

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Федоров Михайло Михайлович

УДК 621.313.017.7

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ В НЕСТАЦІОНАРНИХ
РЕЖИМАХ ЇХ РОБОТИ**

Спеціальність 05.09.01 - Електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі електромеханіки і теоретичних основ електротехніки в Донецькому національному технічному університеті, Міністерство освіти і науки України, м. Донецьк.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
Андрієнко Петро Дмитрович,
ВАТ НДІ „Перетворювач”, м. Запоріжжя,
заступник директора.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Яковлєв Олександр Іванович,
Національний аерокосмічний університет імені
М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”,
м. Харків,
завідувач кафедри енергетики та електротехніки;

доктор технічних наук,
Федоренко Григорій Михайлович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
головний науковий співробітник;

доктор технічних наук, професор,
Ткачук Василь Іванович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
м. Львів,
завідувач кафедри електричних машин.

Провідна установа: ЗАТ “Електроважмаш”, Міністерство промислової політики України, м. Харків

Захист відбудеться 20 листопада 2003 р. о 14.30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”
за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.
Автореферат розісланий 7 жовтня 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Болюх В.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У процесі експлуатації двигуни змінного струму зазнають динамічні теплові впливи. Їхнє температурне поле визначається, з одного боку, умовами експлуатації, що характеризуються різноманітними режимами роботи, станом навколишнього середовища, умовами теплообміну, з другого боку - їхніми конструктивними особливостями, властивостями матеріалів, використовуваних для виготовлення окремих частин машини, системами охолодження і т. ін.

У загальному випадку в електродвигунах має місце несталий тепловий стан, що характеризується зміною температури окремих їхніх частин, мінливістю теплових потоків, незбалансованістю виділюваною усередині машини і відводимою за їхні межі тепловою енергією. Виникаючі при цьому теплові перевантаження приводять до скорочення терміну служби ізоляції обмоток машини, а іноді і до аварійних ситуацій. У цьому зв'язку питання контролю, діагностики і прогнозування динаміки теплового стану електродвигунів у різних режимах роботи актуальні при їхньому проектуванні, виробництві й експлуатації.

У розглянутій проблемі домінуюче значення мають методи аналізу і прогнозування теплових перехідних процесів у вузлах електродвигунів змінного струму в різних режимах їхньої роботи в умовах змінного навантаження. Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених дослідженню нестационарних теплових процесів, практично відсутня інформація про особливості характеру протікання теплових перехідних процесів у різних вузлах електричних машин і впливу на них різних факторів.

Існуючі методи розрахунку й аналізу не одержали широкого поширення при рішенні практичних задач прогнозування теплового стану в елементах конструкції електродвигунів змінного струму, що виникають у процесі виробництва й експлуатації. Незважаючи на велику практичну значимість, інформація про динаміку теплового стану електричних машин обмежена. Практично відсутній контроль температури обмоток при їхній експлуатації, а прогнозування теплового стану при перемінному навантаженні здійснюється за величиною середніх втрат, що гріють, чи результатами випробувань на нагрівання, проведених на одному зразку перед серійним виробництвом. При цьому судження про теплові перевантаження в обмотках обмежені, тому що відсутня пряма залежність між середніми втратами і температурою, а випробування на нагрівання проводяться в тривалому чи в одному з можливих повторно-короткочасних режимах. Рішенню цих проблем присвячена ця актуальна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» (план робіт затверджений Бюро фізико-технічних проблем енергетики НАН України від 16.09.85 протокол № 8). Основні наукові і практичні результати були отримані в процесі виконання держбюджетних і госпдоговірних робіт відповідно до планів Донецького національного технічного університету. До них варто віднести:

Х 80-300 – з ВО «Динамо» м. Москва: «Розробка пристроїв аналогового теплового захисту асинхронних кранових двигунів» (з 1.10.80 по 31.12.85, номер

держреєстрації 81101328);

Х 86-300 – з ВО «Динамо» м. Москва: «Розробити і впровадити пристрій теплового захисту асинхронних двигунів нової серії 4МТ» (з 1.01.86 по 31.12.88, номер держреєстрації 01860010312);

Х 89-300 – з ВО «Динамо» м. Москва: «Розробити і впровадити пристрій температурного захисту для асинхронних двигунів нових серій МТ і МАП» (з 1.01.89 по 31.12.91, номер держреєстрації 01890023109);

Х 88-300 – з ВО «Донецьквуглеавтоматика» м. Донецьк: «Розробити і впровадити пристрій теплового захисту двигунів шахтних піднімальних установок» (з 1.07.88 по 31.12.90, номер держреєстрації 01880012753);

Х 89-303 – з Углегорскою ГРЕС: «Розробити і впровадити пристрій теплового аналогового захисту електродвигунів власних потреб Углегорскої ГРЕС» (з 1.01.89 по 31.12.93, номер держреєстрації 01890020018);

Г 36-91 – держбюджетна за планами Міністерства освіти і науки України: «Розробка мікропроцесорної системи автоматизованих випробувань і прогнозування теплового стану електродвигунів при різних режимах роботи» (з 1.08.91 по 31.12.94, номер держреєстрації 01910050374);

Г 11-95 – держбюджетна за планами Міністерства освіти і науки України: «Розробка мікропроцесорної системи автоматизованих іспитів електродвигунів і прогнозування їх електромеханічних і теплових характеристик в аномальних режимах роботи» (з 1.01.95 по 31.12.97, номер держреєстрації 0195U006905);

Г 13-98 – держбюджетна за планами Міністерства освіти і науки України: «Розробка автоматизованої системи контролю, діагностики та прогнозування електромеханічних і теплових характеристик електродвигунів змінного струму при пошкодженнях обмоток» (з 1.01.98 по 31.12.99, номер держреєстрації 0198U002314);

Ці роботи виконані під науковим керівництвом і при особистій участі здобувача.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є: удосконалення методів прогнозування теплового стану елементів конструкції електродвигунів змінного струму в нестационарних режимах їх роботи; розробка методів розрахунку теплових перехідних процесів; обґрунтування і побудова моделей динаміки теплового стану в елементах конструкції електродвигунів змінного струму і створення теоретичних основ побудови систем контролю і прогнозування температури обмоток електродвигунів, що працюють у різних режимах роботи при безперервно змінному навантаженні. Відповідно до мети роботи коло задач, розв'язаних у дисертації, охоплює наступні аспекти проблеми:

– розробка методів розрахунку й аналізу теплових перехідних процесів у вузлах електричних машин шляхом рішення рівнянь теплового стану й отриманих аналітичних виражень, що описують характер динаміки теплових процесів;

– дослідження особливостей теплових перехідних процесів у різних вузлах електричних машин і аналіз факторів, що впливають на них;

– розробка методів аналізу і розрахунку теплових перехідних процесів у повторно-короткочасних і перемежованих режимах роботи шляхом рішення рівнянь стану на всіх інтервалах при змінних початкових умовах;

– обґрунтування динамічних теплових моделей вузлів (ДТМВ) електричних машин, розробка вимог до них і методів розрахунку їхніх параметрів за результатами випробувань, передбачених державним стандартом, що включають їхню корекцію з метою забезпечення адекватності відтворення динаміки теплових процесів при безперервно змінному навантаженні;

– обґрунтування принципів побудови і розробка алгоритмів роботи автоматизованих систем контролю і прогнозування теплового стану електричних машин у різних режимах роботи;

Об'єктом дослідження є теплові перехідні процеси в елементах конструкції електродвигунів змінного струму при різному характері навантажень.

Предметом досліджень є електродвигуни змінного струму потужністю до 1000 КВт, що працюють у повторно-короткочасних і перемежованих режимах.

Методи дослідження. Для рішення задач використана теорія нестационарних теплових процесів в електричних машинах, методи аналізу і рішення систем диференціальних рівнянь змінних стану, методи математичного моделювання й експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Установлено відмінні риси теплових перехідних процесів у вузлах електродвигунів перемінного струму. Досліджено вплив різних факторів на форми кривих нагрівання й охолодження. Показано, що вони мають інтегральний характер і, побудовані у відносних одиницях, однакові для всіх двигунів одного типорозміру. Можливі розходження кривих перехідних процесів мають місце при зміні співвідношень і величин втрат у різних машинах. Криві нагрівання й охолодження можна вважати перехідними характеристиками, що відбивають властивості теплових процесів у розглянутому вузлі електричної машини.

2. Уперше доведено і підтверджено розрахунками й експериментальними дослідженнями, що форма кривих перехідних процесів на інтервалах циклу повторно-короткочасних режимів істотно змінюється в кожному наступному циклі, показано їхній визначальний вплив на характеристики теплового стану при безперервно змінному навантаженні. При однакових еквівалентних утратах температура обмоток електродвигунів у повторно-короткочасних режимах більше, ніж у тривалому режимі.

3. Теоретично обґрунтовано і доведено, що теплові перехідні процеси можуть бути описані аналітичними виразами, які включають дві експонентні складові з великою і малою постійними часу. При цьому експонента з великою постійною часу дозволяє врахувати тривалість перехідного процесу, а експонента з малою постійною часу – особливості перехідних процесів на початкових етапах. Уперше показано, що подібний підхід забезпечує збіг форм кривих при ненульових початкових умовах, що мають місце при перемінному навантаженні.

4. Науково обґрунтовані і розроблені методи прогнозування теплового стану електродвигунів змінного струму, що працюють у нестационарних режимах роботи з довільно заданим характером навантажень.

5. Уперше доведена можливість проведення прискорених теплових випробувань, за результатами яких можна одержати характеристики теплового стану в різних режимах роботи, й обґрунтовані принципи побудови автоматизованих си-

стем контролю і прогнозування, що дозволяють судити про температу-ру обмоток кожного електродвигуна, при довільному характері навантажень.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено методику рішення систем диференціальних рівнянь теплового стану, що дозволяє одержати аналітичні вираження температур $\theta(t)$ в елементах конструкції електродвигунів змінного струму у вигляді суми експонентних складових, коефіцієнти яких дають можливість судити про кількісні і якісні характеристики перехідних процесів. Методика застосована і для ненульових початкових умов. Розроблено критерії оцінки динаміки теплового стану в повторно-короткочасних і перемежованих режимах.

2. Науково обґрунтована побудова ДТМВ електродвигунів, пасивні параметри яких єдині для всіх машин одного типорозміру. Розроблено методику визначення параметрів ДТМВ за допомогою експериментальних кривих нагрівання й охолодження. Підтверджено адекватне відтворення теплових процесів за допомогою ДТМВ при ненульових початкових умовах у повторно-короткочасних і перемежованих режимах роботи. Параметри ДТМВ можуть бути занесені в каталог у вигляді «теплового паспорта», що дозволить використовувати їх у процесі випуску й експлуатації машин при прогнозуванні теплового стану в різних режимах роботи і створенні пристроїв теплового захисту.

3. Розроблено методику розкладання експериментальних кривих нагрівання й охолодження на експонентні складові з одержанням їхнього аналітичного виразу, яка дає можливість прогнозування сталих температур елементів конструкції машин по неповних кривих нагрівання.

4. Обґрунтовано методи дослідження характерних рис теплових процесів в асинхронних двигунах (АД) при аномальних режимах роботи. Розглянуто приклади теплових перевантажень в обмотках при роботі АД з загальмованим ротором, зниженій напрузі і т. ін.

5. Уперше розроблений і експериментально перевірений алгоритм проведення випробувань на нагрівання, що дозволяє судити про тепловий стан обмоток при різних режимах роботи кожного електродвигуна, що випускається, за результатами приймально-здавальних випробувань.

6. Уперше науково обґрунтовані і розроблені принципи побудови й алгоритми роботи систем контролю, діагностики і прогнозування теплового стану двигунів змінного струму в різних режимах роботи, включаючи аномальні при їхньому виробництві й експлуатації.

Винесені на захист наукові положення і результати є теоретичною основою рішення проблеми створення автоматизованих систем контролю, діагностики і прогнозування теплового стану електричних машин.

Основні висновки і рекомендації використані при розробці систем теплового контролю і захисту від теплових перевантажень електродвигунів змінного струму. Створення системи контролю і прогнозування теплового стану АД при різних режимах роботи. Ефективність розробок підтверджується досвідом промислової експлуатації пристроїв аналогового теплового захисту (УАТЗ і УТНЗ) АД кранових механізмів фабрики Маріупольського металургійного комбінату імені

Ілліча (з 1983 р.), Ката-Іванівського цементного заводу (з 1984 р.) Орско-Халиловського комбінату (з 1986 р.). За замовленням ВО «Динамо» м. Москви розроблено ряд пристроїв аналогового теплового захисту (УАТЗ) асинхронних кранових електродвигунів, що витримали приймальні випробування і дослідно-промислово експлуатацію. Пристрій УАТЗ-2 було експоновано на виставці досягнень народного господарства (1985 р.), де було відзначено бронзовою медаллю. На Углегорській ГРЕС для захисту обмоток від теплових перевантажень несиметричних режимів роботи синхронних двигунів кульових млинів і АД димососів використовуються (з 1994 р.) пристрої типу УТНЗ 4 і УТНЗ 5, що (з 1998 р.) застосовуються також для захисту АД різних механізмів обтискного цеху Донецького металургійного заводу. За результатами роботи створені і пройшли лабораторні випробування експериментальний зразок автоматизованої системи контролю, прогнозування і діагностики теплового стану електричних машин, що працюють у різних режимах роботи, включаючи аномальні. Система рекомендована для промислового впровадження на Первомайському електромеханічному заводі ім К. Маркса і Ново-Каховському заводі. Основні положення роботи використовуються в навчальному процесі при читанні лекцій по курсах «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні машини», «Теорія автоматичного керування», у лабораторному практикумі, курсовому і дипломному проектуванні при підготовці фахівців зі спеціальності «Електропривод і автоматизація промислових установок і комплексів».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, які представлені у дисертаційній роботі отримані здобувачем особисто. Здобувач розробив комплекс теоретичних і розрахункових заходів по прогнозуванню теплового стану електродвигунів змінного струму в нестаціонарних режимах роботи. Всі результати по розробці основних технічних рішень і розрахунків виконаних здобувачем. Спільно з співавторами проведено обговорення основних концепцій та варіантів, виконані конструкторські, технологічні і патентні роботи, виготовлені лабораторні моделі і промислові зразки та проведені експериментальні дослідження.

