

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ПЕТРЕНКО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.313.2

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ РІЗНИХ ЗАКОНАХ РЕГУЛЮВАННЯ
ТА ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України .

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Осташевський Микола Олександрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри електричних машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яковлев Олександр Іванович,
Національний аерокосмічний університет
ім. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,
професор кафедри електроустановок і двигунів
літальних апаратів

кандидат технічних наук
Ткаченко Андрій Олександрович,
Донбаська державна машинобудівна
академія (м. Краматорськ),
ст. викладач кафедри електромеханічні системи
автоматизації

Захист відбудеться «18» жовтня 2012 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «__» _____ 2012 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Робота частотно-керованих асинхронних двигунів регульованого електропривода характеризується суттєвими особливостями серед яких: широка зміна величини навантаження і частоти обертання, а також визвана цим зміна ефективності системи охолодження у випадку закритого виконання; зміна величини, форми і частоти напруги живлення, наявність вищих гармонік напруги (ВГН), струму і магнітного потоку і додаткових електричних і магнітних втрат; функціональний зв'язок частоти обертання, електромагнітного моменту та корисної потужності, що визначається законом регулювання. Усі ці особливості впливають на тепловий стан двигуна, при цьому вплив деяких факторів визначено не в повній мірі. Це перш за все відноситься до впливу додаткових втрат від вищих гармонік напруги при різних джерелах живлення в тривалих і повторно-короткочасних режимах і впливу законів регулювання на теплові характеристики двигунів. Актуальність аналізу теплового стану частотно-керованих асинхронних двигунів визнана необхідністю врахування перелічених факторів на стадії проектування, а також тим, що згідно даним експлуатації асинхронних двигунів 85 – 95 % причин втрати працездатності пов'язані з виходом з ладу обмотки статора внаслідок перевищення допустимого нагріву.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі електричних машин НТУ «ХП» за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань держбюджетних тем МОН України «Розробка науково - технічних умов для розвитку на базі новітніх комп'ютерних технологій об'єднаної системи проектування, математичного моделювання і дослідження електричних машин» (ДР № 10925002393) і «Розвиток теорії та методів проектування на основі чисельно – польових методів для вдосконалення наявних і створення нових електричних машин» (ДР № 0111U002269), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета роботи і задачі дисертації. Метою дисертаційної роботи є розробка науково-методичного і експериментального забезпечення прогнозування теплового стану частотно-керованих асинхронних двигунів при різних законах регулювання та джерелах живлення. Визначення на стадії проектування, а також в експлуатації теплових «запасів» і «ризиків» пов'язаних з забезпеченням працездатності частотно-керованих асинхронних двигунів.

Виходячи з мети, поставлені задачі:

– за рахунок визначення впливу насичення магнітної системи удосконалити методи розрахунку електромеханічних характеристик і отримати на цій основі «швидкісні» характеристики для визначення основних втрат при змінюванні магнітного потоку, частоти і величини напруги при різних законах регулювання;

– удосконалити методи розрахунку основних і додаткових електричних і магнітних втрат від вищих гармонік напруги з урахуванням нелінійності контуру намагнічування;

- розробити стаціонарні та динамічні математичні моделі теплового стану двигуна, які дозволять досліджувати температурні поля і теплові потоки при різних джерелах живлення, величинах навантаження, законах регулювання і отримати теплові характеристики елементів конструкції двигуна;

- дослідити вплив додаткових втрат від ВГН на теплові характеристики частотно-керованого асинхронного двигуна при різних законах регулювання;

- розробити алгоритм корекції величини допустимої по заданому тепловому стану корисної потужності, та дослідити нагрів двигуна при включенні і перемежуючому режимі S6;

- експериментально дослідити температурні поля і теплові характеристики двигуна при різних законах регулювання і різних джерелах живлення з метою установа адекватності розроблених математичних моделей теплового стану двигуна в стаціонарних і динамічних режимах.

Об'єктом дослідження є теплові процеси в асинхронному частотно-керованому двигуні в стаціонарних і динамічних режимах.

Предмет дослідження - електромеханічні, «швидкісні» і теплові характеристики асинхронного частотно-керованого двигуна при різних законах регулювання і джерелах живлення.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у роботі задач здійснювалось із використанням методів аналізу стаціонарних і динамічних теплових процесів в електричних машинах; метод «гармонійних двигунів», методи алгебри матриць, числові методи рішення системи диференціальних рівнянь використовувались при розрахунку основних та додаткових втрат від вищих гармонік напруги. Розрахунок температурного поля асинхронного частотно-керованого двигуна виконувався за допомогою метода скінчених елементів. Теоретичні дослідження проводились на серійних асинхронних двигунах АІР90LB4 і АІР160S4. Експериментальні дослідження проводились на серійному асинхронному двигуні АІР90LB4, в конструктивні вузли якого закладено 37 термодатчиків, що дозволило отримати об'єктивну картину температурного поля.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що для частотно-керованого асинхронного двигуна при різних законах регулювання і джерелах живлення:

- удосконалено методики розрахунку електромеханічних і «швидкісних» характеристик з урахуванням нелінійності контуру намагнічування Г-подібної схеми заміщення; методики розрахунку основних і додаткових від вищих гармонік напруги втрат потужності при широкому одночасному змінюванні магнітного потоку, частоти і величини напруги живлення;

- розроблені удосконалені математичні моделі теплового стану двигуна в стаціонарних і динамічних режимах, які дозволяють досліджувати температурні поля, теплові потоки і теплові характеристики, а також враховувати тип джерела живлення за рахунок зміни теплових опорів ротора;

- на основі розроблених еквівалентних теплових схем виконано подальший розвиток розрахункового та експериментального дослідження темпе-

ратурних полів частотно-керованих асинхронних двигунів при різних законах регулювання та типах джерел живлення;

– вперше досліджено вплив додаткових втрат від вищих гармонік напруги на теплові характеристики частотно-керованого асинхронного двигуна при різних законах регулювання та на характер зміни температур елементів конструкції двигуна у перемежуючому режимі S6;

– вперше розроблено алгоритм корекції допустимої по заданому тепловому стану корисної потужності при урахуванні додаткових втрат від вищих гармонік напруги.

Практичне значення отриманих результатів для електромашинобудування в обґрунтованості способу розрахунку важливих для експлуатації теплових характеристик частотно-керованих асинхронних двигунів, який базується на розроблених математичних моделях теплового стану. Запропоновано алгоритм корекції величини допустимої по заданому тепловому стану корисної потужності двигуна і алгоритм еквівалентування по нагріву режиму S6 тривалим режимом S1 при використанні двигунів з номінальним режимом S1 у повторно-короткочасних режимах. Рекомендовані зміни геометрії зубцевої зони ротора, як захід для зменшення додаткових електричних втрат в обмотці ротора, та поліпшення проектних розрахунків асинхронних двигунів.

Запропоновані розробки можуть бути використані як для проектуємих двигунів, так і для тих, що знаходяться в експлуатації, з метою прогнозування їх теплового стану.

Результати роботи впровадженні при проектуванні частотно-керованих асинхронних двигунів на заводі «Електроважмаш» (м. Харків), на заводі «ХЕЛЗ» Укрелектромаш» (м. Харків), в «СКБ Укрелектромаш» (м. Харків) і на заводі «Електромотор» (м. Полтава), а також в курсах лекцій в навчальному процесі НТУ «ХП» для спеціалістів і магістрів за спеціальністю «Електричні машини і апарати».

