

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

БАЛІЙЧУК ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 629.423.064.5:621.3.025



**ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ДОПОМІЖНИХ МАШИН
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Муха Андрій Миколайович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри «Електротехніка та електромеханіка».

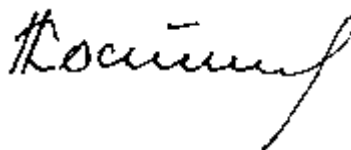
Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет», Міністерство освіти і науки України, завідувач кафедри промислового електроживлення та електричного транспорту

кандидат технічних наук, доцент
Ципленков Дмитро Володимирович,
Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії

Захист відбудеться «24» грудня 2015 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
Автореферат розісланий «23» листопада 2015 р.

В. о. вченого секретаря спеціалізованої
вченої ради Д 08.820.01,
д.т.н., професор



М.О. Костін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Незважаючи на те, що існують добре відомі методи проектування моторвагонного рухомого складу, зокрема рекомендації щодо вибору раціональної потужності приводних двигунів допоміжних машин, як показує аналіз, щорічно з ладу виходить близько 20% допоміжних машин електропоїздів, що перебувають в експлуатації. Найбільш високий відсоток (21%) виходу з ладу припадає на вентилятори салонів пасажирських приміщень, де в якості приводних двигунів застосовуються загальнопромислові серії асинхронних двигунів АОМ та АІР. Основними причинами виходу з ладу є перевищення гранично допустимих температур ізоляції обмоток статорів машин. Вказані перевищення можуть виникати в наслідок тривалої роботи двигунів із перевантаженням за струмом через недостатню точність спрацювання і налаштування штатних теплових реле захисту, а також через додаткове нагрівання допоміжних машин при живленні їх на електропоїзді електричною енергією нижчої якості, у порівнянні із загальнопромисловими мережами.

Лабораторні випробування теплових реле на базі біметалічних елементів показали низьку точність спрацювання штатного теплового захисту і довели необхідність при захисті допоміжних машин враховувати не тільки їх номінальний струм (як це рекомендовано у відповідних джерелах інформації), а й клас ізоляції двигуна, відповідну цьому класу гранично допустиму температуру перегріву і тривалість протікання струму через обмотки статора, яка буде безпечною з точки зору старіння ізоляції. Запропоновано структуру захисного пристрою для допоміжних машин на мікропроцесорній базі, який при роботі дозволяє враховувати перелічені параметри.

Проблемам покращення показників якості електричної енергії в колах допоміжних машин електрорухомого складу та дослідженню умов роботи трифазних асинхронних двигунів на ньому присвячено роботи відомих вчених: В.І.Бочарова, Д.Д. Захарченка, М.А. Козорезова, В.В. Кравчука, А.С. Курбасова, А.Л. Лісіцина, В.Н. Лісунова, О.А. Маєвського, Л.В. Маханькова, Л.А. Мугінштейна, О.А. Некрасова, А.В. Плакса, В.Є. Розенфельда, Н.А. Ротанова, А.М. Рутштейна, Б.М. Тихменьова, Л.М. Трахтмана, В.П. Феоктистова, В.П. Янова та ін. Однак, недостатньої уваги знайшли в названих роботах питання теплового захисту допоміжних машин та впливу якості живлячої електроенергії на перегрів допоміжних машин, їх термін служби та працездатність.

Аналіз робіт, що виконувались фахівцями галузі до досліджень автора, вказує на низький рівень якості електричної енергії в системі живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М при неномінальних режимах, що безумовно впливає на додатковий нагрів обмоток статора допоміжних машин, проте в представлених роботах не оцінено кількісно вплив коефіцієнта несиметрії живлячої напруги та її відхилення від номінального значення на перегрів обмоток статорів допоміжних машин, через що заходи із підвищення класу ізоляції допоміжних машин не призводять до значного зменшення кількості допоміжних машин, що вийшли з ладу. Не визначено також гранично до-

пустимих меж зміни коефіцієнта несиметрії та відхилення напруги від номінального значення, при яких не настає критичний перегрів допоміжних машин, не запропоновано рішень, що направлено на підвищення якості електричної енергії, що живить допоміжні машини, крім заміни фазорозщеплювача статичним перетворювачем.

Таким чином, в умовах модернізації і продовження терміну служби МВРС актуальним є питання підвищення терміну служби його допоміжних машин шляхом впровадження схемних рішень, що дозволять підвищити якість електричної енергії в системі живлення допоміжних машин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційну роботу виконано у відповідності з наступними державними програмами та науково-дослідними роботами:

- Підвищення надійності двигунів компресорів електропоїздів серій EP1, EP2» (№ ДР0106U006497);
- Державна цільова економічна програма енергоефективності й розвитку сфери виробництва енергоресурсів з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2012 – 2015 роки;
- Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012 – 2016 роки;
- «Підвищення надійності роботи електромашинного перетворювача електропоїзду ЕПЛ2Т у режимі рекуперативного гальмування» (№ ДР 0115U000031), у якій автор був одним із виконавців.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення працездатності допоміжних машин електропоїздів змінного струму з урахуванням якості живлячої енергії шляхом розробки рекомендацій по зменшенню впливу несиметрії живлячої напруги та відхилення її від номінального значення в реальних умовах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідним є виконання наступного переліку завдань:

- створення простого і точного методу із визначення нагріву асинхронних двигунів за паспортними даними і геометричними розмірами його основних елементів з урахуванням додаткових перегрівів від зниження якості живлячої енергії;
- створення математичної моделі для дослідження нагріву допоміжних машин електропоїзда серії EP9М в реальних умовах експлуатації;
- проведення на моделі досліджень із оцінки ступеню впливу окремих показників якості живлячої електроенергії (несиметрія напруги і відхилення її від номінального значення) на сумарний нагрів двигунів;
- отримання аналітичних залежностей між значенням показників якості електричної енергії та величиною сумарного нагріву ізоляції двигуна;
- визначення граничних значень показників якості електричної енергії, при яких не відбувається перегріву допоміжних машин понад допустимі значення;

– синтез структури пристрою для контролю якості живлячої електричної енергії в системі допоміжних машин електропоїздів серії EP9M з метою її покращення;

– створення алгоритму роботи названого пристрою з урахуванням граничних значень показників якості електричної енергії, при яких не відбувається перегріву допоміжних машин понад допустимі значення.