Апробації результатів дисертації. Основні результати доповідалися і обговорювалися на: 6-й Всесоюзній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку виробництва асинхронних двигунів» (м. Володимир, 1982 р.), Республіканській науково-технічній конференції «Перспективи розвитку електромашинобудування на Україні» (м. Харків, 1983 р.), Всесоюзній науково-технічній конференції по електродвигунах змінного струму під'ємно– транспортних механізмів (м. Володимир, 1988 р.), 1-й міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології ресурсо-енергозбереження» (м. Київ, 1997 р.), 13-й Міжнародній конференції по автоматизації у вугільній промисловості у Високих Татрах (Словачина, 1998 р.), 3-й міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці» (м. Львів, 1999 р.), науково-технічній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерні технології в інженерній і управлінській діяльності» (м. Таганрог, 1999 р., 2001 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи електричних систем» (м. Донецьк, 2000 р., 2002 р.), семінарі відділів інституту електродинаміки НАН

України (м. Київ, 2002 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Алушта, 2002 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 76 наукових робіт, серед яких: 12 без співавторів, у тому числі: 11 статей у наукових журналах, 43 у збірниках наукових праць, 10 у тезах доповідей науково-технічних конференцій, 8 авторських посвідчення і 1 патенті на винахід.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 6-ти розділів, висновків до роботи, списку використаних джерел та 4-х додатків. Повний обсяг дисертації складає 457 сторінок. Робота містить 63 ілюстрації до тексту, 18 ілюстрацій на 16 сторінках; 58 таблиць до тексту, 7 таблиць на 9 сторінках; список використаних джерел із 339 найменувань, на 32 сторінках; 4 додатка на 113 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 287 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність розв'язуваної проблеми і дана приведена вище характеристика роботи.

У першому розділі проведений аналіз стану проблеми і визначені мета і задачі досліджень. Проаналізовано теплові процеси в різних режимах роботи S1-S8, передбачених державним стандартом, а також при характерних експлуатаційних перевантаженнях і аномаліях. У загальному випадку в електричних машинах мають місце нестационарні теплові процеси, при яких температури елементів конструкції машин безупинно змінюються в часі. Тепловий стан визначається не тільки потужністю джерел тепла (втратами в елементах конструкції), але і параметрами, що характеризують динаміку теплових процесів. Тому температури вузлів машин у нестационарних режимах не знаходяться в прямій залежності від потужності джерел тепла, як це має місце в сталому стані тривалого режиму S1.

Розглянуто обмеження, що накладаються змінами температури ізоляційних матеріалів обмоток на експлуатаційні характеристики машин. Використовуючи рівняння Вант-Гоффа й Арреніуса, що відбивають процеси старіння ізоляції, розглянуті питання витрати ресурсу ізоляційних матеріалів і їхнього залишкового терміну служби при зміні температури обмоток, що мають місце при перемінному навантаженні в процесі експлуатації електричних машин. Запропоновано методи використання цього рівняння для розрахунку ресурсу і залишкового терміну служби при безперервній зміні температури обмоток. Проаналізовано аварійні ситуації, коли різке наростання температури обмоток приводить до передчасного руйнування ізоляційних матеріалів.

Показано, що надійна експлуатація, термін служби і витрачений ресурс ізоляційних матеріалів при нестационарних режимах роботи значною мірою визначаються особливостями теплових перехідних процесів у вузлах електродвигунів змінного струму.

Аналіз і прогнозування динаміки теплових процесів може ґрунтуватися на результатах розрахунків і експериментальних досліджень. В даний час накопичено значний досвід застосування методів розрахунку і дослідження теплового стану електричних машин і елементів їх конструкції. Вагомий внесок у розвиток тео-

рії динаміки теплових процесів внесений вченими України. Цілий ряд робіт учених Київської школи (Г.Г. Щасливий, Г.М. Федоренко, В.І. Виговський, А.І. Титко, І.Н. Богаєнко й ін.) мають фундаментальний характер і одержали світове визнання. Світове визнання і фундаментальний характер мають і роботи вчених Харківської школи (В.Г. Данько, В.І. Борисенко, А.І. Яковлев, В.І. Мілих і ін.). Слід зазначити і вагомий внесок у теорію теплових процесів електричних машин вибухобезпечного виконання вчених Донецької школи (Є.Б. Ковальов, А.М. Бурковський, В.К. Коробов і ін.). Теорія теплових процесів одержала розвиток у працях учених країн колишнього СРСР.

Розрахунок теплових перехідних процесів можна здійснити шляхом рішення системи лінійних диференціальних рівнянь теплового стану, отриманих за допомогою еквівалентних теплових схем (ЕТС) заміщення. З урахуванням утрат P , теплоємностей C , і теплопровідностей λ ЕТС у матричній формі система диференціальних рівнянь має вид:

$$\frac{d\theta}{dt} \cdot C + \lambda \cdot \theta = P \quad (1)$$

Методи рішення системи рівнянь можуть бути різні. Найбільш розповсюдженими є чисельні методи (метод Ейлера, Рунге-Кутти й ін.), що дозволяють одержати криві теплових перехідних процесів $\theta(t)$ для різних елементів конструкції електродвигунів. Чисельні методи мають незаперечні достоїнства, пов'язані, насамперед із простотою їхнього застосування навіть при складних діаграмах навантаження в повторно-короткочасних режимах, коли на кожному інтервалі має місце зміна початкових умов і параметрів ЕТС. Однак їхнє застосування викликає певні труднощі при аналізі і прогнозуванні теплових процесів у різних режимах роботи. При нестационарних процесах має місце зміна форми кривих теплових перехідних процесів на кожному інтервалі діаграми навантажень, що можуть привести до зміни теплового стану. При застосуванні чисельних методів зміну форми кривих практично неможливо врахувати, тому прогнозування про тепловий стан елементів конструкції при можливій зміні режиму роботи важко. Подібні причини утрудняють також оцінку впливу різних зовнішніх і внутрішніх факторів на характеристики теплового стану електро-двигунів у нестационарних режимах. Кращими є методи рішення диференціальних рівнянь теплового стану з одержанням аналітичних виражень $\theta(t)$.

Аналіз і прогнозування динаміки теплових процесів не бази експериментальних досліджень здійснюється за результатами випробувань на нагрівання відповідно до держстандарту 11828-81. Вони проводяться при приймальних випробуваннях з головним зразком типорозміру електричної машини або при періодичних і типових іспитах. У програмі приймально-здавальних випробувань, яким піддаються всі машини, що випускаються, випробування на нагрівання не передбачені, а прогнозування теплового стану обмоток здійснюється непрямими методами шляхом порівняння втрат машин, що випускаються, із втратами головного зразка, випробуваного по широкій програмі, що включає випробування на нагрівання. Необхідно відзначити, що можливості прогнозування теплового стану головних зразків електродвигунів змінного струму за результатами випробування

на нагрівання обмежені. Це температури обмоток у тривалому режимі S1 при номінальному навантаженні. Передбачаються випробування на нагрівання й у короткочасному режимі S2 (при тривалості роботи 30 чи 60 хв.), а також у повторно-короткочасному режимі S3 (при тривалості циклу $t_{\text{ц}} = 10$ хв. і тривалісті включення (ТВ) 40%, або 15%, 25% і 60%). За вимогою замовника державний стандарт передбачає теплові випробування в більш складних режимах, однак це вимагає спеціальних стендів.

Контроль температури обмоток важливий при експлуатації електродвигунів. Результати статистичних досліджень свідчать, що більш 50% результатів відмовлень АД відбувається через відсутність (чи погану роботу) теплового захисту. При нестаціонарних процесах контроль температури особливо утруднений. З існуючих засобів захисту придатні системи, засновані на безпосередньому контролі температури і системи з непрямою оцінкою температурного стану, в основному – за рівнем токових навантажень.

Кращим є застосування систем, заснованих на безпосередньому контролі температури за допомогою вмонтованих датчиків, однак, їхнє застосування зв'язане з певними труднощами, що виникають як у технологічному процесі (складність вмонтування датчиків температури в обмотку), так і при їхній експлуатації (передача слабких сигналів від датчиків). Необхідно відзначити, що системи з безпосереднім виміром температури не можуть вирішити весь комплекс питань температурного захисту. Так, в аварійних режимах (режим короткого замикання чи затяжний пуск електродвигуна) виникає небезпека різкого наростання температури. У цьому випадку ізоляція обмоток може зруйнуватися при температурі меншій припустимої. Контроль швидкості наростання температури у системах з безпосереднім контролем обмежений через інерційність датчиків і системи виміру. Крім того, іноді застосування цих систем практично неможливо. До них відносяться системи, у яких необхідно вимірювати температуру обертових частин електричних машин, електродвигунів рухливих механізмів, обмоток високовольтних електричних машин і ін.

В пристроях теплового контролю і захисту від теплових перевантажень, заснованих на непрямій оцінці температури обмоток, відсутні датчики температури. Величини температур одержують шляхом моделювання за допомогою теплових аналогів. Вхідними сигналами таких пристроїв є струми і напруги обмоток статора, що дозволяють формувати величини втрат у вузлах електродвигуна, і далі здійснюється моделювання теплових перехідних процесів в обмотках електродвигуна. Основним недоліком застосовуваних теплових моделей є відсутність надійного теоретичного обґрунтування їхніх схем і розрахунку кількісних характеристик її елементів. Це приводить до того, що при довільному характері навантажень, якість моделювання істотно погіршується і пристрої захисту стають неефективними і малопридатними.

З вищевикладеного випливає, що розробка методів і засобів контролю і прогнозування теплового стану елементів конструкції електродвигунів змінного струму, що працюють з перемінним навантаженням, є важливим чинником при їхньому проектуванні, виробництві й експлуатації. Виникаючі при цьому проблемні задачі вимагають рішення комплексу теоретичних питань і розробки практич-

них рекомендацій, що визначають основний зміст роботи. До основних задач варто віднести:

1. Дослідження динаміки теплових процесів при постійних навантаженнях і умовах охолодження з метою одержання перехідних характеристик елементів конструкції електродвигунів перемінного струму, що дають можливість судити про їхні динамічні характеристики.

2. Дослідження теплових перехідних процесів при безупиннозмінному навантаженні, що охоплюють різні ситуації, які виникають в повторно-короткочасних і перемижованих режимах S3-S8.

3. Розробка ефективних теплових моделей вузлів електричних машин, що дозволяють адекватно відтворювати теплові перехідні процеси при різному характері навантажень.

4. Обґрунтування методів аналізу особливостей теплових процесів у характерних аномальних і аварійних режимах.

5. Розробка методів і засобів теплових іспитів і прогнозування теплового стану електродвигунів змінного струму в різних режимах роботи, що дозволяють судити про теплові навантаження кожної, що випускається, і машини, що знаходиться в експлуатації.

В **другому розділі** проведено дослідження динаміки теплового стану в тривалому режимі S1. Основними характеристиками динаміки в теорії автоматичного регулювання прийнято вважати перехідні функції, за допомогою яких можна здійснювати прогнозування теплових процесів при довільному характері навантажень. Як перехідні функції можуть бути використані криві нагрівання й охолодження, побудовані у відносних одиницях. Їх можна одержати розрахунковим і експериментальним шляхом.

З різноманіття аналітичних методів розрахунку була віддана перевага методам, заснованим на використанні ЕТС, які дозволяють застосувати для розрахунку теплових перехідних процесів добре розроблені методи теорії електричних кіл. У роботі використаний метод змінних стану. У якості змінних стану обрані середні температури окремих елементів конструкції (пазових і лобових частин обмоток, магнітопроводу, станини й ін.). Кількість диференціальних рівнянь теплового стану дорівнює кількості вузлів ЕТС чи кількості виділених для контролю елементів (тіл) конструкції електричних машин.

Для глибокого і якісного аналізу теплових перехідних процесів переважно мати аналітичний вираз температур $\theta_i(t)$ в елементах конструкції електричних машин. У дисертаційній роботі запропонована методика рішення рівнянь теплового стану, заснованого на представленні залежності $\theta_i(t)$ у вигляді суми примушеної $\theta_{пр\ i}$ і вільної $\theta_{св\ i}$ складових.

Примушені складові дорівнюють сталим значенням температур у вузлах машин $\theta_{пр\ i} = \theta_{вуст\ i}$ при відповідному навантаженні. Вони знаходяться з рішення рівнянь стану (1) за умови $d\theta/dt = 0$.

Вираження для вільних складових у загальному випадку має вигляд:

$$\theta_{св} = A \cdot \exp(\gamma \cdot t) = A \cdot \exp(-t / T) \quad (2)$$

Вектор постійних часу T експонент визначається з рішення характеристичного рівняння системи. Число постійних часу дорівнює кількості тіл ЕТС. Матриця постійних інтегрування $A = [A_{ij}]$ визначаються за допомогою початкових умов і виразу для їхнього розрахунку і в матричній формі має вигляд:

$$A = B^{-1} \cdot N \quad (3)$$

Матриця Вандермонда B складається за допомогою коренів характеристичного рівняння. У роботі запропоновано і обґрунтовано метод формування матриці початкових умов N за допомогою векторів початкових умов N_i для кожного тіла, рівних

$$N_i = (\theta_{iCB}(0), d\theta_{iCB}(0)/dt, \dots, d\theta_{iCB}^{n-1}(0)/dt^{n-1}) \quad (4)$$

Початкові значення похідних по черзі визначаються з рівняння (1).

У табл. 1 і табл. 2 як приклад приведені результати розрахунків теплових перехідних процесів АД МТН 312-6 у номінальному тривалому режимі S1. У табл. 1 представлені сталі температури $\theta_{уст i}$ у вузлах двигуна, постійні часу експонент $T_{нг j}$ і їхніх коефіцієнтів питомої ваги $a_{нг ij} = A_{нг ij} / \theta_{уст i}$, що дозволяють сформулювати аналітичні вирази кривих нагрівання у вигляді:

$$\theta_{нг i} = \theta_{уст i} \cdot (1 + \sum a_{нг ij} \exp(-t/T_{нг j})). \quad (5)$$

Таблиця 1

Постійні часу експонент $T_{нг j}$ і коефіцієнти питомої ваги $a_{нг ij}$ кривих нагрівання.