Особистий внесок здобувача. Всі положення і результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: постановка задачі удосконалення методик розрахунку електромагнітних характеристик шляхом урахування нелінійності контуру намагнічування, основних і додаткових втрат потужності від вищих гармонік напруги, розробка еквівалентних теплових схем і на їх основі математичних моделей теплового стану частотно - керованих двигунів, розрахункові та експериментальні дослідження температурних полів при різних законах регулювання і джерелах живлення; розроблення програми та проведення експериментальних досліджень теплового стану частотно – керованого асинхронного двигуна.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на: XVIII, XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я» (Харків, 2010, 2011 р.р.); Міжнародному симпозиумі: «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. SIEMA» (Харків, 2010 2011 р.р.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах». Наука, освіта і практи-

ка. (Кременчук, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Применение инновационных технологий в научных исследованиях» (Курськ, Росія, 2010 р.); семінарах Наукової Ради «Наукові основи електроенергетики. Електромагнітні та теплові процеси високовикористованих електричних машин» (Харків, 2010 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 12 наукових публікаціях, з них 10 статей у наукових фахових виданнях України.

Структура і склад дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, , списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 236 сторінок; з них 44 рисунків по тексту; 8 рисунків на 8 окремих сторінках; 58 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 101 найменування на 12 сторінках, 7 додатків на 79 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертаційної роботи обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета і задачі дослідження, подані наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

В першому розділі проведено аналіз можливостей, що відкриваються за рахунок використання керованих електроприводів, як ефективного засобу модернізації виробництва. Найбільш перспективними керованими електроприводами є електроприводи на базі частотно-керованих асинхронних двигунів. Працездатність таких двигунів, згідно з даними практики, суттєво залежить від їх теплового стану. Теплові процеси в асинхронних двигунах досліджені в роботах вітчизняних та закордонних вчених, але при цьому теплові процеси в частотно-керованих асинхронних двигунах досліджені недостатньо повно, так як їх тепловий стан, на відміну від нерегульованих асинхронних двигунів, визначається додатковими специфічними факторами: одночасною широкою зміною величини навантаження, магнітного потоку, напруги, частоти, які визначаються законом регулювання; формою напруги, яка визначається типом джерела живлення; наявністю додаткових електричних і магнітних втрат від вищих гармонік напруги. Наявність цих втрат змінює співвідношення поміж складовими гріючих втрат, що характерні для нерегульованих асинхронних двигунів, а це призводить до зміни структури температурного поля, зростанню нагріву елементів конструкції, зміни допустимої, з умов нагріву, корисної потужності. Ступінь впливу додаткових втрат на тепловий стан двигуна залежить від величини і характеру навантаження на валу, закону регулювання, величини коефіцієнта регулювання, типу джерела живлення.

Для об'єктивного прогнозування теплового стану частотно-керованих асинхронних двигунів в складі регульованих електроприводів визначені задачі дослідження.

У другому розділі удосконалена методика розрахунку основних і додаткових втрат асинхронного двигуна з урахуванням зміни магнітного потоку, частоти f_s , величини напруги живлення U_s , у відповідності до закону регулювання. Запропоновано удосконалену методику розрахунку електроне-

ханічних характеристик з урахуванням нелінійності контуру намагнічування Г- подібної схеми заміщення, зумовленою зміною магнітного потоку відповідно до закону регулювання. Для кожного із законів регулювання розрахована сукупність електромеханічних характеристик, на основі яких отримані «швидкісні» характеристики двигуна (залежності струмів статора і ротора, електромагнітного моменту, частоти обертання і всіх складових основних втрат від коефіцієнта регулювання при синусоїдальній формі напруги живлення). Значення основних втрат ΔP_d при законах регулювання (закони пропорційного $\gamma = \alpha$ і квадратичного $\gamma = \alpha^2$ регулювання, закон регулювання при постійній потужності $\gamma = \sqrt{\alpha}$, теж, але з обмеженою величиною напруги $\gamma = 1,0 = \text{const}$) наведені в табл. 1, де $\gamma = U_s / U_{sN}$, $\alpha = f_s / f_{sN}$.

Розрахунок вищих гармонік струму виконувався з використанням методу «гармонічних двигунів», при цьому зміна індуктивних і активних опорів обмоток при зміні частоти f_s враховувалась за допомогою коефіцієнтів Фільда.

Таблиця 1 – Основні та додаткові втрати потужності при різних законах регулювання

Регулювання «донизу» α , в.о.		1,0	0,9	0,7	0,5
$\gamma = \alpha$	ΔP_d , Вт	1916	1932	1866	1862
	ΔP_{adv} , Вт	331	308	268	221
$\gamma = \alpha^2$	ΔP_d , Вт	1916	1574	933	499
	ΔP_{adv} , Вт	331	250	131	55
Регулювання «вгору» α , в.о.		1,0	1,1	1,3	1,5
$\gamma = \sqrt{\alpha}$	ΔP_d , Вт	1916	1796	1645	1572
	ΔP_{adv} , Вт	331	314	293	276
$\gamma = 1,0 = \text{const}$	ΔP_d , Вт	1916	1845	1995	2090
	ΔP_{adv} , Вт	331	286	225	184

Для вищих гармонік $f_v = f_{sN} \cdot v \cdot \alpha$, де $v = 6K \pm 1$, $K = 1, 2, 3$, значення коефіцієнтів Фільда для активних та реактивних складових опорів обмотки ротора дорівнює: $K_{rv} = 4,185 \dots 12,144$, $K_{xv} = 0,443 \dots 0,285$. Значення додаткових втрат від вищих гармонік напруги ΔP_{adv} наведені в таблиці 1. Встановлено, що додаткові втрати ΔP_{adv} залежать від закону і коефіцієнту регулювання і не залежить від навантаження двигуна.

Зважаючи на значний вплив додаткових електричних втрат в обмотці ротора P_{elrv} на тепловий стан двигуна, запропоновані зміни геометрії зубцевої зони ротора з метою зменшення впливу ефекту витиснення струму у стрижнях обмотки ротора. Виконані розрахунки для двигуна АІР160S4 підтвердили очікуваний ефект від зміни геометрії зубцевої зони ротора. Втрати P_{elrv} зменшені на 29,2 % в порівнянні з втратами при звичайній зубцевій зо-

ні.

У третьому розділі на основі методу еквівалентних теплових схем розроблені стаціонарна і динамічна ЕТС, адаптовані до умов роботи частотно-керованих асинхронних двигунів виконання IP44, IC0141. Структура ЕТС розвинута в аксіальному та радіальному напрямках до 16 вузлів.

На рис. 1 зображена динамічна ЕТС. Стаціонарна ЕТС відрізняється відсутністю теплоємностей.

Всі конвективні теплові опори визначались для усього діапазону регулювання частоти обертання. Для усіх вузлів ЕТС складені рівняння теплового балансу. Система цих рівнянь є математичною моделлю теплового стану частотно-керованого асинхронного двигуна в стаціонарних режимах. У матричному виді система рівнянь має вид:

$$\lambda \cdot \Theta + P = 0, \quad (1)$$

де λ – квадратна симетрична матриця (16×16) взаємних і власних теплових провідностей; Θ – матриця-стовпець невідомих температур; P – матриця-стовпець втрат потужностей в вузлах.

На основі математичної моделі вирішувались наступні завдання: дослідження температурного поля і теплових потоків двигуна АИР160S4 при ступінчастій (режим А) і синусоїдальній (режим Б) формах напруги при різних законах регулювання і величинах навантаження. Режим А має місце при живленні двигуна від напівпровідникового перетворювача частоти з автономним інвертором (ППЧ з АІН). Встановлено, що виникнення додаткових втрат в режимі А змінює величини і співвідношення між потужністю тепло-виділення вузлів ЕТС і теплових провідностей ротора у зрівнянні з режимом Б. В таблиці 2 приведені відношення температур вузлів в режимах А і Б при $\gamma = \alpha = 1,0$ (номінальний режим навантаження).

