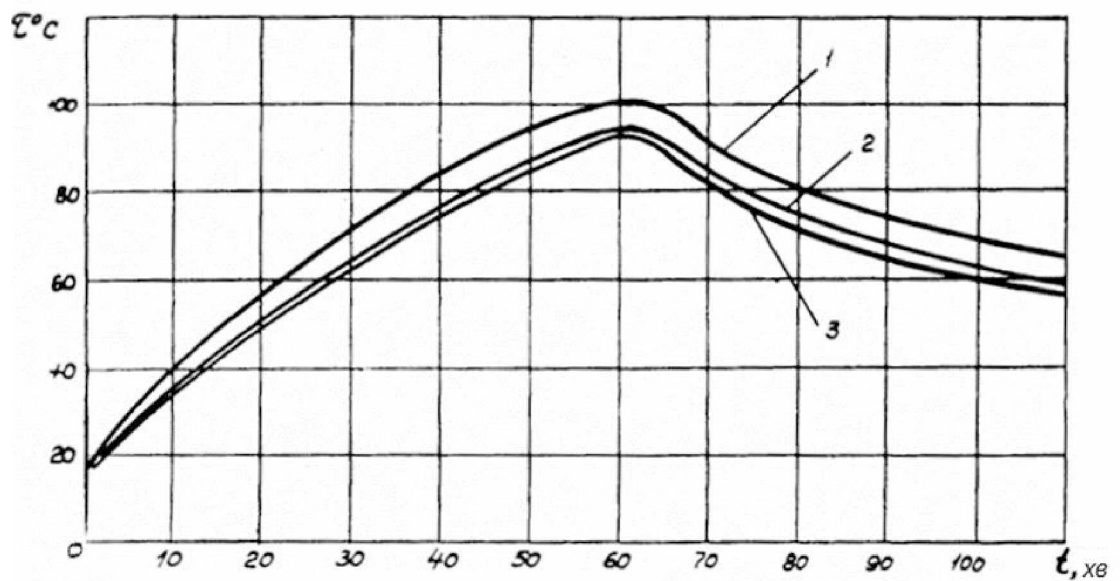
Додаток Г

Залежність температури обмотки додаткових полюсів тягового двигуна від часу нагрівання: 1 - при $J = 120\text{A}$, $n = 750 \text{ об / хв}$, $Q = 0 \text{ м / хв}$; 2 - при $J=120\text{A}$, $n=750 \text{ об/хв}$, $Q=3 \text{ м}^3/\text{хв}$; 3 - при $J=120\text{A}$, $n=750 \text{ об/хв}$, $Q=4 \text{ м}^3/\text{хв}$; 4 - при $J=120\text{A}$, $n=750 \text{ об/хв}$, $Q=5 \text{ м}^3/\text{хв}$



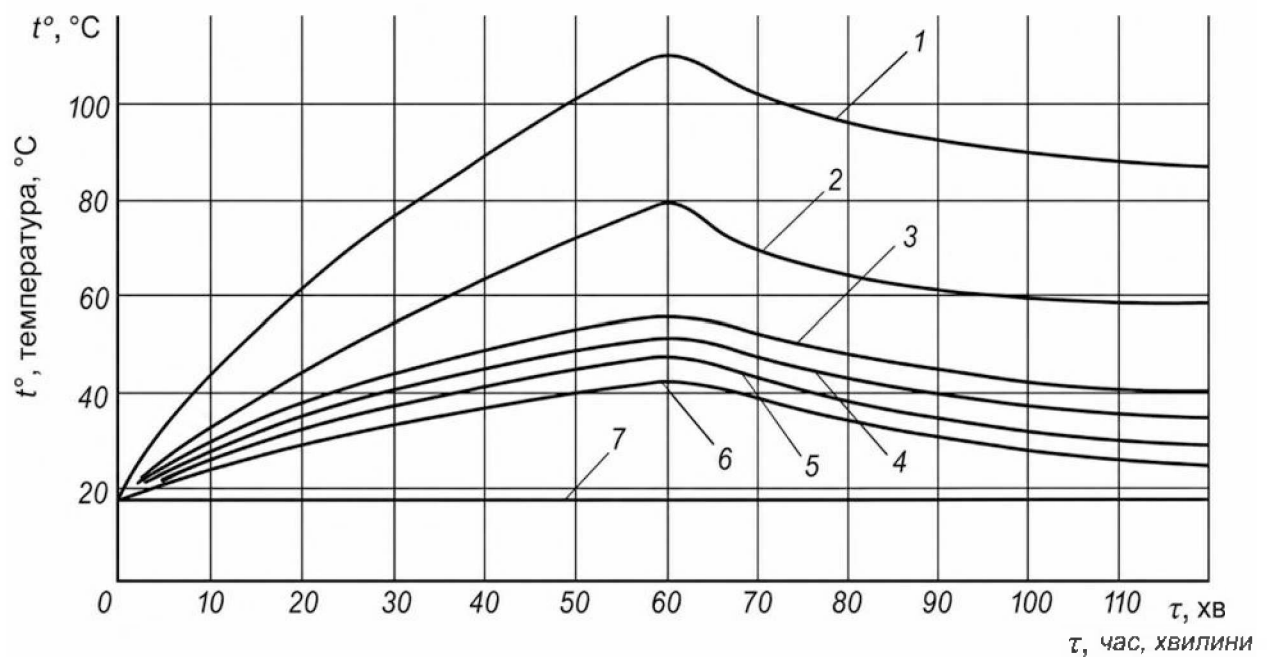
Додаток Д

Залежність температури обмотки якоря двигуна від часу нагріву, охолодження та площі отворів на виході вентиляційного потоку при $Q=4$ м³/хв: 1 - при $J=200$ А, $n=1200$ об/хв, $S=7,1 \cdot 10^{-3}$ м²; 2 - при $J = 200$ А, $n = 1200$ об / хв, $S = 11 \cdot 10^{-3}$ м²; 3 - при $J = 200$ А, $n = 1200$ об / хв, $S = 14,3 \cdot 10^{-3}$ м²