$T_{нг j}$, хв	0,28	0,32	1	1,2	3	53,7	12,4	$\theta_{iуст}$, °C
$a_{нг 1j}$	0	-0,011	0,006	-0,11	0,005	-0,69	-0,2	98
$a_{нг 2j}$	-0,002	-0,001	0	-0,045	-0,025	-1,1	0,173	96
$a_{нг 3j}$	0	0	-0,01	0,034	-0,051	-0,857	-0,116	78
$a_{нг 4j}$	0	0	-0,008	0,02	-0,021	-1,28	0,247	90
$a_{нг 5j}$	0	0,006	-0,013	-0,133	-0,028	-0,75	-0,082	108
$a_{нг 6j}$	0,003	0	0,03	-0,124	0,04	-0,959	0,01	96
$a_{нг 7j}$	0	0	-0,004	0,009	0,072	-0,927	-0,15	46

Таблиця 2

Постійні часу експонент $T_{ох j}$ і коефіцієнти питомої ваги $a_{ох ij}$ кривих охолодження

$T_{ох j}$, хв	0,29	0,32	1,3	1,4	4,1	38,8	174,3
$a_{ох 1j}$	0	0,03	0,017	0,069	0,161	0,069	0,654
$a_{ох 2j}$	0,017	0	-0,074	0,122	-0,032	0,11	0,857
$a_{ох 3j}$	0	0	0	-0,019	0,145	0,095	0,779
$a_{ох 4j}$	0	0	-0,056	0,064	-0,044	0,148	0,888
$a_{ох 5j}$	0	-0,022	0,062	0,084	0,125	-0,082	0,783
$a_{ох 6j}$	-0,015	0	0,07	-0,03	0,071	-0,494	1,378
$a_{ох 7j}$	0	0	0,037	-0,038	-0,318	0,026	1,293

Як тіла ЕТС обрані: пазові (1, 2) і лобові (5, 6) частини обмоток статора і ротора, активне залізо магнітопроводів (3, 4), внутрішнє повітря (7) і корпус (8).

У табл. 2 приведені постійні часу і коефіцієнти питомої ваги експонент кривих охолодження, що дозволяють сформулювати аналітичні вирази кривих нагрівання у вигляді:

$$\theta_{\text{ox}i} = \theta_{\text{уст}i} \cdot (\sum a_{\text{ox}ij} \exp(-t/T_{\text{ox}j})). \quad (6)$$

Якщо прийняти у виразах (5) і (6) $\theta_{\text{уст}i} = 1$, то одержимо аналітичні вирази перехідних функцій у різних елементах конструкції АД МТН 312-6.

Приведені в табл. 1 і 2 результати дозволяють здійснити аналіз форм перехідних функцій, вплив на них різних зовнішніх і внутрішніх факторів.

На рис. 1 і рис. 2 приведені відповідно криві нагрівання й охолодження різних елементів конструкції АД МТН 312-6 у відносних одиницях, що представляють собою їхні перехідні функції.

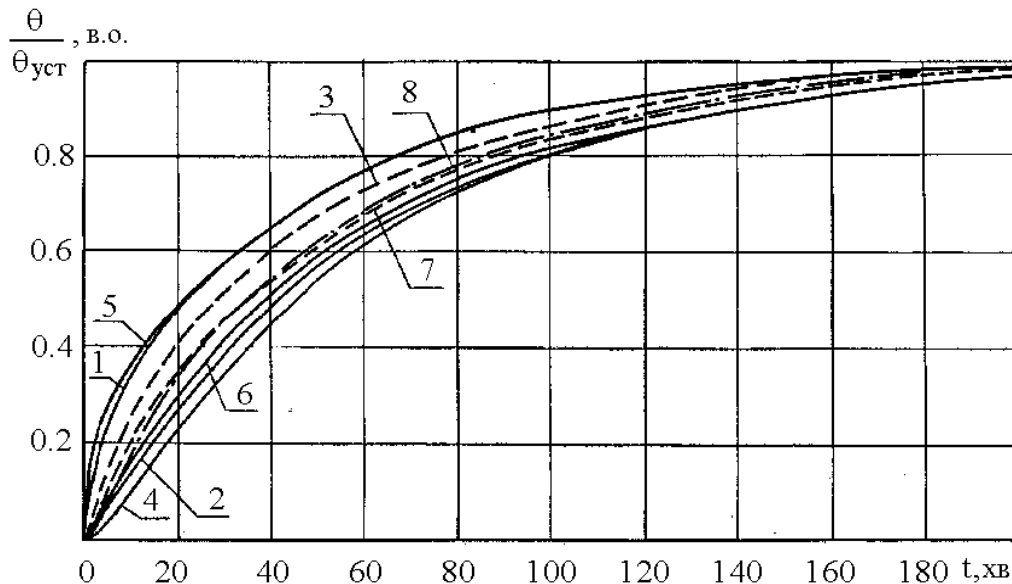


Рис. 1. Криві нагрівання елементів конструкції АД МТН 312-6.

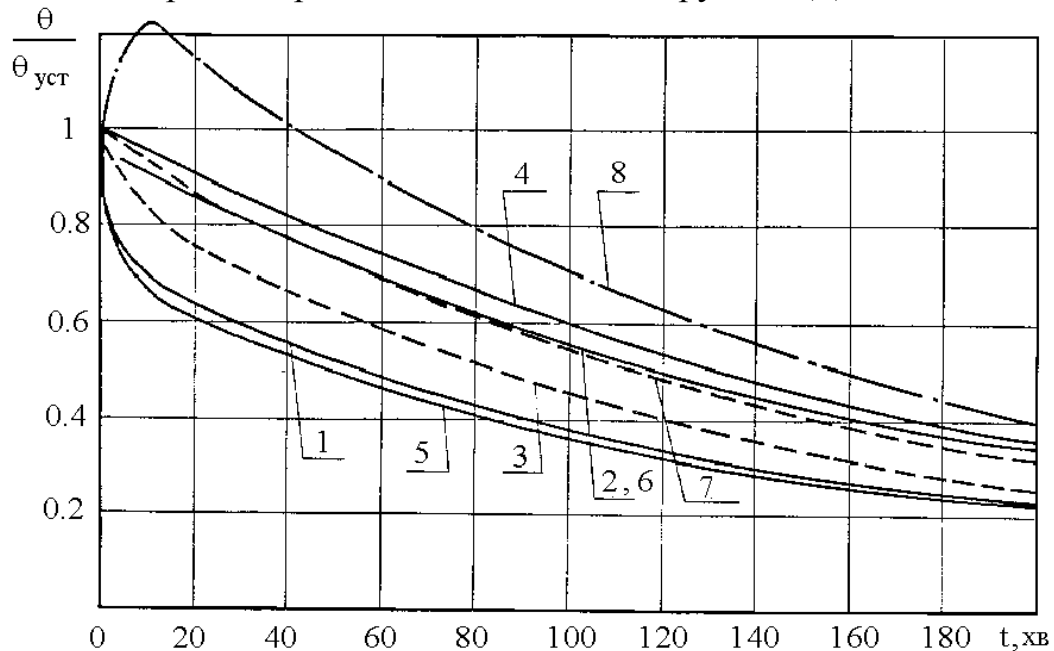


Рис. 2. Криві охолодження елементів конструкції АД МТН 312-6.

Величини постійних часу експонент кривих нагрівання (охолодження) однакові для всіх тіл ЕТС, тому відмінності форм кривих визначається коефіцієнтами питомої ваги експонент. У залежності від величин T_j їх можна розбити на три групи, що деякою мірою відтворюють рух теплових потоків. Експонентні складові з малими постійними часу (до 1 хв) враховують рух теплових потоків уздовж

металевих стрижнів чи обмоток сердечників. Вони приблизно рівні у виразах кривих нагрівання й охолодження. Експоненти із середніми значеннями постійних часу (до 10 хв) відображають рух теплових потоків між ізольованими проводами обмоток і повітряних зазорів. Експонентні складові з великими постійними часу характеризують теплові процеси тепловіддачі з поверхні нагрітих тел. Їхні величини можуть змінюватися в залежності від режиму охолодження. У АД МТН 312-6 із самовентиляцією велика постійна часу кривої охолодження більш, ніж у три рази більше відповідної постійної часу кривої нагрівання. Ці складові визначають загальну тривалість перехідних процесів. Експоненти з малими постійними часу впливають на форми кривих, основна відмінність яких має місце на початкових етапах перехідних процесів, що особливо важливо в повторно-короткочасних режимах роботи машин.

З вищевикладеного випливає, що форми кривих перехідних функцій елементів конструкції АД мають істотні відмінності. У роботі розглянуто вплив різних факторів на характер теплових процесів. Наприклад, таких, як зміна співвідношення постійних і перемінних утрат при рості навантаження й ін.

Аналіз перехідних процесів дозволив зробити висновок про можливість апроксимації кривих нагрівання й охолодження аналітичними вираженнями, що включають дві експоненти з великою T_1 і малою T_2 постійними часу:

$$\begin{aligned}\theta_{\text{нг}i}(t) &= \theta_{\text{уст}i} \cdot (1 - a_{\text{нг}1i} \cdot \exp(-t/T_{\text{нг}1i}) - a_{\text{нг}2i} \cdot \exp(-t/T_{\text{нг}2i})), \\ \theta_{\text{ох}i}(t) &= \theta_{\text{уст}i} \cdot (a_{\text{ох}1i} \cdot \exp(-t/T_{\text{ох}1i}) + a_{\text{ох}2i} \cdot \exp(-t/T_{\text{ох}2i}))\end{aligned}\quad (7)$$

Експоненти з великою постійною часу дозволяють врахувати загальну тривалість перехідних процесів, а складові з малою постійною часу – особливість початкових етапів перехідних процесів. У виразах (7) коефіцієнти питомої ваги ($a_{\text{нг}1}$, $a_{\text{ох}1}$) і постійні часу ($T_{\text{нг}1}$, $T_{\text{ох}1}$) можуть бути прийняті рівними відповідним значенням у табл. 1 і табл. 2, а коефіцієнти питомої ваги і малі постійні часу розраховуються з умови збереження сталості швидкості зміни температури при $t = 0$.

Наведена методика дозволяє одержувати аналітичні вирази перехідних функцій різних елементів конструкції електричних машин, що дає можливість судити про характер теплових процесів при нестационарних режимах їхньої роботи.

Третій розділ присвячено аналізу динаміки теплових процесів в електричних машинах у повторно-короткочасних і перемежованих режимах. Особлива увага приділена процесам квазіусталеного стану, що настає через визначену кількість циклів і характеризується тим, що закон зміни температур $\theta_i(t)$ у кожному наступному циклі повторюється. Необхідно відзначити, що кожен інтервал циклу характеризується тривалістю, рівнем навантажень, умовами охолодження й ін. Подібна розмаїтість означає розходження величин постійних часу T_j і коефіцієнтів питомої ваги експонент a_{ij} у виразах $\theta_i(t)$ на інтервалах циклу.

У квазіусталеному стані обмотки електродвигунів випробовують найбільші теплові навантаження. До основних показників, що характеризують динаміку теплового стану в квазіусталеному режимі і дозволяють оцінити терміни служби ізоляційних матеріалів, варто віднести: максимальне значення температури в циклі θ_{max} , мінімальну температуру θ_{min} , розмах коливань температури в циклі $\Delta\theta = \theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}$ і середню температуру θ_{cp} . У повторно-короткочасних режимах з час-

тими пусками S4 у визначених випадках інтерес представляють збільшення температури $\Delta\theta_{nc}$ при пуску. При довільному характері зміни навантаження в циклі можуть становити інтерес еквівалентні значення температур на різних інтервалах циклу (пуск, гальмування, робочий інтервал і ін.). Ці характеристики дозволяють розраховувати використаний ресурс ізоляційних матеріалів обмоток електричних машин. Характеристики квазіусталеного стану визначаються як зовнішніми, так і внутрішніми факторами. Їхні величини залежать від факторів, що визначають форму кривих теплових перехідних процесів на різних тим-часових інтервалах

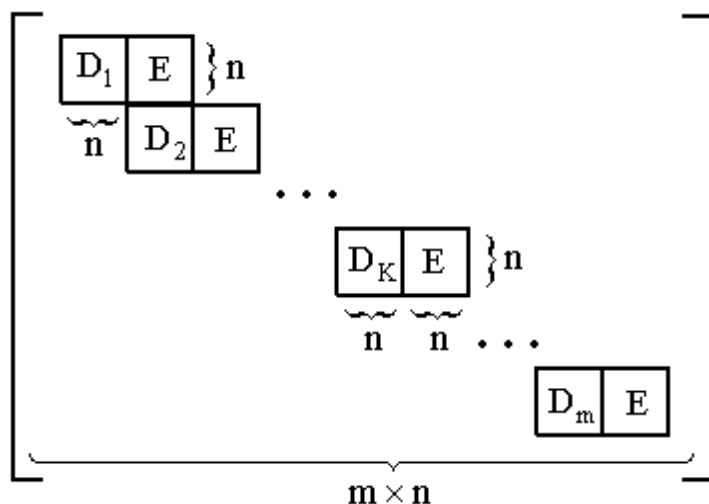


Рис. 3. Квазидіагональна матриця D .

циклу. З зовнішніх факторів варто виділити, насамперед, ті, за допомогою яких формується графік навантаження: $t_{ц}$, $TВ$, струмові навантаження на інтервалах циклу й ін. Внутрішні фактори, як правило, залежать від масогабаритних показників електричних машин і режиму системи охолодження.

У роботі запропонована методика визначення T_j і a_{ij} для $\theta_i(t)$ на кожному інтервалі квазіусталеного стану. При виводі формул визначення T_j і a_{ij} для будь-

якого i -го тіла ЕТС (у загальному випадку що має n тіл) електричної машини, що працює в повторно-короткочасному режимі, цикл якого містить m інтервалів, використане наступне. Значення температур вузлів ЕТС θ_{iK} в кінці довільного k -го інтервалу дорівнюють початковим температурам $\theta_{iK+1}(0)$ $(k+1)$ -го інтервалу, а температури на початку циклу $\theta_i(0)$ дорівнюють температурам θ_{im} наприкінці останнього m -го інтервалу циклу. Величини постійних часу T_{jK} на кожному інтервалі визначають шляхом рішення характеристичних рівнянь, коефіцієнти яких міняються в залежності від величин теплопровідностей ЕТС на інтервалі. Для визначення коефіцієнтів питомої ваги експонент складається квазидіагональна матриця D , приведена на рис. 3. Її діагональ формується з одиничних матриць E і матриць інтервалів D_K , елементи яких складаються з коефіцієнтів питомої ваги експонент виражень $\theta_{iK}(t)$ на k -м інтервалі. За допомогою матриці D формується система лінійних алгебраїчних рівнянь, рішення якої дозволяє визначити a_{ij} виражень $\theta_i(t)$ на всіх інтервалах циклу.