Таблиця 2 – Відношення температур вузлів ЕТС в режимах А і Б ($\gamma = \alpha = 1,0$, $M = M_N$)

№ вузла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Theta_{iA} / \Theta_{iB}$	1,04	1,07	1,06	1,1	1,1	1,08	1,1	1,11	1,11	1,12	1,12

Продовження таблиці 2

№ вузла	12	13	14	15	16
$\Theta_{iA} / \Theta_{iB}$	1,1	1,1	1,22	1,24	1,23

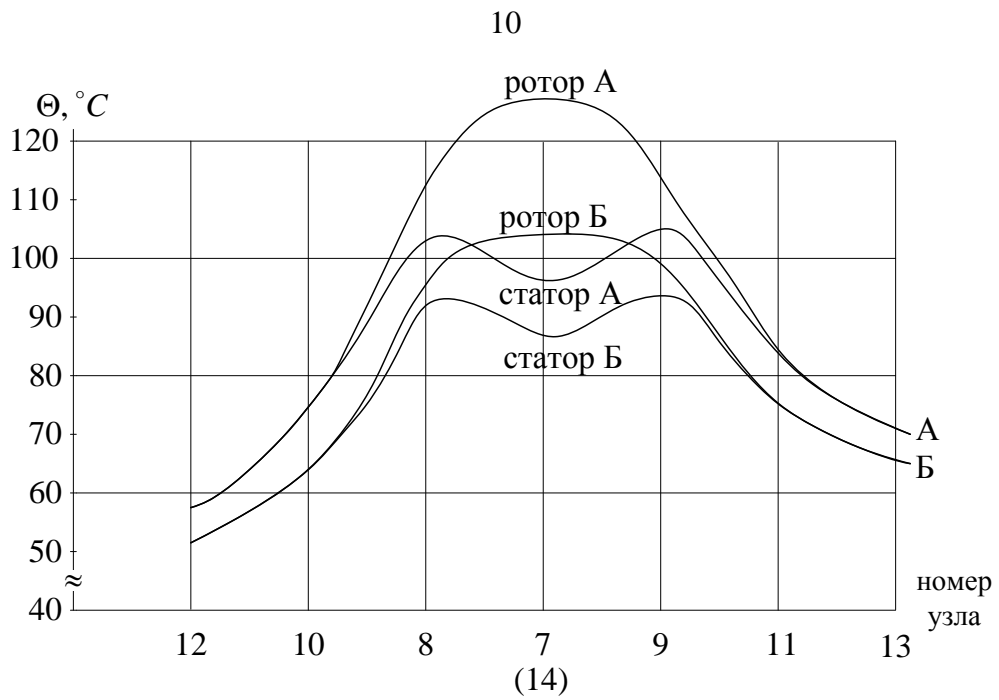


Рисунок 2 – Розподіл температури вздовж вузлів ЕТС в аксіальному напрямку А – режим А, Б – режим Б, $P = 1,0 \cdot P_N$, $\gamma = \alpha = 1,0$

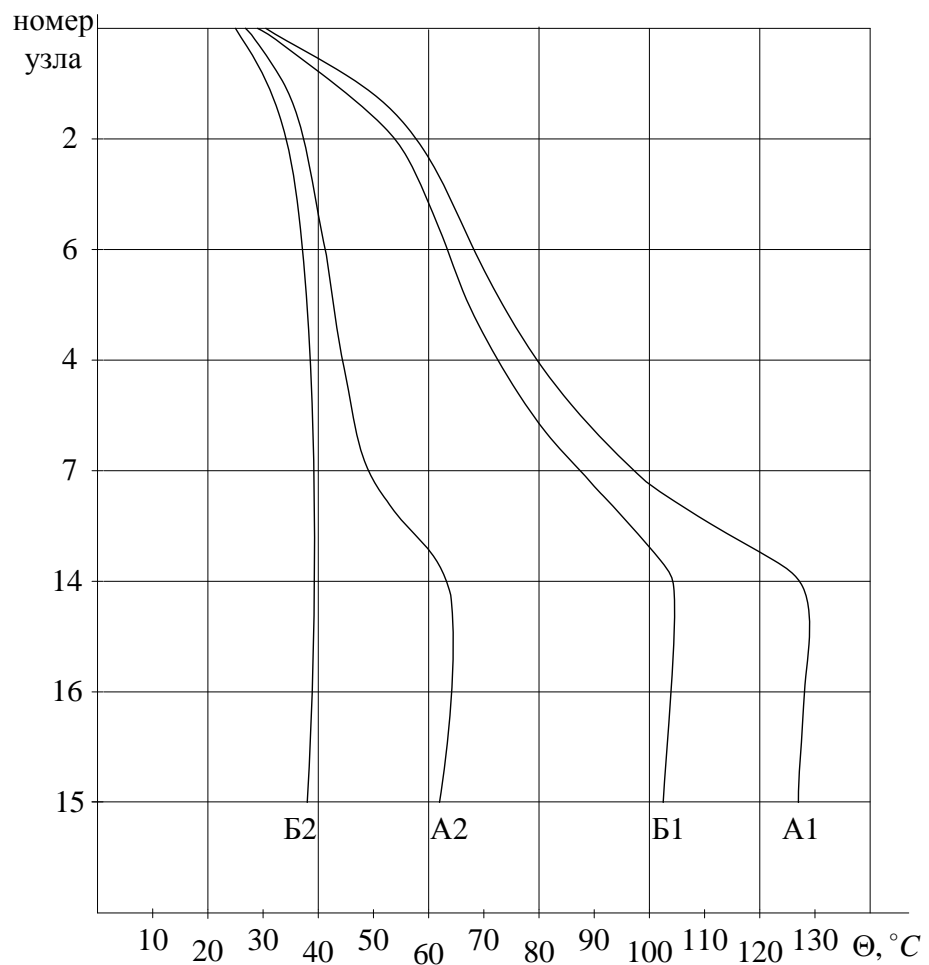


Рисунок 3 – Розподіл температури вздовж вузлів ЕТС в радіальному напрямку А – режим А, Б – режим Б, А₁, Б₁ – $P = 1,0 \cdot P_N$, $\gamma = \alpha = 1,0$, А₂, Б₂ – $P = 0,25 \cdot P_N$, $\gamma = \alpha = 1,0$

Результати таблиці 2 характеризують вплив додаткових втрат від вищих гармонік напруги на тепловий стан окремих елементів конструкції двигуна. Найбільш суттєвим цей вплив є для обмотки та осердя ротора. Структура температурного поля двигуна може бути відображена за допомогою аксіального і радіального розподілу температур вздовж вузлів ЕТС, які представлені на рис. 2, 3.

Встановлено суттєвий вплив величини навантаження та додаткових втрат від вищих гармонік напруги на характер кривих розподілу температур. Форма кривих розподілу в аксіальному напрямку сідлоподібна для обмотки статора та дзвіноподібна для ротора, який має вентиляційні лопатки.

За результатами розрахунку температурного поля визначені внутрішні і зовнішні теплові потоки і теплові характеристики. Теплові характеристики $\Theta_i = f(\alpha)$ отримані для усіх 16 елементів конструкції двигуна при усіх розглянутих законах регулювання. Ці характеристики відображають зміну теплового стану двигуна в процесі регулювання і частково представлені на рис. 4, 5.