Об’єкт досліджень – процеси впливу якості живлячої напруги на працездатність допоміжних машин електропоїздів.

Предмет досліджень – допоміжні машини електропоїздів змінного струму.

Методи досліджень. Встановлення основних показників якості електричної енергії, що впливають на працездатність допоміжних машин електропоїздів змінного струму здійснено шляхом аналітичного огляду системи діючих вітчизняних та європейських стандартів галузей електропостачання та електротранспорту, та попередніх наукових робіт в даному напрямку.

Огляд причин зниження показників якості електричної енергії виконано на основі кількісного аналізу впливу цих показників на перегрів ізоляції, розрахунки виконано методом еквівалентних теплових моделей, в основі якого покладено теплові опори поєднані в теплову схему заміщення.

Аналітичний вираз залежності $k_{2U} = f(P)$ на виході фазорозщеплювача отримано за допомогою метода найменших квадратів шляхом апроксимування експериментально отриманих залежностей $k_{2U} = f(P)$.

Визначення сполучення коефіцієнту запасу за потужністю, гранично допустимого значення коефіцієнта несиметрії живлячої напруги та відхилення напруги від номінального значення за умовою нормального робочого перегріву обмоток допоміжних машин виконано за допомогою математичної теплової моделі допоміжних машин електропоїзда EP9M.

В основу запропонованої методики визначення ємностей батарей конденсаторів симетруючих пристроїв для симетрування системи лінійних напруг, якою живляться допоміжні машини покладено відомі способи визначення реактивної потужності ємнісних симетруючих пристроїв для повного і часткового симетрування системи трифазних напруг.

Працездатність розроблених структур пристроїв теплового захисту допоміжних машин і контролю якості живлячої електроенергії перевірено експериментально в лабораторних умовах.

Використання вищевказаних достовірних теорій та методів дослідження підтверджують достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій отриманих у роботі.

Наукова новизна отриманих результатів.

До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, які виносяться на захист відносяться.

1. Вперше:

- обґрунтовано закономірність впливу якості живлячої енергії на процеси нагрівання допоміжних машин електропоїздів змінного струму, що дозволяє розробити рекомендації по підвищенню працездатності вказаних машин;

- розроблено метод, який передбачає визначення температури нагрівання обмоток статора допоміжних асинхронних машин з урахуванням впливу несиметрії живлячої напруги і її відхилення від номінального значення, що дає можливість більш точно визначити температуру нагрівання цих обмоток в реальних умовах експлуатації;

2. Розроблено математичну модель теплового стану допоміжних машин, яка відрізняється від існуючих моделей врахуванням якості живлячої енергії з точки зору теплових процесів, що дає можливість оцінити реальне нагрівання ізоляції обмотки статора і, відповідно, реальний термін її служби;

3. Знайдені раціональні співвідношення між коефіцієнтом запасу допоміжних машин і коефіцієнтом несиметрії живлячої напруги з точки зору визначення раціонального значення ємності симетруючої конденсаторної батареї, що дозволяє знизити додатковий перегрів обмоток статора допоміжних машин від низької якості живлячої енергії.

4. Запропоновано новий принцип захисного пристрою від перегріву обмоток статора, який відрізняється від існуючих тим, що одночасно контролює і значення струму і час, за який не відбудеться недопустимого нагрівання цих обмоток. Визначено співвідношення між струмом і часом при цьому.

Практичне значення отриманих результатів дозволяє:

1. Створити уніфіковані мікропроцесорні системи захисту допоміжних машин у режимах роботи із низькими показниками якості електричної енергії та перевантаження.
2. Зменшити експлуатаційні витрати при експлуатації електропоїздів змінного струму при використанні уніфікованих мікропроцесорних систем захисту допоміжних машин.
3. Підвищити термін служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму.

Результати досліджень впроваджено у ПрАТ «Київський електровагоноремонтний завод ім. Січневого повстання 1918 року» (м. Київ) та у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна при вивченні дисциплін «Електронна та перетворювальна техніка», «Електричні машини», «Мікропроцесорні пристрої», «Електричні апарати» студентами 3-го та 4-го курсів спеціальності 7.05070204 – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод.

Особистий внесок здобувача. Формулювання мети, задач досліджень, а також обговорення поточних результатів останніх здійснювалось автором спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, викладені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем самостійно.

У роботах, які написано у співавторстві, автору належать: у [1, 6, 12] – постановка задачі та аналіз отриманих результатів; у [2, 7, 8] – аналітичне дослідження ступеню впливу показників якості електричної енергії на додатковий

перегрів обмоток статора допоміжних машин; [11] – аналіз існуючих способів і методів зниження впливу показників якості електричної енергії на перегрів обмоток статора асинхронних двигунів. Роботи [3, 4, 5, 9, 10, 13] написано автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались на конференціях: 74-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2014 р.; V-й «Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості», смт. Воловець, Закарпатської обл. 2014 р., VII-й «Транселектро – 2014», м. Одеса, 2014 р., 75-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2015 р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових працях, у тому числі: 4 статті у фахових наукових виданнях, в тому числі 3 статті [1, 2, 3], опубліковано у виданнях, що входять до переліку міжнародної науково-метричної бази даних Index Copernicus; 1 – патент на корисну модель; 8 – у тезах доповідей та матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаної літератури та додатків. Основний текст роботи викладено на 131 сторінці. Дисертація містить 64 рисунка, 29 таблиць, 87 найменувань літературних джерел, розміщених на 9 сторінках та 6 додатків на 35 сторінках.