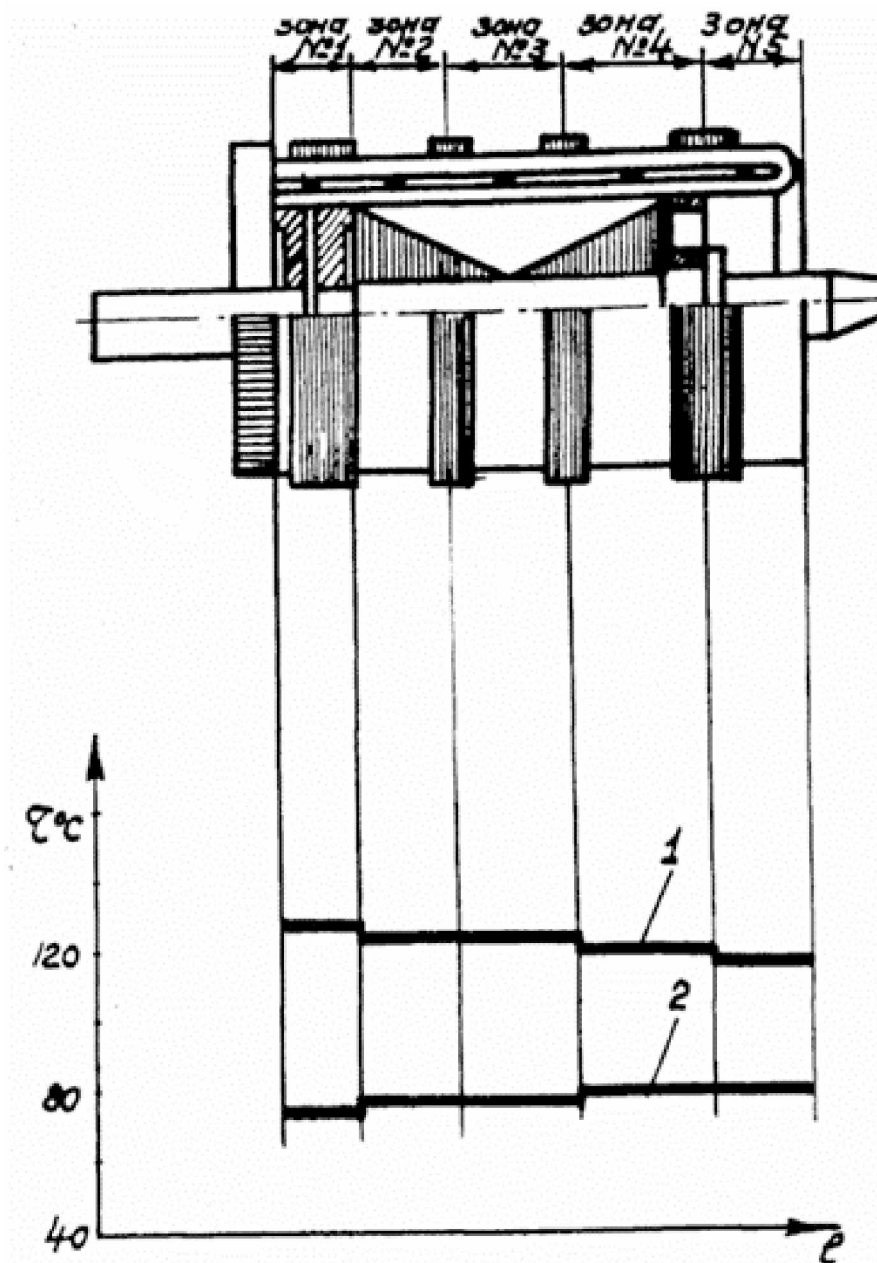
Додаток Е

Залежність температури повітря у внутрішній порожнині тягового двигуна від часу нагріву та охолодження при $J=200\text{A}$ та $n=1200$ об/хв: 1 — навколоколекторний простір при $Q=0$ м³/хв; 2 - в зоні розташування лобової частини обмотки якоря $Q = 0$ м / хв; 3 - навколоколекторний простір при $Q = 3$ м / хв; 4 - в зоні розташування лобових частин обмотки якоря $Q = 3$ м / хв; 5 - навколоколекторний простір при $Q = 5$ м / хв; 6 - в зоні лобових частин обмотки якоря при $Q = 5$ м / хв; 7 — температура повітря, що нагнітається при $Q=5$ м³/хв



Додаток Ж

Розподіл температури обмотки по довжині якоря: 1 - при $J = 200\text{A}$, $Q = 0\text{ м / хв}$; 2 - при $J=200\text{A}$, $Q=5\text{ м}^3/\text{хв}$



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-08

Арк.

42