Аналіз теплових характеристик дозволив отримати кількісні оцінки впливу закону регулювання на тепловий стан двигуна. В таблиці 3 показані середні по двигуну температури у відсотках до температури у номінальному режимі ($\Theta_{cpN} \% = 100\%$ при $\gamma = \alpha = 1,0$) на межах діапазону регулювання.

Таблиця 3 – Середні по двигуну температури у відсотках до Θ_{cpN}° на межах діапазону регулювання

Закон \ α	0,5	Закон \ α	1,5	Режим А
$\gamma = \alpha$	129,6 %	$\gamma = \sqrt{\alpha}$	71,4 %	
$\gamma = \alpha^2$	53,3 %	$\gamma = 1,0, P = \text{const}$	83,1 %	

Ступінь впливу додаткових втрат ΔP_{adv} на тепловий стан при різних законах регулювання оцінювався по різниці температур елементів конструкції у режимах А і Б. Для обмоток статора (вузол 7) і ротора (вузол 14) значення різниці $\Delta\Theta_i = \Theta_{iA} - \Theta_{iB}$ на межах діапазону регулювання наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Різниці температур обмоток статора і ротора у режимах А і Б на межах діапазону регулювання в $^\circ\text{C}$

Закон \ α	0,5	Закон \ α	1,5
$\gamma = \alpha$	$\Delta\Theta_{14} = 33,4^\circ$	$\gamma = \sqrt{\alpha}$	$\Delta\Theta_{14} = 16,6^\circ$
	$\Delta\Theta_7 = 12,5^\circ$		$\Delta\Theta_7 = 7,1^\circ$
$\gamma = \alpha^2$	$\Delta\Theta_{14} = 5,4^\circ$	$\gamma = 1,0, P = \text{const}$	$\Delta\Theta_{14} = 11,2^\circ$
	$\Delta\Theta_7 = 2,6^\circ$		$\Delta\Theta_7 = 4,8^\circ$

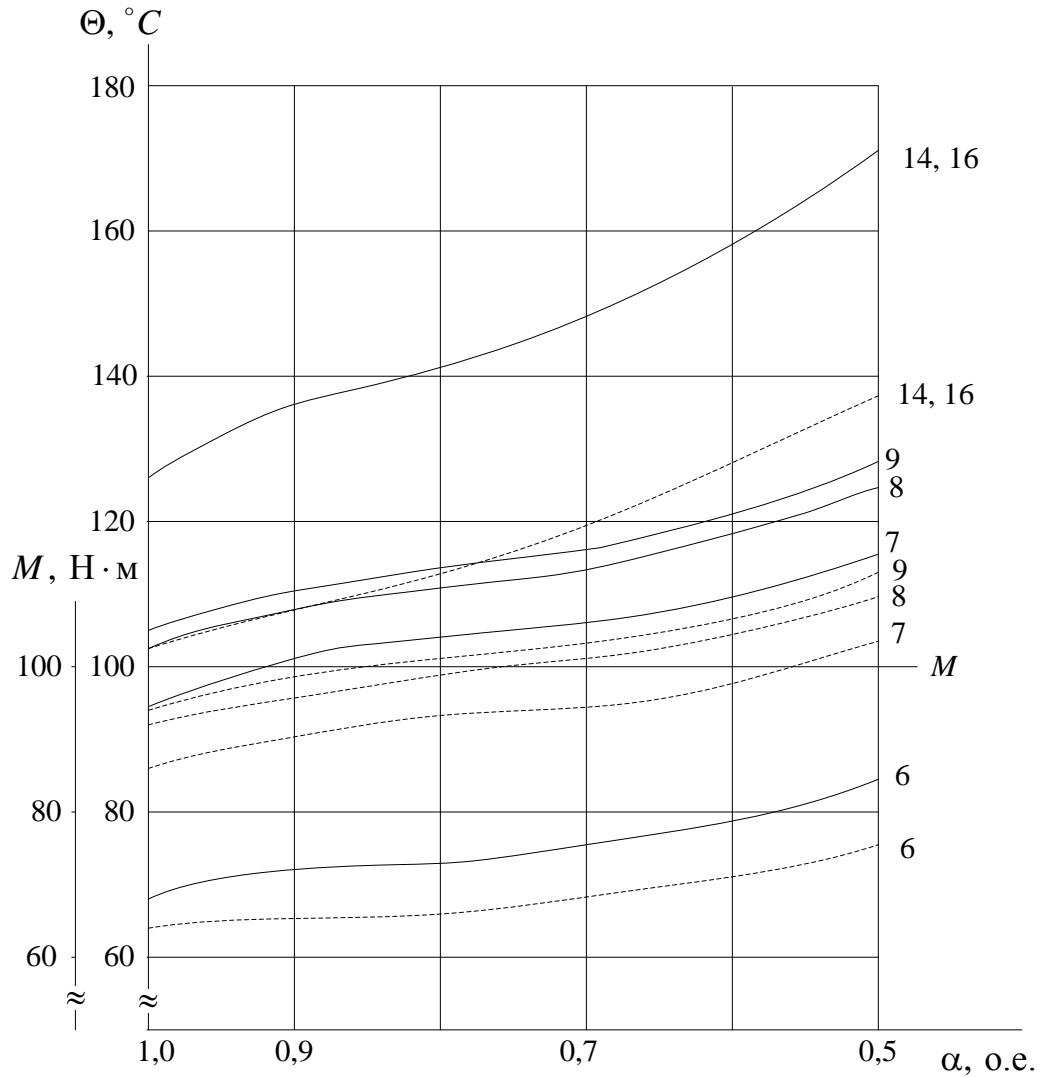


Рисунок 4 – Теплові характеристики обмоток і осердя для закону $\gamma = \alpha$,
 — Режим А; - - - - - Режим Б

З урахуванням ускладнення теплового стану двигуна в режимі А запропоновано алгоритм визначення допустимої по заданому тепловому стану корисної потужності двигуна при урахуванні впливу додаткових втрат.

На основі динамічної ЕТС (рис. 1) розроблена математична модель теплового стану двигуна в динамічних режимах. В матричному виді система диференціальних рівнянь теплового балансу має вигляд

$$C \frac{d\Theta}{dt} = \lambda \cdot \Theta + P, \quad (2)$$

де C – теплоємності вузлів, t – час.

Досліджено процес нагріву при включенні двигуна АИР160S4 до виходу на сталий режим і нагрів двигуна у перемежаючому режимі S6. Система (2) вирішувалась гібридно-універсальним методом Adams BDF. Криві нагріву обмоток статора і ротора приведені на рис. 6, 7.