Повний обсяг дисертації складає 175 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, приведені основні наукові положення і результати, що винесені на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

Перший розділ присвячено аналізу умов роботи допоміжних машин рухомого складу. В ході аналізу було встановлено, що в якості допоміжних машин на рухомому складі змінного струму в основному використовуються трифазні асинхронні двигуни. Живлення цих двигунів на рухомому складі ранніх років виробництва, що сьогодні знаходиться в експлуатації, здійснюється від додаткової обмотки тягового трансформатора через фазорозщеплювач, на більш сучасному рухомому складі – від статичних перетворювачів власних потреб. Базовим рухомих складом для дослідження обрано електропоїзд змінного струму серії EP9M, як найбільш багаточисленний і розповсюджений вид рухомого складу, яким виконуються приміські пасажирські перевезення на залізницях України.

Особливістю роботи системи допоміжних машин на електропоїздах серії EP9M є застосування в якості двигунів вентиляційних агрегатів асинхронних двигунів загальнопромислових серій AOM та AIP. Аналіз статистичних даних стосовно виходу з ладу допоміжних машин електропоїздів названої серії показав, що близько 20% від всього парку допоміжних машин виходять з ладу що-

річно. Основними причинами виходу з ладу допоміжних машин є ушкодження ізоляції - пробій ізоляції на корпус та міжвиткові замикання. Причинами передчасного виходу з ладу ізоляції обмоток електричних двигунів є теплове старіння ізоляції внаслідок перевищення допустимих температур частин двигуна.

Живлення допоміжних машин Д на електропоїздах серії ЕР9М, як показано на рис.1, відбувається від обмотки додаткових кіл ДО головного тягового трансформатора Тр через фазорозщеплювач РФ, особливістю роботи якого є недостатньо висока якість електричної енергії (підвищена несиметрія напруги) внаслідок особливостей його конструкції і принципу дії.

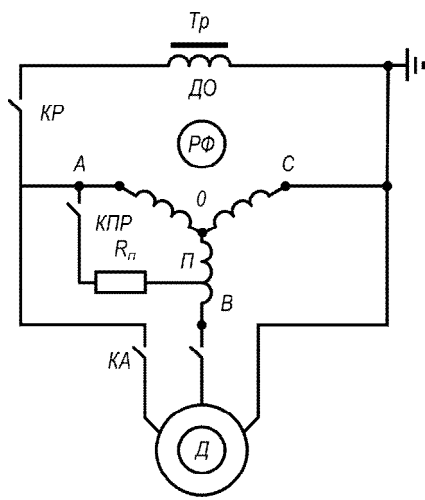


Рис. 1 – Принципова схема живлення допоміжних машин електропоїзда серії ЕР9М

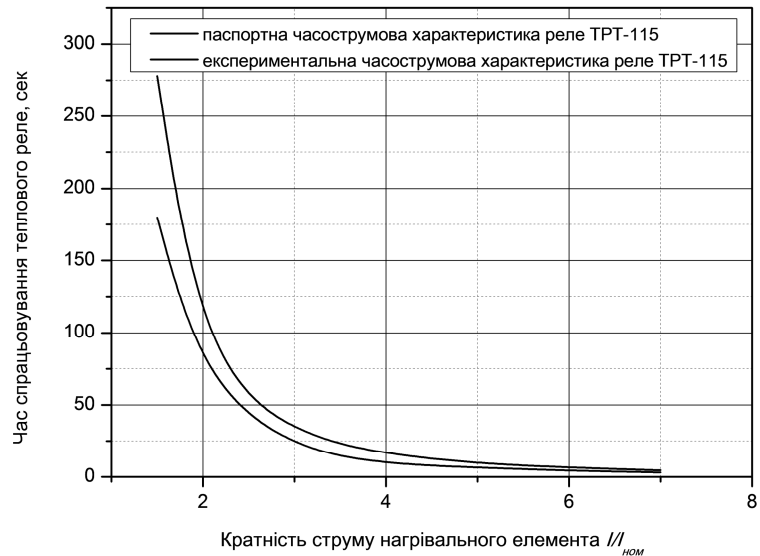


Рис. 2 – Порівняння паспортних та експериментальних часострумівих характеристик електро-теплових реле типу ТРТП-115

Перегрів ізоляції двигунів може виникати при зниженні якості живлячої електричної енергії, джерелом чого виступає фазорозщеплювач, а також коливання напруги в контактній мережі, які призводять до коливань напруги в системі живлення допоміжних машин.

На електропоїздах серії ЕР9М норми якості живлячої електричної енергії наближені до вимог ГОСТ 13109-97 тільки при одночасному увімкненні усіх допоміжних машин в номінальному режимі і при номінальній напрузі 25 кВ в контактній мережі. В більшості випадків реальної експлуатації названі режими роботи допоміжних машин та значення напруги в контактній мережі відрізняються від номінальних – напруга лежить в діапазоні 19...27,5 кВ, а навантаження асинхронного фазорозщеплювача коливається від 0,8 кВт до 11 кВт.

З метою перевірки працездатності та адекватності роботи теплового захисту допоміжних машин електропоїзда ЕР9М автором було проведено випробування електротеплових реле типу ТРТП-115 на точність спрацювання, які показали, що похибка спрацювання реальних зразків реле складає $\delta = 20,7...74,3\%$

при різних кратностях струму у порівнянні із паспортною характеристикою. На рис. 2 показано паспортну часострумову характеристику теплових реле ТРТП та реальну часострумову характеристику, отриману при експериментальному дослідженні 5 зразків теплових реле ТРТП.