Аналіз характеристик квазіусталеного стану було здійснено за результатами розрахунків і експериментальних досліджень АД з короткозамкненим і фазним роторами у різних повторно-короткочасних режимах S3. На рис. 4 приведена діаграма максимальних і мінімальних температур у вузлах АД МТН312-6, що працює в номінальному режимі S3 із $t_{ц} = 10$ хв. і $TВ = 0.4$.

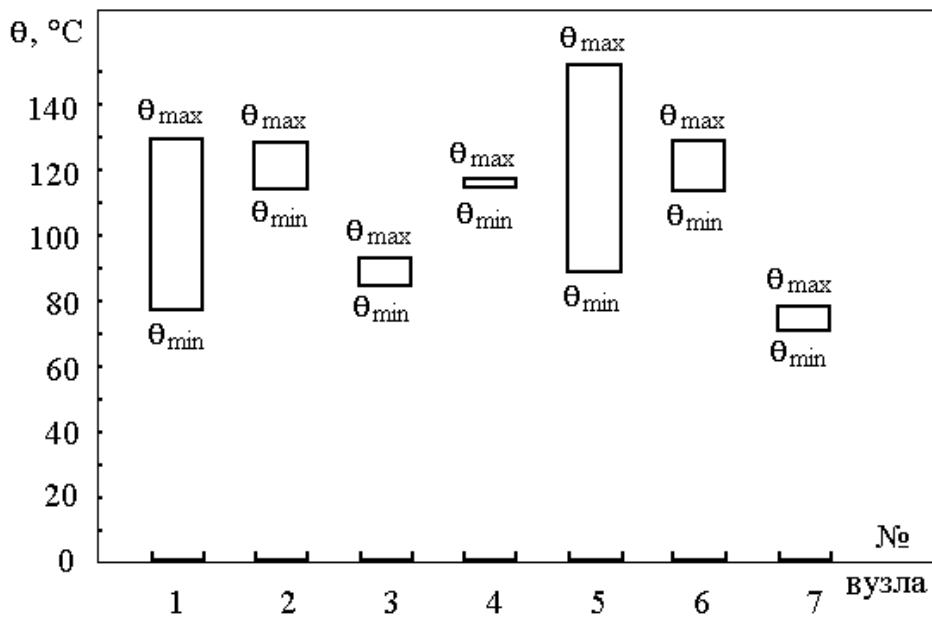


Рис. 4. Діаграма θ_{\max} і θ_{\min} вузлів АД МТН 312-6 в режимі S3 з $t_{ц} = 10$ хв і $TВ = 0.4$.

Характеристики квазіусталеного стану мають значні відмінності в різних вузлах АД. Коливання величин θ_{\max} і θ_{\min} , а, отже, і $\Delta\theta$ можна пояснити особливостями форм перехідних характеристик елементів конструкції АД. Швидкість зміни температури на початкових етапах кривих нагрівання й охолодження обмотки

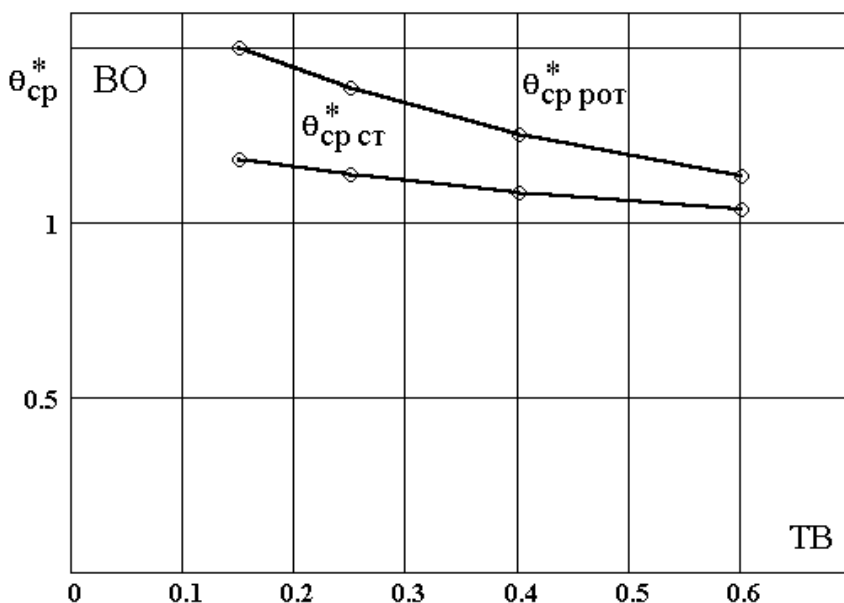


Рис. 5. Відносні перевищення середніх температур обмоток $\theta_{\text{ср ст}}^*$ і $\theta_{\text{ср рот}}^*$ в режимі S3 при різних ТВ над сталими температурами обмоток у режимі S1.

статора істотно вище, ніж у кривих ротора (рис. 1 і рис. 2). Великим швидкостям зміни температури на початкових етапах відповідає більший розмах температур. Величини $\Delta\theta$ зростають у всіх вузлах зі зменшенням ТВ. У повторно-короткочасних режимах, за інших рівних умов, обмотки електродвигунів зазнають більших теплових навантажень, ніж у тривалому режимі S1. На рис. 5 приведені відносні збільшення середніх температур циклу квазі-усталеного стану обмоток статора і ротора

АД МТН312-6 у повторно-короткочасних режимах з різними ТВ у порівнянні з тривалим режимом S1. Для всіх розглянутих режимів величини сумарних еквіва-

лентних утрат були однаковими і рівними втратам у АД при номінальному тривалому режимі S1.

З рис. 5 випливає, що середні значення температур в обмотках АД при всіх значеннях ТВ перевищують температури в тривалому режимі S1. При цьому, великі температури мають місце в обмотці ротора, а не в лобовій частині обмотки статора, як у режимі S1. Подібну зміну можна пояснити різними умовами теплоотводу в циклі повторно-короткочасного режиму (робота під навантаженням і пауза). Зі зменшенням ТВ температури в обмотках ростуть, тому що час пауз зростає. Збільшення середнього значення температури приводить до скорочення терміну служби ізоляційних матеріалів обмоток. У роботі дана оцінка зміни відносного терміну служби ізоляційних матеріалів в обмотках статора і ротора в повторно-короткочасних режимах з різними ТВ у порівнянні з тривалим режимом S1. Відносне зменшення терміну служби при ТВ (0.15 - 0.6) відповідно складало (0.13 - 0.65) для обмотки статора і (0.1 - 0.48) для обмотки ротора.

З вищевикладеного випливає, що рівність еквівалентних сумарних утрат є ненадійним критерієм оцінки теплового стану електродвигунів, що працюють у повторно-короткочасних режимах S3. Характеристики квазіусталеного стану при рівних сумарних втратах у різних режимах S3 змінюються в широких межах. При цьому термін служби ізоляційних матеріалів обмоток електродвигунів у всіх режимах S3 менше в порівнянні з відповідним тривалим режимом S1.

Приймаючи до уваги теплові перевантаження обмоток двигунів у різних повторно-короткочасних режимах при створенні електродвигунів, призначених для роботи з безупинно змінним навантаженням, а отже, і температурою обмоток, йдуть на свідоме збільшення потужності. Так на НВО «Динамо» м. Москви що проектує і випускає кранові АД, як критерій оцінки припустимих теплових перевантажень використовується максимальна температура θ_{\max} циклу квазіусталеного стану. У номінальному режимі величина θ_{\max} не повинна перевищувати припустиму температуру для даного класу ізоляції (115 °С для ізоляції класу F і 140 °С – класу H). При цьому за основу приймається повторно-короткочасний режим S3 із $t_{\text{ц}} = 10$ хв. і $ТВ = 0.4$, або однієї з ТВ, рекомендованих державним стандартом (0.6, 0.25, 0.15). Однак, при зменшенні розмаху коливань температур циклу, що має місце при зменшенні $t_{\text{ц}}$ в повторно-короткочасних режимах S4 і S5, величина середніх значень температур циклу при незмінних θ_{\max} зростає. Розрахунки показують, що в подібних ситуаціях в обмотці ротора мають місце підвищені температури, що можуть перевищити припустимі, тому для повторно-короткочасних режимів S4 і S5 критерій $\theta_{\max} < \theta_{\text{доп}}$ у лобовій частині обмотки статора також ненадійний. Актуальним у подібних ситуаціях є прогнозування температур обмоток у різних ТВ.

Розроблена методика дає можливість прогнозувати тепловий стан у різних режимах роботи електродвигунів перемінного струму, що важливо при їхньому проектуванні, виробництві й експлуатації. При підвищених навантаженнях теплові перевантаження можуть мати місце раніше, ніж наступить квазіусталений стан. У цьому випадку важливим є прогнозування припустимого числа включень, після якого температура обмоток перевищить припустиму для відповідного класу ізо-

ляції, тому необхідно мати інформацію про характеристики теплового стану в різних циклах. У роботі запропоновані методики розрахунку теплових процесів у будь-який момент часу при довільному характері навантажень.

Методика розрахунку температур при довільному характері навантажень заснована на одержанні аналітичних виражень $\theta_i(t)$ в елементах конструкції електричних машин. Для цього діаграма навантажень розбивається на інтервали з однаковими втратами й умовами охолодження. Далі поступово по приведеній вище методиці виробляється рішення системи. При визначенні коефіцієнтів питомої ваги експонент a_{ij} враховується зміною початкових умов $\theta_i(0)$ на кожному інтервалі, що розраховується як кінцеве значення температур на попередньому інтервалі. На рис. 6 як приклад приведені криві нагрівання й охолодження різних циклів АД МТН 312-6, що працюють в повторно-короткочасних режимах ($t_{ц} = 10$ хв, $TВ = 0.4$).

Запропонована методика дозволила установити істотну відмінність форм кривих нагрівання й охолодження в різних циклах. Зазначені відмінності визначаються розмаїтістю розподілу температур в елементах конструкції машин на початку кожного циклу. У загальному випадку початкові значення температур циклів залежать від різних характеристик повторно-короткочасних режимів ($t_{ц}$, $TВ$ і ін.). Вони можуть істотно впливати на характеристики теплового стану, тому облік ненульових початкових умов у нестационарних режимах роботи дуже важливий.

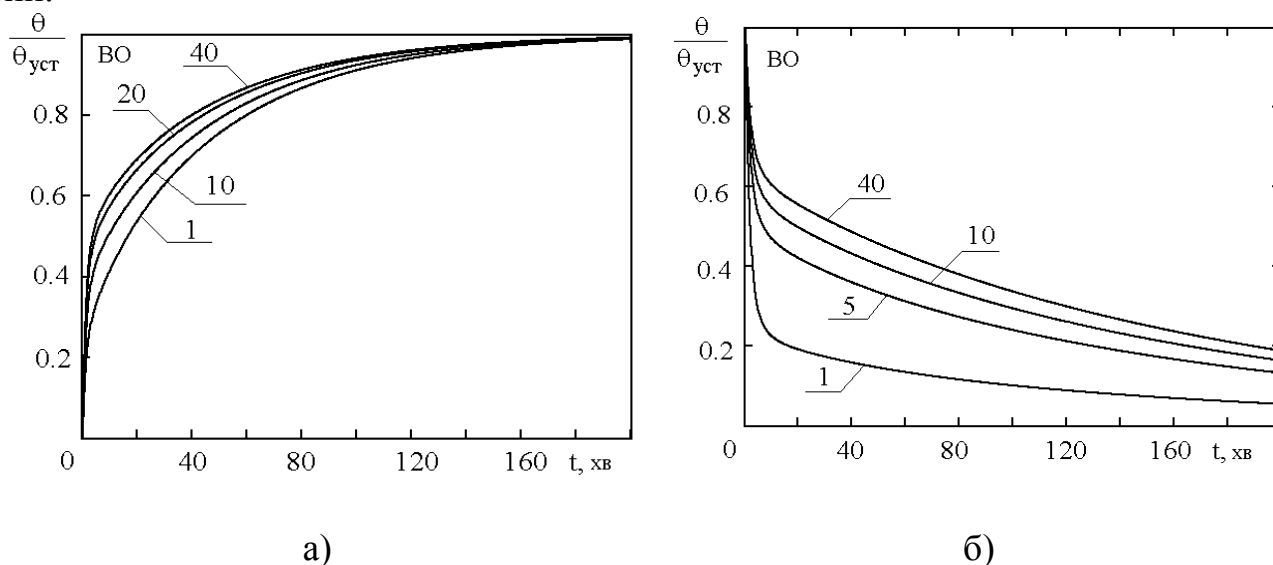


Рис. 6. Криві нагрівання (а) і охолодження (б) АД МТН 312-6 у різних циклах.

Для різних повторно-короткочасних і перемежованих режимів запропонована спрощена методика, у якій закон зміни $\theta_i(t)$ визначається у вигляді суми примушених $\theta_{i \text{ ин}}(t)$ і вільних $\theta_{i \text{ св}}(t)$ складових. При цьому зміна температури в примушеному режимі $\theta_{i \text{ ин}}(t)$ відповідає зміні температур від максимальної $\theta_{i \text{ max}}$ до мінімальної $\theta_{i \text{ min}}$ квазіусталеного стану. Вільні складові $\theta_{i \text{ св}}(t)$ являють собою обвідну мінімальних значень температур у циклах (рис. 7).