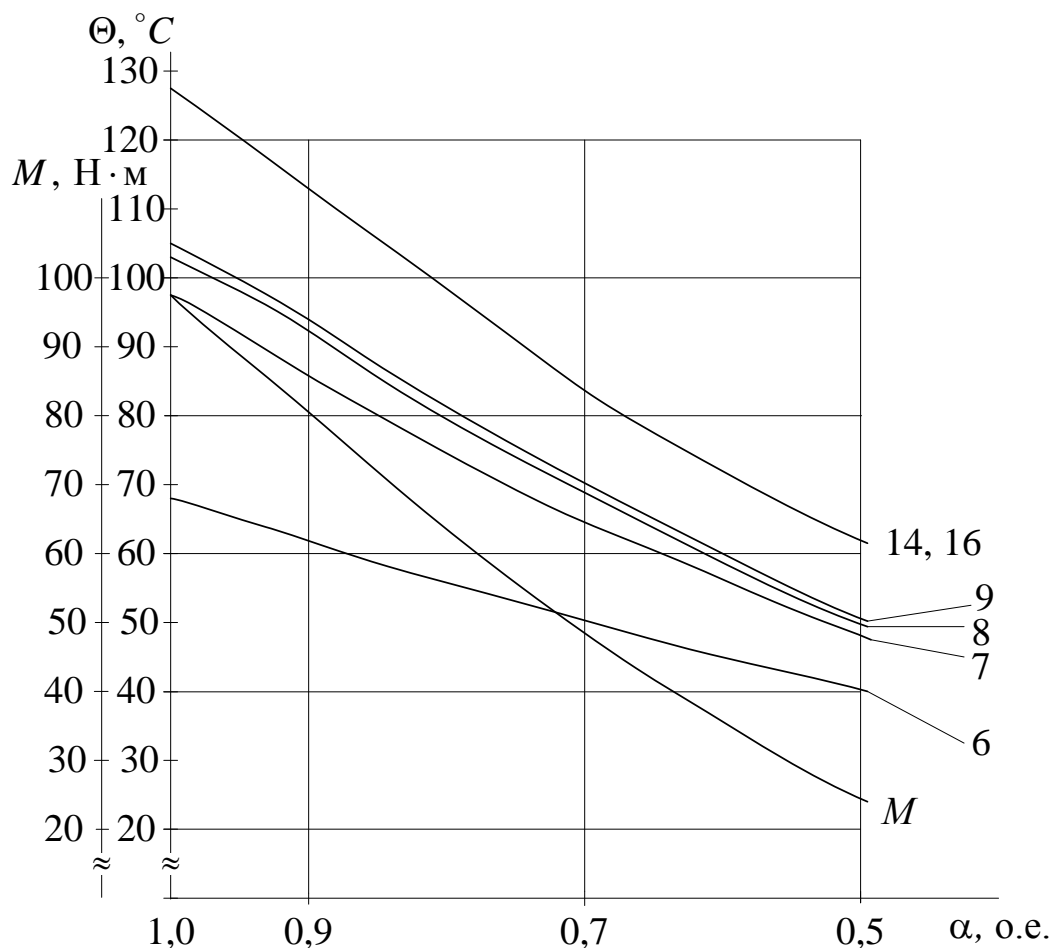


Рисунок 5 – Теплові характеристики обмоток і осердя для закону $\gamma = \sqrt{\alpha}$. Режим А

Запропоновано алгоритм еквівалентування по нагріву режиму S6 тривалим режимом S1 на основі розроблених методик і математичних моделей, що дозволяє оптимізувати використання по потужності двигунів з номінальним режимом S1 при їх роботі у режимі S6, а також інших повторно-короткочасних режимах.

На основі методу скінчених елементів виконано порівняльне дослідження температурного поля у стаціонарному режимі асинхронного частотно-керованого двигуна АИР160S4 при різних джерелах живлення (режими А і Б) і різних законах регулювання. Дослідження проводились на основі програми FEMM. Геометрична модель відповідає поперечному перерізу двигуна на середині довжини осердя статора. Об'ємні густини джерел тепла визначалися на основі основних втрат двигуна і додаткових від вищих гармонік втрат. Граничні умови включають значення температур внутрішнього повітря в повітряному проміжку і охолоджуючого повітря в поміжреберних каналах і коефіцієнти тепловіддачі з поверхні ротора і оребреного корпусу. Для всіх досліджуваних режимів граничні умови формувалися на основі результатів розрахунку методом ЕТС.

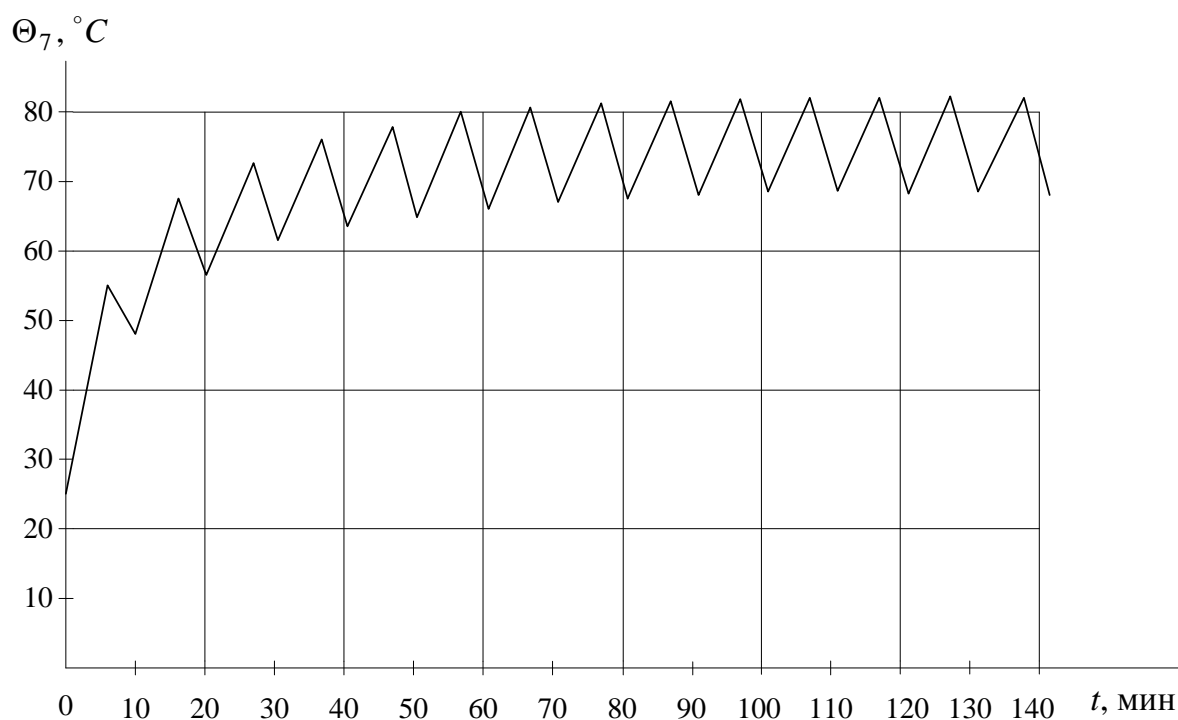


Рисунок 6 – Залежність температури обмотки статора від часу для закону $\gamma = \alpha = 1,0$. Режим А