В ході аналізу умов роботи допоміжних машин на електропоїздах серії ЕР9М автором зроблено висновок, що основними причинами передчасного виходу з ладу допоміжних машин, зважаючи на вищесказане, можуть виступати недостатня точність роботи теплового захисту на базі електротеплових реле типу ТРТП та живлення допоміжних машин електричною енергією низької якості.

Другий розділ присвячено дослідженню впливу деяких показників якості електричної енергії на нагрівання допоміжних машин. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення обумовлюються міждержавним ГОСТ 13109-97. Аналіз спеціалізованих джерел показав, що на сьогодні відсутні інші нормативні документи, якими б було оговорено норми якості електричної енергії в колах власних потреб електрифікованого рухомого складу. Використання на рухомому складі в якості приводних двигунів допоміжних машин загальнопромислових асинхронних двигунів типу АИР, АОМ та ін. дозволяє зробити висновок про можливість застосування названого стандарту для оцінки якості електричної енергії в системах допоміжних машин.

З великої кількості показників якості електричної енергії, значення яких регламентуються стандартом, найбільш вагомий вплив на тепловий стан обмоток допоміжних машин мають:

- коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю k_{2U} ;
- відхилення напруги (ВН) δU_c (далі за текстом будемо позначати ΔU).

При ВН на затискачах АД змінюється частота обертання ротора, значення активних втрат і споживаної реактивної потужності. Тепловий знос ізоляції двигуна залежить від ВН та завантаженості електродвигуна.

При несиметрії напруг в електричних машинах змінного струму утворюються магнітні поля, що обертаються не тільки із синхронною частотою в напрямку обертання ротора, а й в зворотному напрямку із подвійною синхронною частотою. В результаті цього в нормально працюючому АД виникає гальмівний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, за рахунок струмів подвійної частоти. При роботі АД з номінальним обертовим моментом і коефіцієнтом несиметрії напруги, що дорівнює 4%, строк служби його ізоляції скорочує вдвічі лише за рахунок додаткового нагріву. При значному перевищенні напруги на одній з фаз у порівнянні із номінальним значенням скорочення терміну служби ізоляції може бути ще більшим.

В ході проведеного аналізу робіт О.А. Некрасова встановлено, характер зміни коефіцієнта несиметрії при зміні електричного навантаження на фазорозщеплювач, який приведено на рис 3.

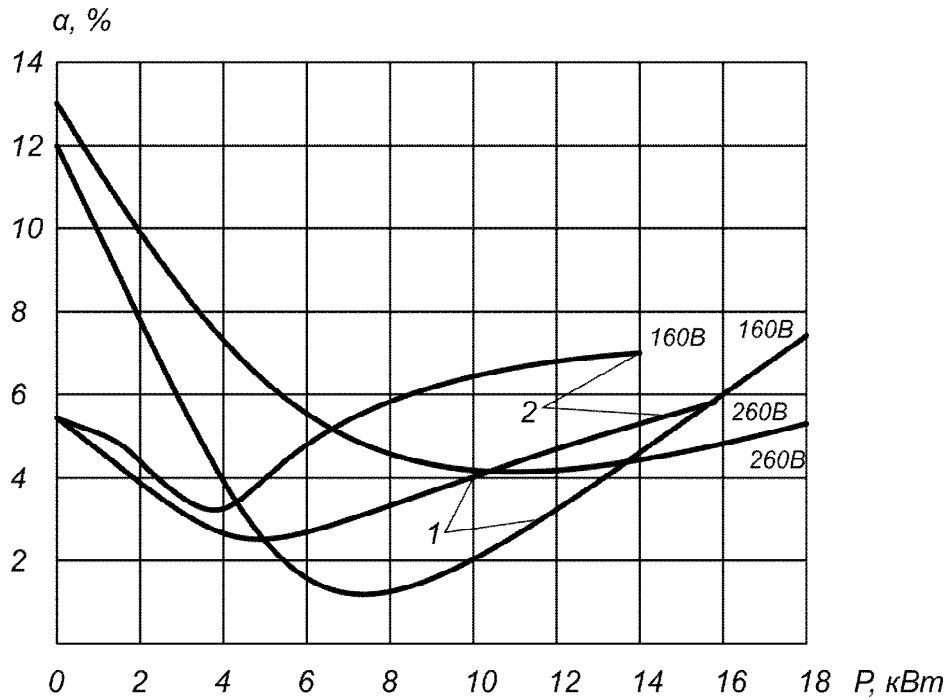


Рис. 3 – Характер зміни коефіцієнта несиметрії при зміні навантаження на фазорозщеплювач при експлуатації електропоїздів серії EP9 (криві 1) та EP9M (криві 2) за О.А. Некрасовим

Криві 2 з рис. 2 апроксимовано за допомогою обчислювального апарату програми Origin 6.1 з використанням зваженого методу найменших квадратів, який мінімізує суму квадратів відхилень між теоретичною кривою та експериментальними точками ряду незалежної змінної. Отримано аналітичні вирази, які описують функцію $k_{2U} = f(P_1)$ для фазорозщеплювача 1РФ-Д5 при різних напругах на виході обмотки додаткових кіл головного тягового трансформатора.