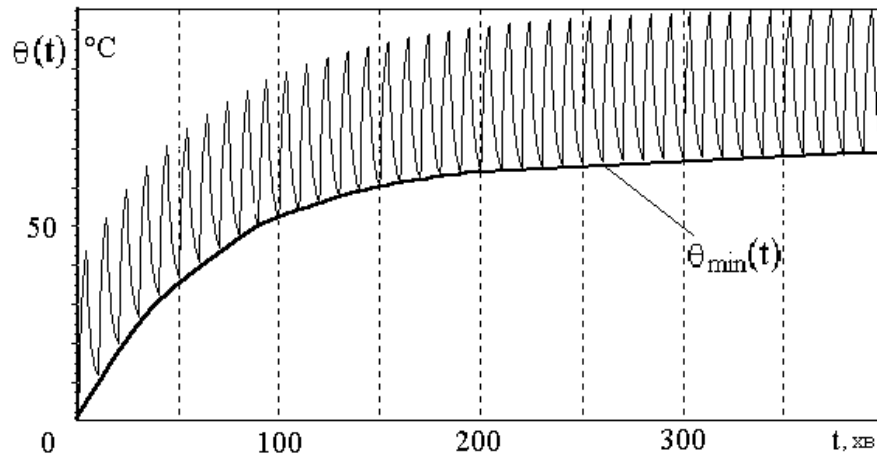


Рис. 7. Залежність $\theta(t)$ з виділеною що обводить $\theta_{\min}(t)$.

Виразження $\theta_{i_{cb}}(t)$ визначається з рішення диференціального рівняння теплового стану (1), у якому використані еквівалентні значення теплопровідності λ_{ij} і втрат $P_{\Sigma j}$.

Четвертий розділ присвячений ДТМВ електродвигунів змінного струму. Основними вимогами до них є адекватність відтворення теплових перехідних процесів у вузлах машин при довільному характері зміни навантажень. ДТМВ можна використовувати при моделюванні теплових процесів у будь-якому вузлі електричної машини, однак інтерес представляють елементи конструкції, найбільш уразливі до теплових перевантажень. Такими є обмотки або її частини. Важливою вимогою до ДТМВ є її доступність для практичного використання. Це, насамперед, відноситься до визначення параметрів моделі і використання математичного апарату при розрахунку і прогнозуванні теплових процесів у різних режимах роботи.

При теоретичному обґрунтуванні моделі було використано доведене вище положення про апроксимацію перехідних функцій вузлів аналітичним вираженням із двома експонентними складовими. Схема моделі може бути отримана як еквівалентна схема заміщення многополюсника. На рис. 8 представлена П-образна схема моделі, що включає два джерела тепла P_1 і P_2 (активні параметри моделі), теплоємності C_1 і C_2 , а також теплові провідності λ_{11} , λ_{22} , λ_{12} . По своїй

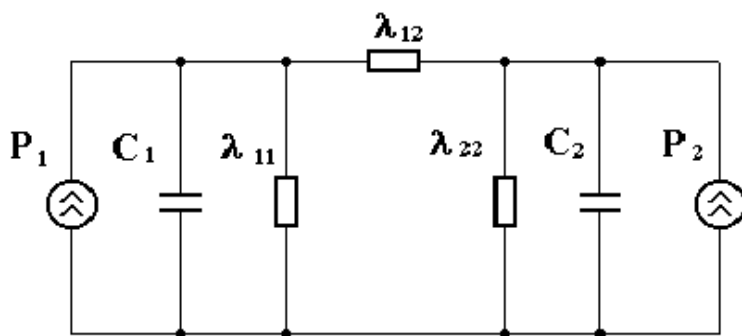


Рис. 8. Еквівалентна динамічна теплова схема заміщення вузла електричної машини.

структурі вона має вигляд двох-тільної ЕТС. Трактуювання фізичних процесів може бути наступним. У вузлі 1 формується температура обраного вузла електричної машини, а вузол 2 відбиває сумарну реакцію інших елементів конструкції на динаміку теплових процесів у розглянутому вузлі. Тоді величина P_1 відповідає втратам потужності в обраному вузлі, а C_1 – його

теплоємність, у якій акумулюється теплова енергія вузла. Якщо P_2 – сумарні втрати в інших частинах машини, то величину теплоємності C_2 варто підбирати таким чином, щоб теплова енергія, запасена в C_2 , дорівнювала сумарній енергії, акумулюємії в інших частинах машини. Наявність у схемі моделі двох нагромаджувачів енергії C_1 і C_2 свідчить про те, що у вираженні кривих перехідного процесу, формованих моделлю, маються дві експоненти. Приймаючи в увагу висновки про те, що криві нагрівання й охолодження з достатнім ступенем точності описуються еквівалентними формулами з двома експонентами, можна зробити висновок про можливість адекватного відтворення теплових перехідних процесів за допомогою представленої моделі.

У роботі запропонована методика розрахунку параметрів моделі на основі вищевикладених вимог. Вона передбачає визначення параметрів для кожного можливого режиму охолодження. Основні співвідношення отримані з умови рівності перехідних функцій в обраному елементі конструкції машини і її моделей. Вихідними даними для розрахунку є коефіцієнти аналітичних виразів перехідних функцій (5). Такими є: сталі $\theta_{i \text{ вуст}}$ (чи початкові $\theta_i(0)$) значення температур, постійні часу (T_{1i}, T_{2i}) і коефіцієнти питомої ваги експонент (a_{1i}, a_{2i}). Для їхнього одержання запропонована методика розкладання кривих нагрівання й охолодження на експонентні складові, у тому числі і неповних кривих нагрівання. Це може бути використане при прогнозуванні сталих температур, коли немає можливості одержати повну криву нагрівання при підвищених навантаженнях.

Експериментальні криві нагрівання й охолодження, побудовані у відносних одиницях, мають інтегральний характер і визначаються масогабаритними показниками і режимом охолодження. Вони практично збігаються у всіх машин одного типорозміру. Це означає, що пасивні параметри моделі (теплопровідності і теплоємності) єдині для всіх машин одного типорозміру. Можливі зміни форм кривих, а також сталих значень температур визначаються величинами і співвідношеннями постійних і перемінних утрат, що у різних машин одного типорозміру можуть змінюватися в досить широких межах. Пасивні параметри моделі являють собою своєрідний «тепловий паспорт» електричної машини. Вони можуть бути занесені в каталог подібно опорам схем заміщення.

Передбачена також корекція параметрів моделі для забезпечення адекватного відтворення теплових перехідних процесів при ненульових початкових умовах. З цією метою здійснюється порівняння експериментальних і розрахункових кривих у повторно-короткочасних режимах. У табл. 3 приведені результати порівняння експериментальних і розрахункових кривих ДТМВ для пазової частини обмотки статора АД типу МТН 312-6, що працює в режимі S3 при $t_{ц} = 10$ хв і $TВ = 0.4$.

У табл. 3 приведені розрахункові значення коефіцієнтів питомої ваги експонент (a_1, a_2), що при відомих постійних часу (T_1, T_2) дозволяють судити про форму кривих на різних інтервалах циклів. Порівняння їх з рис. 6 підтверджує тенденцію зміни форми кривих у різних циклах при змінних початкових умовах

Таблиця 3

Порівняльні розрахункові й експериментальні характеристики пазової частини обмоток статора АД МТН 312-6 у різних циклах номінального режиму S3.

Номер Циклу	1-й інтервал (нагрівання)				2-й інтервал (охолодження)			
	Розрахунок			Експер.	Розрахунок			Експер.
	$a_{1нг}$	$a_{2нг}$	$\theta_{max} / \theta_{вуст}$	$\theta_{max} / \theta_{вуст}$	$a_{1ох}$	$a_{2ох}$	$\theta_{max} / \theta_{вуст}$	$\theta_{max} / \theta_{вуст}$
1	0,670	0,330	0,386	0,323	0,167	0,833	0,164	0,11
2	0,697	0,303	0,488	0,425	0,237	0,763	0,235	0,172
3	0,693	0,307	0,538	0,471	0,295	0,705	0,28	0,218
4	0,685	0,315	0,584	0,531	0,339	0,661	0,32	0,263
5	0,676	0,324	0,629	0,576	0,373	0,627	0,359	0,303
10	0,644	0,356	0,78	0,739	0,459	0,541	0,465	0,425
20	0,620	0,380	0,91	0,88	0,503	0,497	0,551	0,434
Кв.уст.	0,614	0,386	0,93	0,91	0,513	0,487	0,583	0,568

Важливим достоїнством ДТМВ, що забезпечує високу якість моделювання, є той факт, що вихідними даними для розрахунку їхніх параметрів використовуються характеристики динаміки теплових процесів із врахуванням ненульових початкових умов. Пасивні параметри моделі однакові для всіх машин одного типорозміру, тому ДТМВ має добрі перспективи для практичного застосування в системах контролю і прогнозування теплового стану. Вони можуть бути записані в каталог у вигляді «теплового паспорту» для подальшого використання при прогнозуванні теплового стану АД в різних режимах роботи і створенні пристроїв їх теплового захисту.

У **п'ятому розділі** проведені дослідження динаміки теплових процесів у найбільш розповсюджених аномальних режимах роботи. Для АД до їхнього числа можна віднести: робота АД при нерухомому роторі (чи заклинювання; пуск з обривом фази обмотки статора); зміна напруги живлення і різних видів несиметрії.

Робота АД з нерухомим ротором має місце при його заклинюванні або пуску з обірваною фазою й ін. Подібні режими характеризуються 6-8-кратними струмами в обмотках, що приводить до різкого збільшення температури. При цьому небезпеку представляють не тільки абсолютні значення температур θ , але і швидкість їх наростання $d\theta/dt$. Руйнування може відбутися раніше, ніж температура обмоток досягне припустимої. Динаміка теплових процесів може бути описана рівнянням стану (1). При цьому варто мати на увазі, що матриця теплопровідностей λ розрахована з умови нерухомого стану ротора. Приймаючи до уваги, що при загальмованому роторі зміна температури має адіабатичний характер, рівняння стану справедливо тільки на початкових етапах перехідних процесів. Швидкість наростання температури при цьому найбільша. При нульових початкових умовах (приймаючи в увагу (1)) вона визначається по формулі

$$\frac{d\theta(0)}{dt} = C^{-1} \cdot P \quad (8)$$

З аналізу випливає, що при кратностях струму більш $5 I_n$ швидкість наростання температури в обмотці статора досягає небезпечних значень (8 град/с). Необхідно відзначити, що при менших кратностях струму аварійний стан настає досить швидко. Наприклад, за результатами розрахунку й експерименту АД МТН 111-6 випливає, що при нерухомому роторі і струмі $2 I_n$ температура лобової частини обмотки статора досягає припустимої через 3 хв.

Зміна напруги мережі приводить до істотних змін струмових навантажень в обмотках. Подібні зміни непропорційні. Наприклад, при зменшенні напруги до $0.8 U_n$ струм в обмотці статора АД МТН 312-6 зростає в 1.19 рази, а в обмотці ротора в 1.53 рази. Збільшення напруги до $1.2 U_n$ приводить до росту струму обмотки статора в 1.08 рази, а в обмотці ротора до зменшення до 0.73.

При розрахунку теплового стану можуть бути використані приведені вище методи. Умови охолодження залишаються практично незмінними, а в розрахунку варто врахувати зміну потужності джерел тепла, зв'язану зі зміною струмів в обмотках і втрат у сталі, пропорційних квадрату напруги. Відповідно до розрахунків температура обмотки статора АД МТН 312-6 при зниженні напруги до величини $0.8 U_n$ зростає в 1.39 рази, а обмотки ротора в – 1.73 рази, що означає необхідність зниження навантаження. На рис. 9 приведені експериментальні криві нагрівання лобової частини обмотки статора при різних напругах і знижених навантаженнях, величина яких знижувалася таким чином, щоб струм в обмотці статора дорівнював номінальному.

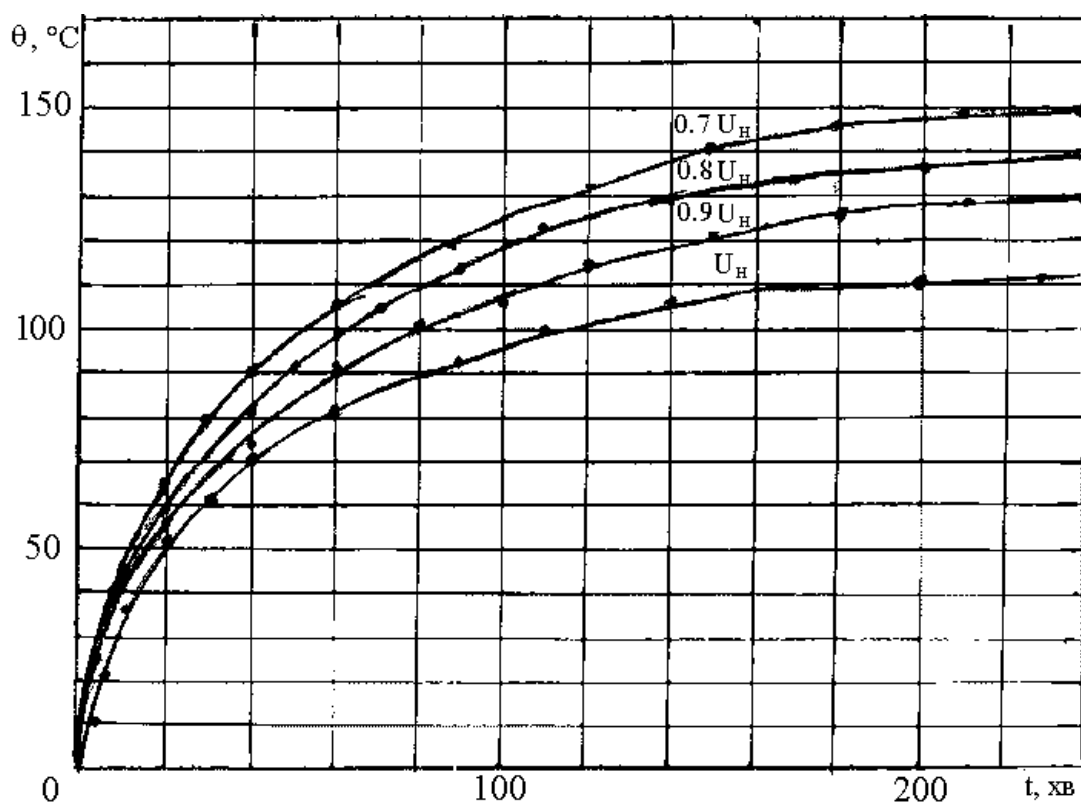


Рис. 9. Криві нагрівання АД МТН 111-6 при $I = I_n$ і різних напругах.