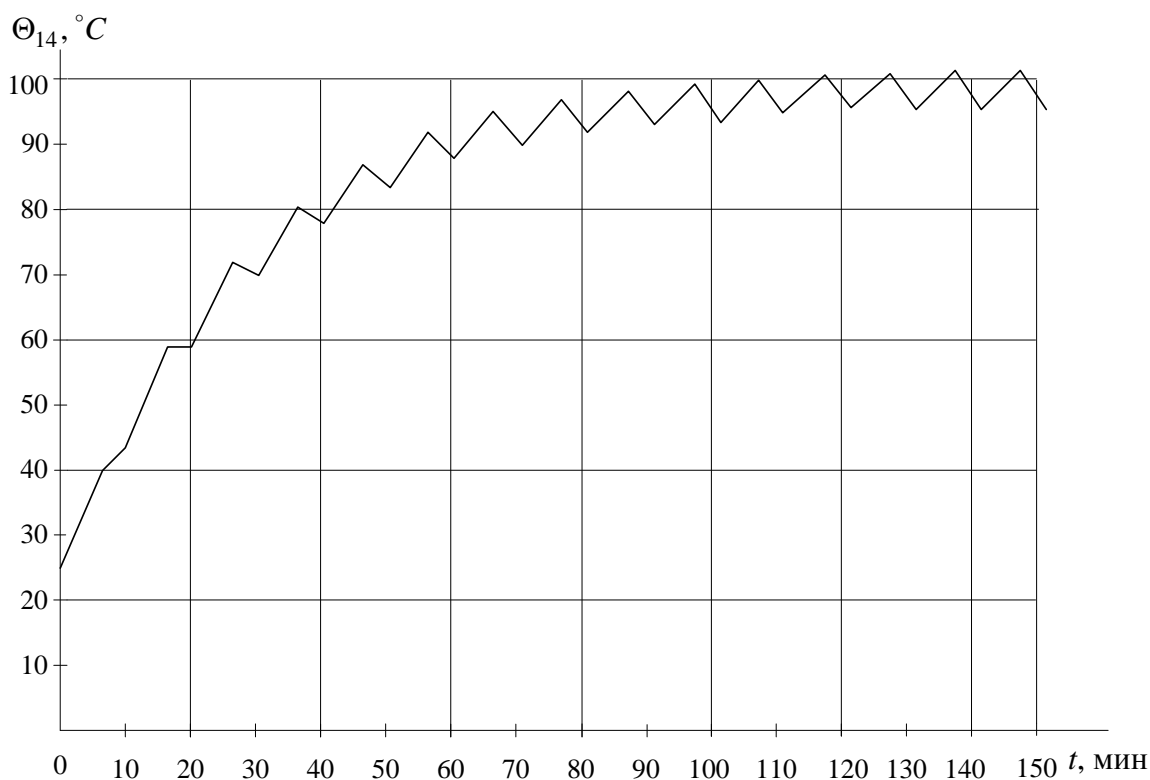


Рисунок 7 – Залежність температури обмотки ротора від часу для закону $\gamma = \alpha = 1,0$. Режим А

Для зрівняння результатів розрахунку отриманих методом кінцевих елементів (МСЕ) і методу ЕТС, на основі температурних полів розрахункових ділянок геометричної моделі визначалися середні температури елементів конс-

трукції двигуна. Результати розрахунку МСЕ підтверджують характер розподілу температурного поля двигуна і закономірності зміни теплового стану двигуна при різних законах регулювання частоти обертання. В таблиці 5 в якості прикладу приведені значення середніх температур обмоток статора і ротора, визначених методами ЕТС і МСЕ.

Таблиця 5 – Середні температури обмоток статора і ротора визначені по методу ЕТС і МСЕ на межах діапазону регулювання. Режим живлення А, °С

Елемент конструкції	Режим $\gamma = \alpha;$ $\alpha = 0,5$		$\gamma = \alpha^2;$ $\alpha = 0,5$		$\gamma = \sqrt{\alpha};$ $\alpha = 1,5$		$\gamma = 1,0 = \text{const};$ $\alpha = 1,5$	
	МКЕ	ЕТС	МКЕ	ЕТС	МКЕ	ЕТС	МКЕ	ЕТС
Обмотка ротора	166,4	172,8	60,0	60,7	90,9	86,6	109,0	103,6
Пазова частина обмотки статора	116,1	117,0	47,4	47,7	64,7	69,2	77,0	83,5

Середня різниця результатів розрахунку обома методами для всіх режимів і усіх елементів конструкції складає 4,29 %, що свідчить про достовірність результатів отриманих за допомогою математичної моделі теплового стану на основі МСЕ.

У четвертому розділі виконано опис модифікацій дослідного стенду, у якому є можливість забезпечити живлення дослідного двигуна АИР90LB4 (виконання IP44, IC0141, $P_N = 2,5$ кВт, $U_{sN} = 220$ В, $f_{sN} = 50$ Гц, $n_N = 1476$ об/хв.) синусоїдальною напругою (схема 1), ступінчатою напругою (ППЧ з АІН, схема 2), напругою прямокутної форми (ППЧ з ШИМ, схема 3), ШИМ при схемі 3 за синусоїдальним законом.

Розроблені схема випробувального стенда та схема розміщення 37 термодатчиків СТ. 1–19 в елементах конструкції.

Вплив величини навантаження на тепловий стан двигуна експериментально досліджувався при схемах живлення 1 і 2, змінюванні $P = (0,25 \dots 1,0)P_N$ і $\gamma = \alpha = 1,0$. Перехід від схеми 1 до схеми 2 призводить до зростання $\Delta\Theta_{37}$ на $25,5^\circ$ (обмотка ротора) і $\Delta\Theta_5$ на $15,4^\circ$ (пазова частина обмотки статора) при P_N ($\Delta\Theta_i$ – перевищення температури, i – номер термодатчика). Це пов'язано з впливом додаткових електричних втрат, при чому співвідношення між P_{elsv} і P_{elrv} проявляється в різниці зростання $\Delta\Theta$.

В таблиці 6 приведені значення перевищення температур $\Delta\Theta$ визначені шляхом розрахунків на основі математичної моделі (6) для схем живлення 1 (чисельник) і 2 (знаменник). Там же приведені значення $\Delta\Theta$ отримані експериментальним шляхом. При всіх схемах джерела живлення реалізувались поєднання закону пропорційного регулювання $\gamma = \alpha$ при $0,5 \leq \alpha \leq 1,0$ і закону регулювання при постійній корисній потужності і постійній величині напруги $\gamma = 1,0 = \text{const}$, $P = P_N = \text{const}$ при $1,0 \leq \alpha \leq 1,5$. Порівняння даних розрахунку і експерименту дозволяють зробити висновки про адекватність математичної моделі теплового стану частотно-керованого асинхронного двигуна в стаціо-

нарних режимах. В області номінальних навантажень відміна значень складає (4–6) %. З результатів експерименту визначені теплові характеристики $\Delta\Theta = f(\alpha)$ при схемах живлення 1, 2, 3. Для пазової частини обмотки статора $\Delta\Theta_5 = f(\alpha)$ і обмотки ротора $\Delta\Theta_{37} = f(\alpha)$ характеристики зображені на рис. 8, 9.

Таблиця 6 – Перевищення температур обмотки статора та обмотки ротора визначені за розрахунком та експериментально в °С

Елемент конструкції	$\alpha = 0,5$		$\alpha = 1,0$		$\alpha = 1,5$	
	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент
Пазова частина обмотки статора (термодатчик 5)	132,2	130,1	75,2	72,3	52,9	54,8
	146,0	146,3	83,3	84,7	62,4	61,8
Обмотка ротора (термодатчик 37)	134,8	132,0	78,8	75,5	62,1	64,0
	152,6	147,8	101,0	97,9	77,8	75,8