$$k_{2U} = 5,43282 - 0,80747 \cdot P - 0,08275 \cdot P^2 + 0,06338 \cdot P^3 - 0,00672 \cdot P^4 + 2,10587 \cdot 10^{-4} \cdot P^5 \quad (1)$$

$$k_{2U} = 5,35838 - 0,69581 \cdot P - 0,13586 \cdot P^2 + 0,05849 \cdot P^3 - 0,00548 \cdot P^4 + 1,61093 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \quad (2)$$

$$k_{2U} = 5,36449 - 0,70606 \cdot P - 0,13127 \cdot P^2 + 0,05882 \cdot P^3 - 0,00558 \cdot P^4 + 1,64905 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \quad (3)$$

$$k_{2U} = 5,32827 - 0,45606 \cdot P - 0,33919 \cdot P^2 + 0,12041 \cdot P^3 - 0,014 \cdot P^4 + 7,01625 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \quad (4)$$

$$k_{2U} = 5,27036 - 0,27878 \cdot P - 0,44687 \cdot P^2 + 0,1324 \cdot P^3 - 0,01244 \cdot P^4 + 8,52646 \cdot 10^{-5} \cdot P^5 + 5,93351 \cdot 10^{-5} \cdot P^6 - 3,7117 \cdot 10^{-6} \cdot P^7 + 7,05952 \cdot 10^{-8} \cdot P^8. \quad (5)$$

Вирази (1)-(5) справедливі для напруг 160 В, 205 В, 220 В, 225 В та 260 В

відповідно. Вказані значення величини напруги є найбільш характерними діючими значеннями напруги системи живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, які обумовлені особливостями як роботи, так і будови системи.

Члени поліноміальних рівнянь регресії (1-5), що мають більш високий порядок, мають високий вплив на залежну змінну. Отже, округлення коефіцієнтів, особливо при змінних високих порядків, може призвести до суттєвої різниці в результаті, іноді навіть до висновку про неадекватність моделі. Тому коефіцієнти в рівняннях обчислюються з точністю до п'яти знаків після коми, що забезпечує високу точність апроксимування, як це показано на рис. 4.

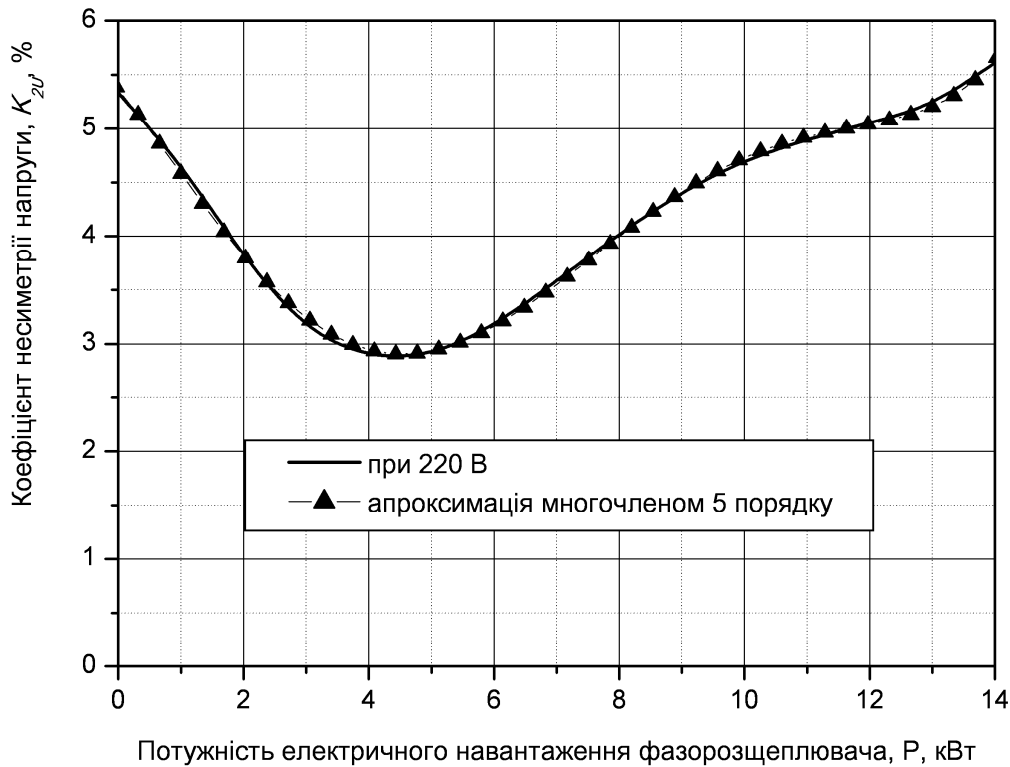


Рис. 4 – Поліноміальна апроксимація залежності $k_{2U} = f(P)$ при 220 В

Додатковий нагрів під впливом несиметрії живлячої напруги визначається за виразом:

$$\Delta\tau_{(2)} = \frac{2 \cdot k_{2U}^2}{100} \cdot \theta_1, \quad (6)$$

де θ_1 - середнє перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна, яке визначається за методом, описаним І.П. Копиловим.

В табл. 1 приведено значення середнього перевищення температури статорних обмоток допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, отриманих за методикою І.П. Копилова.

Для оцінки реального теплового стану допоміжних машин потрібно врахувати середнє перевищення температури їх обмоток і при номінальному режимі θ_1 . Тобто реальний перегрів при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги:

$$\tau_1 = \theta_1 + \Delta\tau_{(2)} \quad (7)$$

Таблиця 1

Середнє перевищення температури обмотки статора АД за І.П. Копиловим

№ з/п	Тип двигуна	Середнє перевищення температури обмотки статора θ_1 , °C
1	ум. № 548	42,9
2	2ТТ-16/10-01	123,4
3	АОМ 32-4	84,1
4	АОМ 22-2	39,0

Вплив несиметрії живлячої напруги на додатковий нагрів допоміжної машини, оцінений за виразом (6), представлено на рис 5.