З рис. 9 випливає, що при номінальному струмі сталі температури обмотки статора зростають зі зменшенням напруги за рахунок підвищених втрат в обмотці

ротора. З цього виходить, що номінальний струм статора не може бути критерієм зниження навантаження. Його необхідно знижувати в більшому ступені.

Зниження напруги приводить до значних теплових перевантажень у повторно-короткочасних режимах. Пуск під навантаженням короткозамкнених АД може привести до значного збільшення часу пуску, а отже, і збільшенню теплової енергії при пуску.

Шостий розділ присвячено розробці вимог і принципам побудови систем контролю, діагностики і прогнозування електричних машин. Застосування систем автоматизованого контролю і прогнозування теплового стану дозволить у значній мірі ефективно вирішувати цілий комплекс практичних питань, що виникають у процесі виробництва й експлуатації електричних машин, особливо для тих, у яких мають місце нестационарні теплові процеси. Найважливішою вимогою до системи є моделювання в ній динаміки теплових процесів. Розроблений математичний апарат дозволяє вирішувати задачі моделювання теплових перехідних процесів у різних режимах роботи з визначеною точністю. Його застосування вимагає наявності ефективних моделей. Добрі перспективи мають динамічні теплові моделі вузлів. Вони можуть успішно використовуватися в системах контролю температури обмоток і пристроях захисту від теплових перевантажень. Було розроблено ряд пристроїв теплового захисту АД з використанням ДТМВ (УТНЗ-4, УТНЗ-5 і ін.). Вони пройшли успішну апробацію в промислових умовах на різних підприємствах (на металургійних заводах м. Маріуполь, м. Донецька; на Угледорській, Луганській і Слов'янській ГРЕС і інших підприємствах).

ДТМВ можуть бути використані при побудові систем автоматизованих випробувань і прогнозування теплового стану електричних машин у різних режимах роботи. Для забезпечення роботи системи необхідно наступне. У програму випробувань на нагрівання необхідно включити досліди по зняттю кривих нагрівання й охолодження в тривалому режимі S_1 , а також криву нагрівання в одному з їхніх повторно-короткочасних режимів. Отримані дані на етапі приймальних випробувань дозволяють по викладеній вище методиці визначити пасивні параметри ДТМВ при різних режимах охолодження і записати їх в ЕОМ у виді «теплового паспорта». Крім того, на етапі приймальних випробувань варто проводити дослід холостого ходу при різних напругах, досвід під навантаженням і дослід короткого замикання. Використовуючи отримані результати, по відомих методиках розраховуються параметри Т-подібної схеми заміщення з урахуванням нелінійних залежностей параметрів намагнічувального контура, (r_0, x_0) від напруги U_0 , а для короткозамкнених двигунів - параметрів вторинного контура (r_2', x_2') у функції ковзання. Отримані залежності у відносних одиницях єдині для всіх машин одного типорозміру. Вони також заносяться в пам'ять ЕОМ. Параметри Т-подібної схеми заміщення дозволяють розраховувати потужність джерел тепла на інтервалах довільної діаграми навантажень, що разом з пасивними параметрами ДТМВ дає можливість розраховувати теплові перехідні процеси.

Записані в пам'яті ЕОМ параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях можуть бути використані для розрахунку втрат будь-якої електричної машини одного типорозміру. Для цього досить мати результати дослідів по виміру опору обмотки статора, а також досвідів холостого ходу і короткого замикання,

що передбачені для кожної машини, яка випускається, у програмі приймально-здавальних випробувань. Таким чином, мається можливість прогнозування теплового стану кожної машини, що випускається, у довільному режимі роботи з обліком їхніх індивідуальних характеристик.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано теоретичне узагальнення і рішення актуальної наукової проблеми прогнозування теплового стану елементів конструкції електродвигунів змінного струму в нестационарних режимах їх роботи, що полягає у розкритті впливу характеру теплових перехідних процесів на надійну експлуатацію двигунів і терміни їхньої служби, у науковому обґрунтуванні методів розрахунку теплових перехідних процесів і технічному рішенні контролю і прогнозування теплового стану, що дозволяє здійснювати захист обмоток від перегріву, визначати припустимі навантаження і вводити корекції в навантажувальну діаграму електродвигунів.

1. Проаналізовано існуючі в даний час методи прогнозування теплового стану обмоток електродвигунів, що визначають їхню потужність у нестационарних режимах і діаграму навантажень. Більшість їх заснована на непрямій оцінці температури по величині еквівалентних втрат в елементах конструкції двигуна, що приводить до значних помилок у нестационарних режимах роботи. Випробування на нагрівання при виробництві електродвигунів здійснюється з головним зразком в одному з можливих повторно-короткочасних режимів. Судження про теплові навантаження кожної машини, що випускається, здійснюється побічно за результатами приймально-здавальних випробувань шляхом порівняння втрат із утратами головного зразка при проведенні іспитів на нагрівання. Практично відсутні методи прогнозування температур обмоток двигунів у нестационарних режимах.

2. Обґрунтовано використання кривих нагрівання й охолодження як основний показник, що відображає властивості динаміки теплових процесів. Розроблено методику розрахунку теплових перехідних процесів з одержанням аналітичних виражень температури $\theta(t)$ у різних елементах конструкції електродвигунів змінного струму, що дозволяють виділити кількісні характеристики для оцінки динаміки теплового стану. Виявлено характерні відмінності теплових перехідних процесів у різних вузлах конструкції машин і встановлено їхній зв'язок з особливостями поширення теплових потоків. Установлено вплив різних факторів (рівень струмових навантажень в обмотках, функціональна залежність опорів обмоток від температури й ін.) на характер теплових перехідних процесів. На основі спільності кількісних характеристик показана можливість апроксимації кривих нагрівання й охолодження аналітичними виразами з двома експонентними складовими. Запропоновано методику розкладання експериментальних кривих нагрівання й охолодження на експонентні складові, що дозволяє одержувати кількісні характеристики для судження про особливості теплових процесів за результатами випробувань на нагрівання.

3. Досліджено динаміку теплових процесів у повторно-короткочасних і перемежованих режимах роботи. Розроблено методику одержання аналітичних виразів температури $\theta(t)$ на довільному інтервалі циклу повторно-короткочасного і перемежованого режимів при різних діаграмах навантажень у циклі з урахуванням безупинно змінних початкових умов $\theta(0)$ на межах інтервалів, що дозволило одержувати кількісні характеристики для судження про особливості теплових перехідних процесів на різних тимчасових інтервалах. Для квазіусталеного стану досліджено вплив характеристик повторно-короткочасних і перемежованих режимів ($t_{ц}$, ТВ, пускові характеристики й ін.) на кількісні показники теплового стану в циклі. Запропоновано методику прогнозування теплових характеристик квазіусталеного стану при різному характері навантажень у циклі, що дозволяє формувати діаграму навантажень у циклі, яка виключає теплові перевантаження в обмотках електродвигунів змінного струму. Запропонована методика прогнозування теплового стану дозволяє визначати припустиме число включень двигунів, що працюють у повторно-короткочасних чи перемежованих режимах з підвищеними навантаженнями.

4. Науково обґрунтовано вибір схеми динамічної теплової моделі вузлів (ДТМВ) електродвигунів. Розроблено методику розрахунку параметрів ДТМВ на основі використання кривих нагрівання й охолодження, а також розподілу втрат, отриманих експериментальним шляхом. На основі порівняльного аналізу кривих теплового перехідного процесу в обраному вузлі машини і моделі при роботі в повторно-короткочасному режимі передбачена корекція параметрів ДТМВ, що підтверджує здатність адекватно відтворювати за допомогою ДТМВ динаміку теплового стану при довільному характері навантажень. Доведено, що пасивні параметри моделі єдині для всіх машин одного типорозміру. і можуть бути записані в каталоги електричної машини у вигляді «теплового паспорта». Використання «теплового паспорта» дозволяє прогнозувати тепловий стан у різних режимах роботи кожного електродвигуна відповідного типорозміру, що випускається. Відмінні риси динаміки теплового стану здійснюються завдяки обліку втрат, що можуть бути отримані для кожної машини при приймально-здавальних іспитах і перелічені для відповідних навантажень. ДТМВ можуть забезпечувати контроль і прогнозування теплового стану в будь-якому елементі конструкції електричної машини, у тому числі і для її обертових частин.

5. Проведено дослідження особливостей теплових процесів у характерних аномальних режимах АД: робота з загальмованим ротором, при зниженій напрузі й у несиметричних режимах. Установлено, що при загальмованому роторі найбільш уразливою до теплових перевантажень є лобова частина обмотки статора, у якій швидкість наростання температури може перевищити 8 град/с, коли руйнування ізоляції може відбутися при температурі менше припустимої. У пристроях захисту необхідно передбачити відключення АД, що працюють із загальмованим ротором, через (3-4) часу пуску $t_{п}$. При роботі АД зі зниженою напругою мають місце теплові перевантаження в обмотках, особливо в обмотці ротора. Для АД з фазним ротором повинний бути передбачений контроль температури в обмотці ротора. Доведено, що для прогнозування і контролю температурного стану обмо-

ток при знижених напругах можуть бути використані ДТМВ, а в пристроях захисту необхідно передбачити вузол формування втрат у АД при знижених напругах. Показано, що при роботі АД в несиметричних режимах роботи мають місце підвищені втрати, зв'язані з наявністю складових зворотної послідовності, а отже і можливі теплові перевантаження. Обґрунтовано застосування ДТМВ в пристроях теплового захисту при наявності несиметрії. Однак при глибокій несиметрії (обривши фази статора) у пристроях захисту передбачено відключення АД, щоб уникнути роботи з загальмованим ротором.

6. Вирішено комплекс задач по використанню ДТМВ в ряді пристроїв контролю, діагностики і прогнозування теплового стану електродвигунів змінного струму, а саме:

- розроблено і створено ряд пристроїв аналогового теплового захисту (УАТЗ-2, УАТЗ-4М, УТНЗ-4 і ін.), заснованих на непрямій оцінці температури без вмонтування датчиків в обмотки, ефективність яких підтверджена досвідом промислової експлуатації на ряді підприємств;

- розроблена і випробувана в лабораторних умовах система прискорених теплових випробувань, що дозволяє судити про припустимі теплові навантаження кожного електродвигуна, що випускається, у різних режимах роботи;

- розроблено систему прогнозування теплового стану обмоток електродвигунів при довільно заданій діаграмі навантажень, що дозволяє здійснювати вибір потужності двигунів і, при необхідності, вводити корекцію в діаграму навантажень з метою забезпечення їхньої експлуатації без перевищення припустимих температур обмоток; використання мікропроцесорної техніки дозволяє робити облік ресурсу ізоляційних матеріалів, що витрачається.

Результати виконаної роботи дозволяють стверджувати, що комплекс проведених у ній досліджень складає рішення великої наукової проблеми. Вони обґрунтовують доцільність і ефективність створення і впровадження в широких масштабах систем контролю, діагностики і прогнозування теплового стану обмоток електродвигунів змінного струму в різних режимах роботи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Федоров М.М. Принципы построения систем автоматизированных испытаний и прогнозирования теплового состояния асинхронных двигателей // Сб. тр. ДГТУ. Сер. электротехника и энергетика. – Донецк - 1998. - Вып. 2. - С. 152-158.

2. Федоров М.М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин // Електромашинобудування та електрообладнання. – К. - 1999. - № 53. - С. 70-73.

3. Федоров М.М. Автоматизация тепловых испытаний электрических машин // Зб. праць ДонДТУ. Сер. обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк – 1999. - Вип. 12. - С. 111-117.

4. Федоров М.М. Моделирование теплового состояния узлов электрических машин в различных режимах работы // Зб. праць ДонДТУ. Сер. проблеми моде-

лювання та автоматизації проектування динамічних систем. – Донецьк – 1999. - Вип. 10. - С. 90-95.

5. Федоров М.М. Защита асинхронных двигателей проходческих лебедок от тепловых перегрузок // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. горно-электромеханическая. – Донецк - 1999. - Вып. 7. - С. 228-232.

6. Федоров М.М. Контроль и прогнозирование теплового состояния электродвигателей прокатных станов // Зб. праць ДонДТУ. Сер. металургія. – Донецьк – 1999. - Вип. 14. - С. 118-123.

7. Фёдоров М.М. Повышение эксплуатационного ресурса электрических машин на основе контроля теплового старения изоляционных материалов // Современные технологии ресурсоэнергосбережения. Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – К. - 1997. - Вып.2. - кн. 3. - С. 77-79.

8. Федоров М.М. - Контроль и прогнозирование динамики теплового состояния асинхронных двигателей // Современные технологии ресурсоэнергосбережения. Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – К. - 1997. - Вып.2. - кн. 2. - С. 59-61.

9. Федоров М.М. Моделирование динамики теплового состояния электрических машин при повторно-кратковременных режимах работы // Техническая электродинамика. – К. - 2000. - № 4. - С. 38-42.

10. Фёдоров М.М. Особенности тепловых переходных процессов в узлах асинхронного двигателя при различных режимах работы // Электромашиностроения та електрообладнання. – К. - 2000. - № 54. - С. 71-75.

11. Федоров М.М. Особенности тепловых процессов в обмотках электродвигателей буровых станков // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. горно-геологическая. – Донецк. - 2000. - Вып. 11. - С. 37-43.

12. Некоторые особенности построения тепловых защит / Федоров М.М., Дудник М.З., Михайлов В.Е., Паркесов В.Г. / Техническая электродинамика. – К. –1983. - №5. - С. 93-97.

Здобувач провів постановку задачі побудови пристроїв теплового захисту з непрямим контролем температури та запропонував вибір схеми теплового аналога і методика розрахунку його параметрів.

13. Опыт применения системы автоматизированных испытаний и прогнозирования электромеханических и тепловых характеристик асинхронных двигателей / Захарченко П.И., Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р., Карась С.В. / Уголь Украины. - К. - 1998. - № 7. - С. 45-48.

Здобувач обґрунтував побудову систем автоматизованих іспитів і прогнозування характеристик АД. використання динамічних теплових моделей вузлів АД в системах контролю і прогнозування та алгоритм їхньої роботи.

14. Прогнозирование динамики тепловых процессов в сборочных единицах электрических машин по экспериментальным кривым нагрева и охлаждения / Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р., Карась С.В. / Взрывозащищенное электрооборудование, Донецк. - 1998. - С. 42-50.