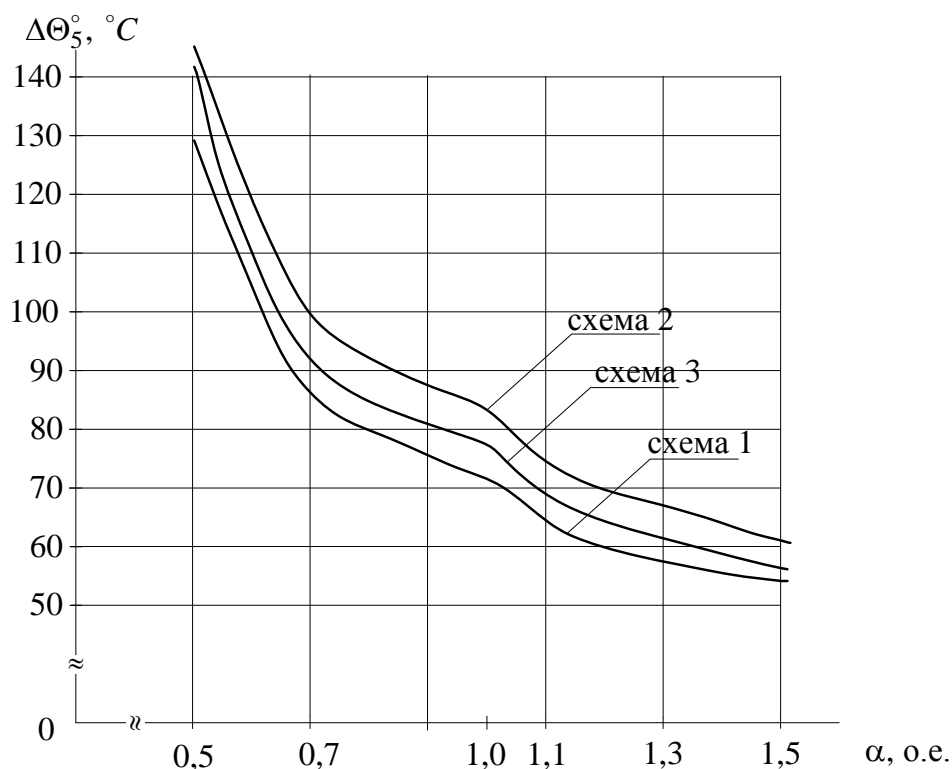


Рисунок 8 – Теплова характеристика пазової частини обмотки статора $\Delta\Theta_5 = f(\alpha)$, 5 – номер термодатчика

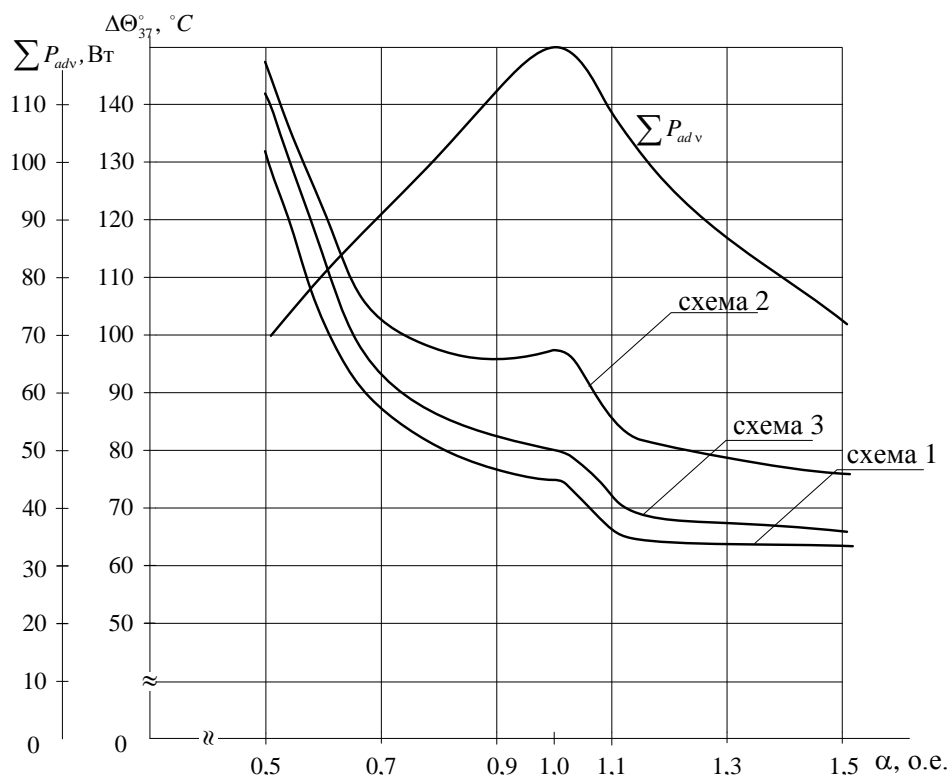


Рисунок 9 – Теплова характеристика ротора $\Delta\Theta_{37} = f(\alpha)$, 37 – номер термодатчика

Взаємне положення характеристик визначається величиною, а значить ступінню впливу на тепловий стан додаткових втрат ΔP_{adv} при схемах живлення 2 і 3. Представлення о величинах ΔP_{adv} при схемах живлення 2 і 3 дає спектральний аналіз напруги і струму, який був проведений за допомогою вимірювального комплексу «Brüel & Kjær». Експериментальні дослідження проводились кафедрою електричних машин разом з «СКБ Укрелектромаш». Встановлено, що амплітуди найбільш значних вищих гармонік струму при переході від схеми 2 до схеми 3 зменшується в 4 – 7 разів. Тому вплив P_{elsv} і P_{elrv} при схемі 2 значно більший, ніж при схемі 3. Особливість форми теплової характеристики $\Delta\Theta_{37} = f(\alpha)$ при живленні по схемі 2 – наявність локального максимуму в області $\alpha = 1,0$, що обумовлено впливом додаткових втрат ΔP_{adv} . Розрахункова залежність $\Delta P_{adv} = f(\alpha)$ зображена на рис. 9. Експериментально підтверджені отримані розрахунковим шляхом сідлоподібний розподіл температури по довжині двигуна для обмотки статора і дзвіноподібний розподіл для обмотки ротора.

Нагрів двигуна при його включенні ($\gamma = \alpha = 1,0$, схема живлення 1) досліджувався розрахунковим шляхом на основі математичної моделі теплового стану в динамічних режимах (7) і експериментально.

Аналіз кривих нагріву показав, що різниця даних розрахунку і експерименту не перевищує (4–8)%. Це свідчить об адекватності математичній моделі (7) і можливість її використання для дослідження динамічних режимів

двигуна.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача прогнозування нагріву частотно-керованих асинхронних двигунів на основі математичного моделювання їх теплового стану в стаціонарних і динамічних режимах з урахуванням впливу додаткових втрат від вищих гармонік напруги при різних джерелах живлення і законах частотного регулювання

Основні наукові і практичні висновки полягають у наступному:

1. За рахунок визначення впливу насичення магнітної системи удосконалені методики розрахунку електромеханічних характеристик, визначені основні втрати потужності при змінюванні частоти і величини напруги, магнітного потоку при різних законах регулювання.

2. З урахуванням нелінійності контуру намагнічування Г-подібної схеми заміщення запропоновані методики розрахунку основних і додаткових електричних і магнітних втрат потужності від вищих гармонік при різних законах керування та джерелах живлення двигуна, що дає можливість прогнозувати тепловий стан двигуна в процесі його проектування та експлуатації.

3. На основі розробленої еквівалентної теплової схеми отримані математичні моделі теплового стану для стаціонарних і динамічних режимів роботи, що дає можливість визначити температурні «ризики» та «запаси» двигуна в процесі його проектування та експлуатації.

4. Досліджено вплив додаткових втрат від вищих гармонік на теплові характеристики частотно-керованого асинхронного двигуна при різних законах регулювання. Отримані кількісні показники впливу закону регулювання та додаткових втрат от ВГН, що дає можливість визначити перевищення температури окремих вузлів двигуна.

5. Запропоновано алгоритм корекції допустимої по заданому тепловому стану корисної потужності. Корекція зумовлена впливом додаткових втрат від ВГН, а її ступінь залежить від величин навантаження, коефіцієнта регулювання та заданої температури. Досліджено нагрів двигуна при включенні та переміжачуючому режимі S_6 , запропонован алгоритм еквівалентування по нагріву режиму S_6 тривалим режимом S_1 .