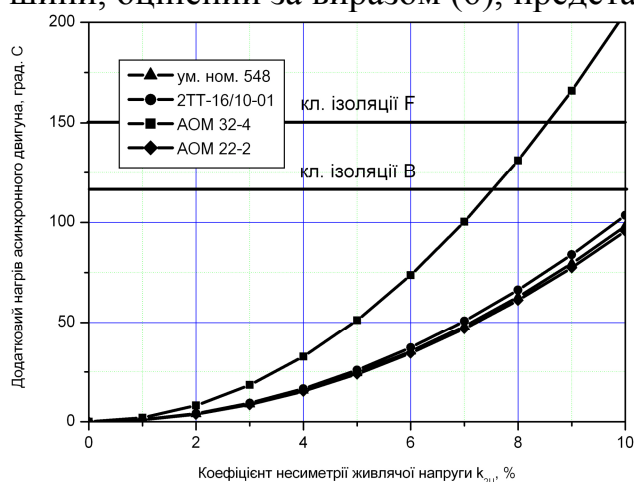


Рис. 5 – Вплив несиметрії живлячої напруги на додатковий нагрів допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

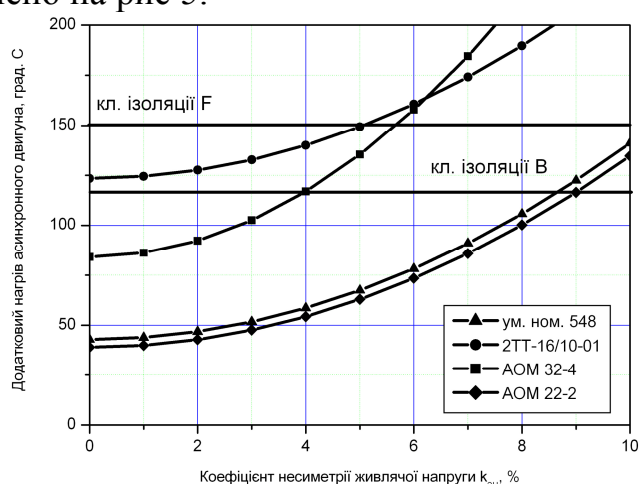


Рис. 6 – Вплив несиметрії живлячої напруги на перегрів допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

З рис. 6 випливає, що робота допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, клас ізоляції яких В, при коефіцієнті несиметрії більшому за 6% призводить до нагрівання їх обмоток статора до гранично-допустимих значень перегріву.

При наявності відхилення напруги живлення від номінального значення також виникає додатковий нагрів ізоляції машини:

$$\Delta\tau_U = 60\Delta U, \quad (8)$$

де ΔU - відносне відхилення живлячої напруги

$$\Delta U = \left| \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right|. \quad (9)$$

Якщо прийняти за номінальне значення напруги первинної обмотки тягового трансформатора значення $U_{1\text{ ном}} = 25000$ В, а номінальне значення напруги додаткової обмотки $U_{\text{дк ном}} = 220$ В, то коефіцієнт трансформації трансформатора

відносно цих двох обмоток $k_{\text{тр}} = \frac{U_{1\text{ ном}}}{U_{\text{дк ном}}} = \frac{25000}{220} = 113,6$. При цьому прийма-

ємо, що номінальне значення напруги живлення допоміжних двигунів дорівнює номінальному значенню напруги обмотки живлення додаткових кіл головного трансформатора $U_{\text{ном}} = U_{\text{дк ном}}$. При вказаних коливаннях напруги в контактній мережі напруга на затискачах обмотки живлення додаткових кіл і відповідно на затискачах обмотки статора допоміжних машин тягового трансформатора буде знаходитися в межах $U_{\text{дк min}} \dots U_{\text{дк max}}$.

Тобто,

$$U_{\text{дк min}} = \frac{U_{1\text{min}}}{k_{\text{тр}}} = \frac{19000}{113,6} = 167 \text{ В},$$

$$U_{\text{дк max}} = \frac{U_{1\text{max}}}{k_{\text{тр}}} = \frac{27500}{113,6} = 242 \text{ В}.$$

Відхилення напруги при цьому у % складає відповідно:

$$\Delta U_{* \text{min}} = \frac{U_{\text{вп min}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{167 - 220}{220} \cdot 100\% = -24,1\%;$$

$$\Delta U_{* \text{max}} = \frac{U_{\text{вп max}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{242 - 220}{220} \cdot 100\% = 10\%.$$

Тобто, додатковий нагрів при напрузі в контактній мережі 19 кВ складе $\Delta \tau_{U \text{min}} = 60 \Delta U_{\text{min}} = 60 \cdot 0,24 = 14,4^\circ \text{C}$, а при напрузі 27,5 кВ - $\Delta \tau_{U \text{max}} = 60 \Delta U_{\text{max}} = 60 \cdot 0,1 = 6^\circ \text{C}$

Як впливає із виразу (8), додатковий нагрів при відхиленні напруги живлення допоміжних машин від номінального значення не залежить від типу асинхронних двигунів, а залежить лише від величини відносного відхилення напруги живлення від номінального її значення.

В реальній експлуатації досить часто на нагрівання обмоток статорів допоміжних машин ці два фактори впливають одночасно, тому повний перегрів допоміжної машини розглядаємо як суму часткових перегрівів від несиметрії живлячої напруги та від відхилення напруги від номінального значення.

$$\tau_1 = \theta_1 + \Delta \tau_{(2)} + \Delta \tau_{\Delta U}. \quad (10)$$

Гранично допустимими значеннями несиметрії напруги за умовами нормального робочого перегріву обмоток статора допоміжних машин є значення $K_{2U} = 5 \dots 7\%$ при класі ізоляції В для всіх машин, крім двигуна вентилятора пасажирського салону АОМ 32-4, для якого при тому ж самому класі ізоляції гранично допустимими значеннями коефіцієнта несиметрії напруги є $K_{2U} = 1 \dots 2\%$.