Здобувач обґрунтував методи апроксимації експериментальних кривих нагрівання й охолодження аналітичними виразами у вигляді суми двох експонентних

складових, зробив вибір великої і малої постійних часу експонент і їхні коефіцієнти питомої ваги, запропонував методи апроксимації неповних кривих нагрівання аналітичним виразом у вигляді суми двох експонент.

15. Федоров М.М., Денник В.Ф., Малеев Д.М. Контроль температурного состояния обмоток асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме работы // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика. – Донецк. - 1999. - Вып. 4. - С. 127-130.

Здобувач запропонував вимоги до пристроїв контролю температури обмоток АД, що працюють у повторно-короткочасних режимах роботи, методи моделювання динаміки теплових процесів в обмотках АД, структурну схему пристрою та здійснив вибір елементної бази й алгоритму роботи.

16. Федоров М.М., Малеев Д.М. Микропроцессорная система контроля тепловых и электромеханических характеристик асинхронных двигателей // Зб. праць ДонДТУ. Сер. інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк. – 1999. - Вип. 6. - С. 310-314.

Здобувач запропонував особливості побудови мікропроцесорних систем контролю теплових і електромеханічних характеристик АД, методи обліку ресурсу ізоляційних матеріалів, що витрачається, обґрунтував структурну схему системи та особливості алгоритму роботи системи.

17. Ковалев Е.Б., Федоров М.М., Алексеев Е.Р. О влиянии потокосцеплений рассеяния на электромеханические и тепловые характеристики асинхронных двигателей // Взрывозащищенное электрооборудование – Донецк. - 1999. - С. 14-18.

Здобувач провів порівняльний аналіз електромеханічних і пускових характеристик при різних індуктивних опорах x_1 у схемі заміщення АД.

18. Федоров М.М., Смирнов А.И., Малеев Д.М. Пути повышения эксплуатационной надежности электродвигателей элеваторов обогатительных фабрик // Известия Донецкого горного института. – Донецк. – 1999. - С. 74-78.

Здобувач обґрунтував побудову системи контролю теплового стану короткозамкнених АД елеваторів збагачувальних фабрик та запропонував алгоритм їхньої роботи на базі 4-х тільній ЕТС.

19. Федоров М.М., Малеев Д.М. Применение микропроцессорных систем для контроля и прогнозирования теплового состояния асинхронных двигателей // Зб. праць ДонДТУ. Сер. электротехника и энергетика. – Донецьк. – 2000. - Вип. 21. - С. 133-136. *Здобувач запропонував принципи побудови мікропроцесорних систем контролю і прогнозування теплового стану АД, структурну схему системи та вимоги до основних блоків системи а також до алгоритм її роботи.*

20. Федоров М.М., Малеев Д.М., Смирнов А.И. Система теплового контроля обмоток группы асинхронных двигателей на обогатительных фабриках // Зб. праць ДонДТУ. Сер. інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк. – 2000. - Вип. 6. - С. 214-219.

Здобувач запропонував особливості побудови систем теплового контролю групи АД, алгоритм її роботи, вимоги до блоків системи.

21. Федоров М.М., Шумяцкий В.М., Марков М.А. Особенности динамики теплового состояния электродвигателей очистных комбайнов // Оптимизация производственных процессов. – Севастополь. – 2000. - № 3. - С.112-117.

Здобувач запропонував методи розрахунку динаміки теплового стану електродвигунів очисних комбайнів з урахуванням особливості їхньої діаграми навантажень, звійснив порівняльний аналіз теплових перехідних процесів в обмотках АД очисних комбайнів у різних режимах роботи.

22. Федоров М.М., Алексеев Е.Р. Тепловое состояние асинхронных двигателей при изменении напряжения сети // Зб. праць ДонДТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2000. - Вип. 17. - С. 82-86.

Здобувач запропонував методи прогнозування теплового стану елементів конструкції АД при коливаннях напруги мережі, та провів дослідження теплового стану АД при різних напругах і коефіцієнтах навантаження.

23. Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р. Особенности тепловых процессов в асинхронных двигателях при аномальных режимах работы // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів. - 2000. - № 403. - С. 170-174.

Здобувач обґрунтував методи аналізу теплових перехідних процесів у АД при аномальних режимах їхньої роботи та запропонував алгоритм розрахунку характеристик теплового стану АД при аномальних режимах їхньої роботи.

24. Особенности динамики тепловых процессов в элементах конструкции асинхронных двигателей при кратковременном режиме работы / Федоров М.М., Денник В.Ф., Малеев Д.М., Горелов М.В./ Зб. праць ДонНТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2001. - Вип. 28. - С. 60-63.

Здобувач запропонував методи прогнозування динаміки теплового стану обмоток АД в номінальному режимі.

25. Защита от тепловых перегрузок асинхронных двигателей, работающих при пониженном напряжении / Ковалев Е.Б., Федоров М.М., Алексеев Е.Р., Пинчук О.Г. / Взрывозащищенное электрооборудование – Донецк. - 2001. - С. 25-30.

Здобувач запропонував принципи побудови мікропроцесорних пристроїв теплового захисту АД, що працюють при знижених напругах та навів структурну схему й алгоритм її роботи.

26. Основы построения системы контроля расхода ресурса изоляционных материалов обмоток электрических машин / Федоров М.М., Денник В.Ф., Михайлов В.Е., Малеев Д.М. / Зб. праць ДонНТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2002. - Вип. 41. С. 57-60.

Здобувач запропонував методику оцінки терміну служби й оцінки залишкового ресурсу ізоляційних матеріалів електричних машин при безупинному змінненні температури їхніх обмоток.

27. Федоров М.М., Малеев Д.М. Системы прогнозирования теплового состояния асинхронных двигателей // Зб. праць ДонДТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2002. - Вип. 50. - С. 40-43.

Здобувач навів особливості побудови системи прогнозування теплового стану обмоток АД, що працюють у повторно-короткочасних режимах з части-

ми пусками та методика обліку зміни теплового стану обмоток АД при різних пускових характеристиках.

28. Особенности построения устройств температурной защиты многоскоростных асинхронных электродвигателей / Федоров М.М., Апухтин М.В., Пинчук О.Г., Марков А.А. / Зб. праць ДонНТУ. Сер. обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк. – 2002. - Вип. 47. - С. 291-297.

Здобувач обґрунтував побудову пристроїв теплового захисту багатошвидкісних АД з використанням теплових моделей обмоток та навів алгоритм її роботи.

29. Особенности динамики теплового состояния многоскоростных асинхронных двигателей / Лазебник Р.М., Федоров М.М., Апухтин М.В., Марков А.А. / Взрывозащищенное электрооборудование – Донецк. - 1999. - С. 19-24.

Здобувач обґрунтував методи розрахунку динаміки теплового стану багатошвидкісних АД та побудови їх еквівалентної теплової схеми заміщення; навів методи оцінки характеристик динаміки теплового стану.

30. Аналоговая защита асинхронных крановых двигателей / Дудник М.З., Федоров М.М., Паркесов В.Г., Михайлов В.Е. / Электротехника. – М. –1982. - №11. - С. 58-59.

Здобувач здійснив вибір і опис структурних схем пристроїв аналогового теплового захисту УАТЗ 1 і УАТЗ 2, та обґрунтував вимоги до елементів конструкції пристроїв.

31. Федоров М.М., Михайлов В.Е., Паркесов В.Г. Особенности моделирования теплового состояния двигателя в повторно-кратковременных режимах работы // Перспективы развития производства асинхронных двигателей в свете решений 26 съезда КПСС. – Владимир. - 1983. - С. 141-145.

Здобувач обґрунтував використання схеми теплового аналога з двома нагромаджувачами енергії для моделювання теплових перехідних процесів в обмотках АД, що працюють у повторно-короткочасних режимах роботи.

32. Повышение надежности работы крановых электродвигателей при введении аналоговой защиты в систему электроснабжения крана / Дудник М.З., Федоров М.М., Опенько В.П., Паркесов В.Г. / Промышленная энергетика. – М. – 1983. - №1. - С. 18-19.

Здобувач здійснив аналіз умов експлуатації електродвигунів грейферних кранів та обґрунтував вимоги до пристрою аналогового теплового захисту (УАТЗ 2) і його елементам конструкції.

33. Fedorov M., Dennik V., Alekseev E. The system of automatic trial and prognosis of electric mechanical and thermal testimonial of asynchronous engines. // World Mining Congress, 13th International Conference of Automation in Mining. September 8-11, 1998.- High Tatras. Slovak Republic. - 1998. – P. 93-96.

Здобувач навів особливості побудови систем автоматизованих прискорених теплових випробувань і прогнозування температури обмоток у різних режимах та запропонував методика оцінки теплового стану обмоток АД за результатами прийнятно-здавальних іспитів.

34. Федоров М.М., Рак А.Н. К вопросу о прогнозировании остаточного срока службы изоляции электрических машин // Известия вузов. Электромеханика. – Новочеркасск. - 1997. - № 1, 2. - С. 6-8.

Здобувач обґрунтував методіку розрахунку термінів служби і залишкового ресурсу ізоляційних матеріалів обмоток електричних машин при їх безупинно змінній температурі.

35. Федоров М.М., Денник В.Ф., Малеев Д.М. Микропроцессорная система контроля и прогнозирования теплового состояния электродвигателей в повторно-кратковременных режимах работы // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – Таганрог. - 2000. - С. 248-254.

Здобувач здійснив порівняльний аналіз пристроїв теплового захисту і систем прогнозування теплового стану обмоток АД, що працюють у повторно-короткочасних режимах з частими пусками, обґрунтував використання мікропроцесорних систем контролю і прогнозування теплового стану АД в різних повторно-короткочасних (S3-S5) і перемежованих режимах (S6-S8). Використання динамічних теплових моделей вузлів АД в мікропроцесорних системах захисту.

36. Федоров М.М., Алексеев Е.Р. Методы расчета теплового состояния двигателей при изменении напряжения сети // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – Таганрог. – 2001. - №3. - С. 58-62.

Здобувач навів особливості динаміки теплового стану у вузлах АД при різних напругах мережі і коефіцієнтах навантаження.

37. Алексеев Е.Р., Федоров М.М., Сорокина Л.С. Моделирование теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременном режиме // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – Таганрог. - 2002. № 2(25). - С. 34-36.

Здобувач здійснив порівняльний аналіз методів оцінки теплового стану обмоток АД, що працює в різних повторно-короткочасних режимах при коливаннях напруги мережі та обґрунтував середню температуру обмоток АД в квазіусталеному стані як критерію надійної експлуатації.

38. Федоров М.М. Тепловые переходные процессы в узлах асинхронного двигателя при различных коэффициентах нагрузки // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика. – Донецк. - 1998. - Вып. 2. - С. 159-165.

39. Федоров М.М., Алексеев Е.Р. Влияние колебания напряжения сети на электромеханические и тепловые характеристики асинхронных двигателей // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика. – Донецк. - 1998. - Вып. 2. - С. 172-177.

Здобувач здійснив постановку задачі розрахунку характеристик АД при різних напругах мережі та навів алгоритм розрахунку робочих характеристик АД і тепловий стан при коливаннях напруги мережі.

40. Федоров М.М., Денник В.Ф., Кучеренко А.А. Микропроцессорные системы защиты асинхронных двигателей от тепловых перегрузок // Сб. тр. ДонГТУ.

Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. - 1998. - Вип. 2. - С. 166-171.

Здобувач навів структурну схему мікропроцесорного теплового захисту АД та зробив вимоги до елементів її конструкції; здійснив вибір теплової моделі та алгоритму її роботи.

41. Исследование влияния несимметрии питающих напряжений на электро-механические характеристики асинхронного двигателя и его тепловое состояние / Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р., Карась С.В. // Взрывозащищенное электрооборудование. – Донецьк. - 1998. - С. 32-42.

Здобувач навів методи обліку несиметрії напруги живлення при розрахунку електромеханічних і теплових характеристик АД, особливості застосування динамічних теплових моделей вузлів для оцінки теплового стану обмоток АД в несиметричних режимах.

42. Федоров М.М., Карась С.В. Анализ тепловых переходных процессов в сборочных единицах электрических машин методом разложения кривых нагрева и охлаждения на экспоненциальные составляющие // Взрывозащищенное электрооборудование. - Донецьк. - 1998. - С. 50-56.

Здобувач навів методику апроксимації експериментальних кривих нагрівання й охолодження аналітичними виразами з довільною кількістю експонент, здійснив порівняння аналітичних виражень кривих нагрівання й охолодження, отриманих шляхом рішення системи диференціальних рівнянь теплового стану і методами апроксимації.

43. Федоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко А.В. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. - 1999. - Вип. 4. - С. 138-141.

Здобувач навів методику розрахунку характеристик АД при несиметрії джерел живлення. Побудова еквівалентної теплової схеми заміщення АД з урахуванням несиметрії та методи аналізу температурного стану АД при несиметрії джерел.

44. Федоров М.М., Алексеев Е.Р., Горелов М.В. Пусковые и рабочие характеристики асинхронных двигателей при различных напряжениях сети // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. - 1999. - Вип. 4. - С. 123-126.

Здобувач здійснив постановку задачі, навів методику розрахунку робочих характеристик АД при коливаннях напруги мережі.

45. Федоров М. М., Денник В.Ф. Тепловое состояние электродвигателей переменного тока при обрывах параллельных ветвей статорных обмоток // Зб. праць ДонДТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2000. - Вип. 17. - С. 87-91.

Здобувач навів методи розрахунку робочих і теплових характеристик АД при обриві паралельних гілок в обмотці статора, здійснив порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних характеристик АД при обривах паралельних віток в обмотці статора, навів еквівалентну теплову схему заміщення АД при обриві паралельних гілок в обмотці статора.

46. Фёдоров М.М., Денник В. Ф., Черноус В.П. Защита электродвигателей переменного тока от несимметричных режимов работы при обрыве параллельных ветвей в обмотке статора // Зб. праць ДонДТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2000. - Вип. 21. - С. 130-132.

Здобувач обґрунтував методи визначення ступеня несиметрії струмів в обмотці статора АД при обриві рівнобіжних галузей, навів структурна схема пристрою захисту й алгоритм її роботи.