6. Розроблена схема випробувального стенда. Виконані експериментальні дослідження температурного стану двигуна АИР90LB4. Результати експерименту підтвердили адекватність математичних моделей, та задовільну збіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

7. Використання отриманих результатів теоретичних і експериментальних досліджень дозволяє об'єктивно прогнозувати тепловий стан частотно-керованих асинхронних двигунів при різних законах регулювання та джерелах живлення.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені на: заводі «Електроважмаш» (м. Харків), на заводі «ХЕЛЗ» Укрелектромаш» (м. Харків), в «СКБ Укрелектромаш» (м. Харків) і на заводі «Електромотор» (м. Полтава) та навчальному процесі кафедри електричних машин НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петренко О.М. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты / Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2009. – № 3. – С. 37–41. *Здобувачем розроблена методика розрахунку втрат двигуна при живленні напругою несинусоїдальної форми.*
2. Петренко О.М. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2010. – № 75. – С. 46–51. *Здобувачем розроблена математична модель двигуна для нестационарного режиму роботи.*
3. Петренко О.М. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 16. – С. 89–102. *Здобувач виконав розрахунок теплового стану двигуна для закону регулювання при постійній потужності и незмінному значенні напруги $U_1 = U_N$, $P_2 = const$.*
4. Петренко О.М. Математическая модель частотно-управляемого асинхронного двигателя в перемежающемся режиме / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – №3/5 (45). – С. 46-51. *Здобувачем розроблена математична модель двигуна для перемежаючого режиму роботи двигуна.*
5. Петренко О.М. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 23–27. *Здобувач виконав тепловий розрахунок двигуна при різних навантаженнях.*
6. Петренко О.М. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания / А.Н. Петренко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 21-23.
7. Петренко О.М. Исследование теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя с помощью метода конечных элементов / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 39–42. *Здобувач виконав розрахунок теплового поля двигуна.*
8. Петренко О.М. Экспериментальное исследование температурного поля асинхронного частотно-управляемого двигателя / А.Н. Петренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – № 4. – С. 54–63.

9. Петренко О.М. Экспериментальное исследование нагрева управляемого асинхронного двигателя при различных формах питающего напряжения / А.Н. Петренко // Электрика. – Москва, 2011. – № 4. – С. 20–22.

10. Петренко О.М. Экспериментальное исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах / А.Н. Петренко, Н.А. Осташевский, Н.Я. Петренко, В.П. Шайда // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011. – С. 136–140. *Здобувач виконав експериментальне дослідження і обробку результатів.*

11. Петренко О.М. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Електроінформ. – 2009. – С. 266–270. *Здобувач на підставі еквівалентній тепловій схемі розробив математичну модель для стаціонарних режимів роботи двигуна.*

12. Петренко О.М. Исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания / А.Н. Петренко // Применение инновационных технологий в научных исследованиях. Сборник научных статей по материалам Международной научн.-практ. конф. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2010. – С. 198–202.

АНОТАЦІЇ

Петренко О.М. Прогнозування теплового стану частотно-керованих асинхронних двигунів при різних законах регулювання та джерелах живлення. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Дисертація присвячена прогнозуванню теплового стану частотно-керованих асинхронних двигунів при різних законах керування та джерелах живлення. Розроблена удосконалена методика розрахунку електромеханічних характеристик з урахуванням нелінійності намагнічуючого контуру, та удосконалена методика розрахунку основних та додаткових втрат. Розроблена удосконалена еквівалентна теплова схема, на основі якої створені математичні моделі теплового стану двигуна в стаціонарних і динамічних режимах, визначені температурне поле, теплові потоки та теплові характеристики. Розроблений алгоритм корекції допустимої по заданому тепловому стану величини корисної потужності двигуна. За допомогою математичної моделі динамічного теплового режиму досліджено нагрів двигуна при пуску і переміжачуючому режимі S₆. Запропоновано алгоритм еквівалентування по нагріву повторно-короткочасних режимів режимом S₁. Виконане порівняльне дослідження температурного поля двигуна за допомогою метода скінчених елементів. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичних моделей теплового стану двигуна в стаціонарних і динамічних режимах. Отримані на основі математичних моделей теплові характеристики

відрізняються від експериментальних на (4–7) %.

Ключові слова: частотно-керований асинхронний двигун, тепловий стан, температурне поле, теплові характеристики, джерела живлення.

Петренко А.Н. Прогнозирование теплового состояния частотно-управляемых асинхронных двигателей при различных законах регулирования и источниках питания. На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

Диссертация посвящена прогнозированию теплового состояния частотно-управляемых асинхронных двигателей при различных законах управления и источниках питания. С учетом нелинейности контура намагничивания Г – образной схемы замещения предложена методика расчета основных и дополнительных от высших гармоник напряжения потерь и определено их влияние на нагрев отдельных узлов двигателя. Разработана усовершенствованная методика расчета электромеханических характеристик, учитывающая нелинейность контура намагничивания. Разработана усовершенствованная эквивалентная тепловая схема, на основе которой созданы математические модели теплового состояния двигателя в стационарных и динамических режимах. На основании математических моделей выполнено исследование тепловых полей, тепловых потоков и тепловых характеристик при различных законах регулирования и источниках питания. Разработан алгоритм коррекции допустимой по заданному тепловому состоянию величины полезной мощности. В динамических режимах на основе математической модели исследован нагрев двигателя при пуске и в перемежающемся режиме S₆. Предложен алгоритм эквивалентирования по нагреву повторно-кратковременных режимов режимом S₁. Установлено, что размах колебаний температуры элементов конструкции двигателя в пределах одного цикла при перемежающемся режиме S₆ существенно ограничивается дополнительными электрическими потерями от высших гармоник. Выполнено сравнительное исследование температурного поля двигателя на основе метода конечных элементов. Разработана схема испытательного стенда и схема закладки термодатчиков для определения температуры отдельных узлов двигателя. Проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили адекватность математических моделей теплового состояния двигателя в стационарных и динамических режимах. Полученные на основании математических моделей тепловые характеристики отличаются от экспериментальных на (4–7 %). Разработанные усовершенствованные методики расчетов и математические модели могут быть адаптированы для прогнозирования теплового состояния асинхронных частотно-управляемых двигателей при произвольных законах регулирования.

Ключевые слова: частотно-управляемый асинхронный двигатель, тепловое состояние, температурное поле, тепловые характеристики, источники питания.

Petrenko A.N. Heat State Forecasting of Frequency-controlled Asynchronous Engines under Different Laws of Regulation and Power Supply Sources. Manuscript.

Thesis for candidate's degree by speciality 05.09.01 – electric machines and devices. National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, 2012.

The thesis is devoted to the forecasting of the thermal state of frequency-controlled asynchronous motors at various laws of control and power supplies. The improved design procedure of electromechanical characteristics taking into account the nonlinearity of magnetization circuit, as well as the improved design procedure of fundamental and stray load losses was elaborated. Was elaborated the improved equivalent thermal circuit and thereupon were elaborated mathematical models of engine's thermal state in stationary and dynamic modes. Were described thermal field, thermal circuit and thermal characteristic. Was calculated residual algorithm of the allowable value of engine's useful power at given thermal state.

The starting heating of engine and heating at the intermittent operation S6 in dynamic modes is studied on the basis of mathematical model. The algorithm of heating equivalent of the intermittent cycle by continuous service S1 is suggested.

A comparative analysis of the engine's thermal field is done on the basis of the finite element method. The research was conducted that confirmed the adequacy of mathematical model of engine's thermal state in stationary and dynamic modes.

Thermal characteristics obtained on the base of mathematical model differ from experimental ones by 4–7 %.

Key words: frequency-controlled asynchronous motors, thermal state, thermal field, thermal characteristic, power supplies.

Підп. до друку _____ 2012 р. Формат 60×90 1/16. Папір офісний. Riso-
друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.
Зам. № 4. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 16.07.2000 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
Друкарня НТУ «ХП», 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21