У третьому розділі автором проведено аналіз існуючих методів аналітичного визначення перевищення температури обмотки статора допоміжної машини над охолоджуючим середовищем і вдосконалено існуючий метод узагальненої теплової моделі з метою застосування його при моделюванні теплового стану обмотки статора допоміжної машини в режимах реальної експлуатації на електропоїзді ЕР9М для визначення гранично допустимих значень коефіцієнта несиметрії напруги за умови нормального нагріву обмоток допоміжних машин.

Відомими класичними методиками зручно користуватися на етапі проекту-

вання електричних машин для отримання картини нагріву електричних двигунів в цілому і їх складових частин. При цьому нагрівання двигуна розраховується від втрат енергії в частинах двигуна під навантаженням, що знаходиться на його валу. Для дослідження теплових процесів в готових електричних двигунах і системах приводів, коли в наявності є лише каталожні або паспортні дані на конкретний двигун, розглянуті методики застосувати досить не зручно. Не відомими є розміри частин провідників обмотки, суттєво проблематичним є визначення кількості шарів і геометричних розмірів ізоляції двигуна, коефіцієнти теплопровідності і теплопередачі середовищ підбираються із орієнтовних наближених графічних залежностей, а тому можливим є значний розкид результатів, відповідно високою є похибка в оцінці нагріву готового двигуна. Крім того, названі методики не дозволяють оцінювати додаткові нагріви частин електричних машин, які виникають при зниженні якості живлячої електричної енергії.

При дослідженні нагріву допоміжних машин електропоїздів змінного струму доцільно мати достатньо точний і простий метод для визначення нагріву вказаних машин з використанням параметрів, які вказані в технічній літературі по експлуатації (паспортні дані, геометричні розміри). В якості такого методу пропонується метод для знаходження додаткового нагріву ізоляції обмотки статора з використанням узагальненої теплової моделі, запропонованої І.В. Жежеленко.

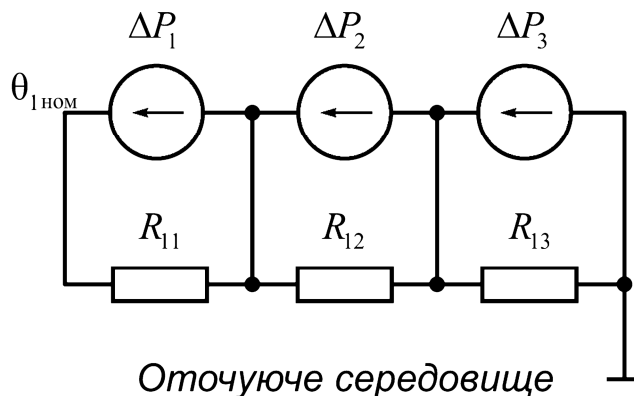


Рис. 7. – Узагальнена теплова модель асинхронного двигуна

На рис. 7 прийнято $\theta_{1ном}$ - середнє перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна в нормальних умовах.

Таким чином

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

де ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 - електричні втрати в обмотці статора і в обмотці ротора і втрати в сталі відповідно, Вт;

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

Відомо, що для АД малої потужності $\Delta P_1 = 0,5 \cdot \sum p$; $\Delta P_2 = 0,25 \cdot \sum p$; $\Delta P_3 = 0,2 \cdot \sum p$, де

$$\sum p = P_1 \cdot (1 - \eta). \quad (12)$$

Теплові опори визначаємо за допомогою емпіричних виразів

$$R_{11} = \frac{K}{D_{a1} l_1}; \quad (13)$$

$$R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6 R_{11}, \quad (14)$$

де D_{a1} - зовнішній діаметр осердя статора;

l_1 - довжина осердя статора;

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

жністю $0,5 \dots 10$ кВт і $35 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}}$ - для АД потужністю $11 \dots 250$ кВт.

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

В табл. 2 приведено порівняння результатів обчислення середнього перевищення температури обмоток статора $\theta_{1\text{ном}}$ визначеного за узагальненою тепловою моделлю і класичним методом.

Таблиця 2

Порівняння результатів обчислення $\theta_{1\text{ном}}$ визначеного за узагальненою тепловою моделлю із класичним методом

Тип двигуна	Середнє перевищення температури обмотки статора $\theta_{1\text{ном}}$, $^\circ\text{C}$		Похибка, %
	За узагальненою тепловою моделлю	За класичним методом	
ум. № 548	42,8	42,9	0,3
2ТТ-16/10-01	123,8	123,4	0,3
АОМ 32-4	83,7	84,1	0,5
АОМ 22-2	39,1	39,0	0,4

Як впливає із табл. 2, похибка в результатах отриманих за різними методиками не перевищує $0,5\%$, що дає змогу судити про високу достовірність узагальненої теплової моделі асинхронного двигуна і можливість її застосування в роботі для визначення перевищення температури обмоток статора допоміжних машин.

Для врахування проектного запасу за потужністю допоміжних машин введемо в теплову модель вводиться вираз, що дозволяє врахувати зміну ККД при зміні навантаження на валу двигуна:

$$\theta_{\text{лст}} = 0,77 \cdot \frac{27}{D_{a1} l_1} \cdot \left[P_1 \cdot \left(1 - \frac{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}}}{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}} + P_{\text{в}} + \left(\frac{1}{k_3} \right)^2 \cdot P_{\text{ном}}} \right) \right]. \quad (15)$$

Остаточний вираз теплової моделі допоміжних машин електропоїзда змінного струму матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = \theta_{\text{лст}} + \theta_{K_{2U}} + \theta_{\Delta U}; \\ \theta_{\text{лст}} = 0,77 \cdot \frac{27}{D_{a1} l_1} \cdot \left[P_1 \cdot \left(1 - \frac{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}}}{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}} + P_{\text{в}} + \left(\frac{1}{k_3} \right)^2 \cdot P_{\text{ном}}} \right) \right]; \\ \theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}; \\ \theta_{\Delta U} = 60 \cdot \left| \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right|; \\ K_{2U} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 + a_3 \cdot P^3 + a_4 \cdot P^4 + a_5 \cdot P^5 + a_6 \cdot P^6 + a_7 \cdot P^7 + a_8 \cdot P^8; \\ K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \end{array} \right.$$

де $a_0 \dots a_8$ - фіксовані коефіцієнти при змінних потужностях, значення яких подано в табл. 3.