47. Веретельник С.П., Фёдоров М.М., Денник В.Ф. Повышение эксплуатационной надёжности электродвигателей в коксохимической промышленности // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. химия и химические технологии. – Донецк. - 2000. - Вып.13. - С. 157-161.

Здобувач навів особливості побудови пристроїв теплового захисту АД електроприводів механізмів коксових батарей, обґрунтував застосування для них пристрою захисту від теплових перевантажень і несиметричних режимів роботи (УТНЗ), навів вимоги до елементів конструкції УТНЗ-5; здійснив обґрунтування їхнього вибору.

48. Федоров М.М., Апухтин М.В., Марков М.А. Тепловое состояние многоскоростных асинхронных двигателей // Зб. праць ДонНТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2001. - Вип. 28. - С. 64-67.

Здобувач навів методи прогнозування теплового стану обмоток багатошвидкісних АД, запропонував побудова еквівалентної теплової схеми заміщення багатошвидкісних АД.

49. Особенности динамических тепловых характеристик электрических машин при изменении условий охлаждения / Федоров М.М., Денник В.Ф., Апухтин М.В., Малеев Д.М. / Зб. праць ДонНТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2002. - Вип. 41. - С. 61-63.

Здобувач навів методи розрахунку теплових перехідних процесів в обмотках електричних машин у повторно-короткочасних режимах при зміні умов охолодження.

50. Федоров М.М., Алексеев Е.Р. Особенности теплового состояния асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме при изменении напряжения // Зб. праць ДонНТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2002. - Вип. 41. - С. 64-66.

Здобувач запропонував методи прогнозування динаміки теплового стану в елементах конструкції АД в повторно-короткочасних режимах при коливаннях напруги мережі.

51. Федоров М.М., Апухтин М.В. Методика оценки состояния многоскоростных асинхронных двигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах // Зб. праць ДонНТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк. – 2002. - Вип. 50. - С. 49-52.

Здобувач навів особливості роботи багатошвидкісних АД в повторно-короткочасних режимах з перемищеною частотою обертання; запропонував методи оцінки динаміки теплового стану обмоток багатошвидкісних АД в повторно-короткочасних режимах.

52. Федоров М.М., Пинчук О.Г. К вопросу о влиянии напряжения обратной последовательности на электромеханические характеристики асинхронного двигателя // Зб. праць ДонНТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецьк – 2002. - Вип. 50. - С. 177-180.

Здобувач обґрунтував методи розрахунку робочих характеристик АД при різних напругах зворотної послідовності.

53. Особенности характеристик асинхронных двигателей при несимметрии питающего напряжения / Федоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко А.В., Алексеев Е.Р. / Изв. Таганрогского государственного радиотехнического университета. Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – Таганрог. – 2000. - С. 237-241.

Здобувач навів особливості розрахунку електромеханічних і теплових характеристик АД при несиметрії напруги живлення; запропонував еквівалентну теплову схему заміщення АД при несиметрії напруги живлення, провів порівняльний аналіз теплового стану обмоток при різних напругах зворотної послідовності.

54. Особенности моделирования и анализ пусковых и рабочих характеристик при различных напряжениях сети / Федоров М.М., Алексеев Е. Р., Денник В.Ф., Горелов М. В. / Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – Таганрог. – 2000. – С. 237-241.

Здобувач обґрунтував використання T-образної схеми заміщення з урахуванням нелінійності параметрів намагнічувального контуру, а також параметрів вторинного контуру при моделюванні й аналізі пускових і робочих характеристик АД, а також навів методи одержання нелінійних характеристик намагнічувального і вторинного контурів.

55. Дудник М.З., Федоров М.М., Михайлов В.Е. Выбор параметров тепловых моделей двигателей по кривым нагрева и охлаждения // Тезисы докладов VI-й всесоюзной научно-технической конференции «Перспективы развития производства асинхронных двигателей в свете решений XXVI съезда КПСС», г. Владимир, ноябрь 1982 г, М.: Информэлектро-1982. - С. 79-80.

56. Федоров М.М., Паркесов В.Г., Михайлов В.Е. Особенности моделирования теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременном режиме. // Тезисы докладов VI-й всесоюзной научно-технической конференции «Перспективы развития производства асинхронных двигателей в свете решений XXVI съезда КПСС», г. Владимир, ноябрь 1982 г, М.: Информэлектро-1982. - С. 82.

57. Федоров М.М., Михайлов В.Е., Гресь А.С. Расчет максимальных температур асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах работы // Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции 14-16 сентября, Харьков – 1983. - С. 97.

58. Федоров М.М., Михайлов В.Е. Лизантан А.А. Исследование теплового состояния асинхронных двигателей при перегрузках // Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции 14-16 сентября. – Харьков. – 1983 - С. 125.

59. Федоров М.М., Михайлов В.Е., Апухтин М.В. Исследование динамики тепловых переходных процессов асинхронных крановых двигателей // Всесоюзное научно-техническое совещание «Электродвигатели переменного тока подъемно-транспортных механизмов». г. Суздаль, 18-22 апреля 1988 г. - М.: Информэлектро-1988.

60. Федоров М.М., Дмитрова Н.Э., Резникова Н.М. Влияние колебания напряжения сети на температурное поле асинхронных двигателей // Всесоюзное научно-техническое совещание «Электродвигатели переменного тока подъемно-транспортных механизмов». г. Суздаль, 18-22 апреля 1988 г. - М.: Информэлектро-1988.

61. Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р. Особенности тепловых процессов в асинхронных двигателях при аномальных режимах работы // Тезисы доповідей 3-ї міжнародної конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та енергетиці», Україна, Львів, 1999. - С. 278-279.

62. Федоров М.М., Денник В.Ф., Черноус В.П. Защита двигателей переменного тока от несимметричных режимов работы при обрыве параллельных ветвей в обмотке статора. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних систем - 2000».

63. Федоров М.М., Апухтин М.В. Особенности теплового состояния режимов работы многоскоростных асинхронных двигателей грузоподъемных механизмов. Матеріали 2-ї міжнародної науково-технічної конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних систем - 2002».

64. Федоров М.М., Пинчук О.Г. К вопросу о влиянии напряжения обратной последовательности на электромеханические характеристики асинхронного двигателя. Матеріали 2-ї міжнародної науково-технічної конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних систем - 2002».

65. Федоров М.М., Апухтин М.В., Пинчук О.Г., Марков А.А. Особенности построения микропроцессорных систем защиты многоскоростных асинхронных двигателей. Матеріали міжнародної конференції з управління «Автоматика - 2002». Донецьк. - 2002 г. – С. 152-153.

66. Нагрузочное устройство для испытания электродвигателей А.с. 1265664. СССР, МКИ G01 R31/34 / М.З. Дудник, М.М. Федоров, В.Е. Михайлов, А. М. Дудник (СССР). - 3890199/24-07; Заявлено 29.04.85; Опубликовано 23.10.86, Бюл. № 39. – 4 с.

67. Тепловой аналог электродвигателя А.с. 1336056. СССР, МКИ H02 H7/085 / М.М. Федоров, М.З. Дудник, В.Е. Михайлов, В.П. Мариночкин, С.М. Преображенский (СССР). – 3908806/24-24; Заявлено 04.06.85; Опубликовано 07.09.1987, Бюл. № 33. – 3 с.

68. Тепловой аналог электродвигателя А.с. 1654914. СССР, МКИ H02 H7/085 / М.М. Федоров, В.Е. Михайлов, В.П. Мариночкин, В.А. Мочалов (СССР). – 4496488/07; Заявлено 19.10.88; Опубликовано 07.06.1991, Бюл. № 21. – 6 с.

АНОТАЦІЇ

Федоров М.М. Удосконалювання методів прогнозування теплового стану електродвигунів змінного струму при нестационарних режимах їх роботи – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – Електричні машини і апарати. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

Дисертація присвячена розвитку теорії нестационарних теплових процесів в електричних машинах. У дисертаційній роботі дано теоретичне узагальнення і рішення актуальної наукової проблеми прогнозування теплового стану вузлів електродвигунів змінного струму в нестационарних режимах їх роботи, що полягають у розкритті впливу характеру теплових перехідних процесів на надійну експлуатацію двигунів і терміни їхньої служби, у науковому обґрунтуванні методів розрахунку теплових перехідних процесів і технічному рішенні контролю і прогнозування теплового стану, що дозволяє здійснювати захист обмоток від перегріву, визначати припустимі навантаження і вводити корекції в навантажувальну діаграму електродвигунів. Теоретично обґрунтована побудова динамічних теплових моделей вузлів електричних машин. Пасивні параметри моделей єдині для всіх машин одного типорозміру і являють собою своєрідний «тепловий паспорт» машини. Пасивні параметри моделі використовувались при створенні пристроїв теплового захисту електродвигунів (УАТЗ-2, УТНЗ-4, УТНЗ-5 та ін.). Розроблено основи побудови автоматизованих систем прогнозування, що дозволяють судити про теплові навантаження в різних режимах роботи кожної електричної машини, що випускається, за результатами приймально-здавальних випробувань.

Ключові слова: асинхронний двигун, перехідні процеси, прогнозування теплового стану, моделювання, нагрівання і охолодження електродвигунів, режим роботи.

Федоров М.М. Совершенствование методов прогнозирования теплового состояния электродвигателей переменного тока при нестационарных режимах их работы – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена развитию теории нестационарных тепловых процессов в электрических машинах. В диссертационной работе дано теоретическое обобщение и решение актуальной научной проблемы прогнозирования теплового состояния узлов электродвигателей переменного тока в нестационарных режимах их работы, заключающиеся в раскрытии влияния характера тепловых переходных процессов на надежную эксплуатацию двигателей и сроки их службы изоляционных материалов их обмоток.

В работе научно обоснованы методы расчета тепловых переходных процессов при произвольном характере нагрузок с получением аналитических выражений температур элементов конструкции машин в функции времени, что позволило установить характер и величины тепловых нагрузок, испытываемых обмот-

ками электрических машин в различных режимах работы. Показано, что АД с самовентиляцией в продолжительном режиме работы имеют наибольшие температуры в лобовых частях обмотки статора, а в повторно-кратковременных режимах наибольшие температуры имеют место в элементах конструкции обмотки ротора.

Теоретически обосновано построение динамических тепловых моделей узлов электрических машин, позволяющих обеспечить адекватное воспроизведение тепловых переходных процессов в выбранном узле электродвигателя в произвольном режиме работы. Пассивные параметры модели едины для всех машин одного типоразмера и представляют собой своеобразный «тепловой паспорт», который, подобно параметрам электрических схем замещения, может быть занесен в каталог. Их величины, также, как и параметры электрических схем замещения, могут быть получены из результатов экспериментальных исследований, проводимых при приемочных испытаниях, предусмотренных государственным стандартом. Активные параметры модели, определяемые потерями в элементах конструкции электродвигателей, могут изменяться в достаточно широких пределах у машин одного типоразмера, что определяет отличительные особенности динамики тепловых процессов различных двигателей. Их величины для номинального режима работы могут быть определены по результатам опытов, предусмотренных в программе приемочных испытаний, которые проводятся для каждого выпускаемого электродвигателя. Для повторно-кратковременных и перемежающихся режимов работы величины потерь могут быть рассчитаны для каждого интервала произвольной диаграммы нагрузок. Указанные свойства динамических тепловых моделей позволяют использовать их в системах прогнозирования теплового состояния электрических машин в разных режимах работы, а также в устройствах контроля и тепловой защиты.

Динамические тепловые модели использованы при создании устройств тепловой защиты двигателей (УАТЗ-2, УТНЗ-4, УТНЗ-5 и др.). Они прошли успешную апробацию в условиях промышленной эксплуатации на различных предприятиях. Разработаны основы построения микропроцессорной автоматизированной системы прогнозирования теплового состояния обмоток электродвигателей переменного тока. Принципы ее работы основаны на использовании динамических тепловых моделей обмоток (или наиболее нагретых ее частей) электрических машин. В программе приемочных испытаний, проводимых с головным образцом электродвигателя, предусмотрены опыты, по результатам которых определяются пассивные параметры моделей. Они записываются в память микропроцессорной системы. Опыт, предусматриваемый в программе приемочных испытаний, позволяет определить потери в элементах конструкции при любом коэффициенте нагрузки каждой выпускаемой электрической машины, по которым формируют диаграмму потерь для различных повторно-кратковременных и перемежающихся режимов работы. Используя пассивные параметры, рассчитывают характеристики теплового состояния в заданных режимах работы. Таким образом, впервые имеется объективная возможность суждения о тепловых нагрузках каждого выпускаемого двигателя в произвольно заданном режиме работы. Работоспособность систем подтверждена экспериментами на натурном образце.

Динамические тепловые модели могут быть использованы при построении систем прогнозирования теплового состояния электродвигателей при их эксплуатации. С их помощью можно решать различные актуальные практические задачи: выбор мощности двигателей электроприводов при различном характере нагрузки, формирование диаграмм нагрузки, исключающих перегрев обмоток, учет расходуемого ресурса изоляционных материалов и др.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, переходные процессы, прогнозирование теплового состояния, моделирование, нагревание и охлаждение электродвигателей, режим работы.

Fedorov M. Method advancement of forecasting the thermal conditions of AC motors at their unsteady conditions – Typescript.

Thesis for a Doctor's degree on specialty 05.09.01 – Electrical machines and apparatuses.

Thesis is devoted to theory development of the unsteady thermal conditions of AC motors. In dissertation given are theoretical generalization and solution of the scientific issue of the day of forecasting the thermal conditions of the AC motor component parts at their unsteady conditions, which are contained in ascertainment of effect of thermal transient character on the motor operational reliability and motor's service life, in scientific ground of the analysis method of thermal transients and in engineering solution of control and forecasting of thermal state, permitting of realization of winding thermal protection, definition of permissible load and correction input into motor's load impedance diagram. In theory the construction of dynamic heat models of motor's component parts is grounded. Model's passive parameters are unified for all machines of the same dimension-type and represent peculiar "thermal passport" of the machine. Model's passive parameters were used at creation of motor's heat protector (УАТЗ-2, УТНЗ-4, УТНЗ-5 and others). Construction fundamental of forecasting unmanned systems, permitting of heat load inference at different operating modes of each produced electrical machine by the results of hand-over test, are worked out.

Key words: induction motor, transient process, forecasting of thermal condition, model analysis, heating and cooling of motors, operating mode.