Початковими умовами для моделі є:

- діапазон електричного навантаження на фазорозщеплювач $P = 0 \dots 16$ кВт;
- значення напруги в обмотки живлення допоміжних кіл головного тягового трансформатора: 160 В, 205 В, 220 В, 225 В, 260 В.

Запропонована теплова модель допоміжних машин електропоїзда змінного струму дозволяє врахувати режим роботи машини за напругою, навантаженням на фазорозщеплювач і як результат значення величини коефіцієнта несиметрії живлячої напруги.

В результаті досліджень за допомогою математичної моделі отримаємо графічні залежності перегріву обмоток статора допоміжних машин в реальних умовах експлуатації на МВРС, тобто $\theta_1 = f(k_3, K_{2U}, \Delta U)$.

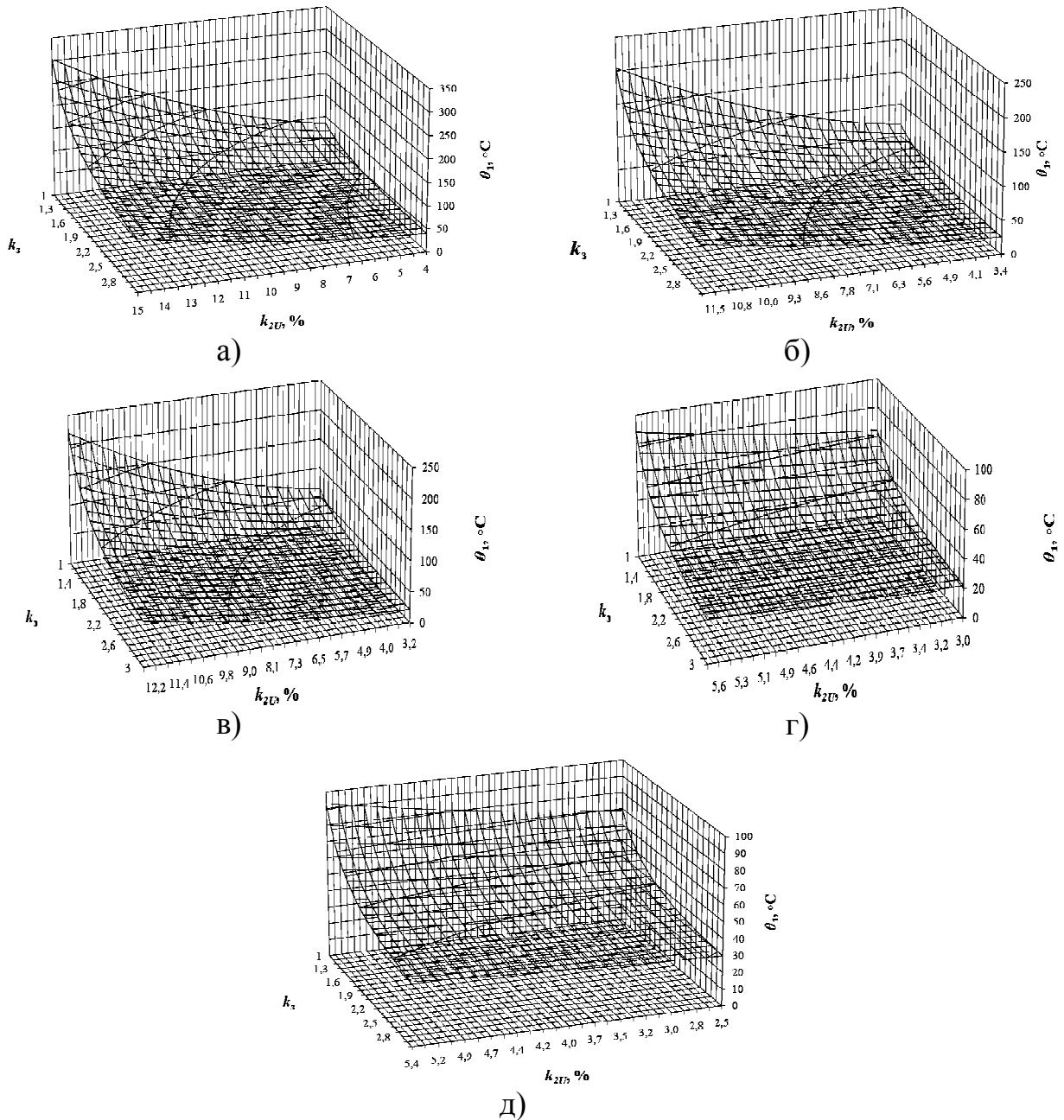


Рис. 8. – Графіки залежності $\theta_1 = f(k_3, K_{2U}, \Delta U)$ для двигуна компресора електропоїзда ЕР9М:

а) при 160 В; б) при 205 В; в) при 220 В; г) при 225 В; д) при 260 В

На рис. 8 зображено залежність $\theta_1 = f(k_3, K_{2U})$ при всіх найбільш характерних значеннях напруги в системі живлення. По отриманим графікам визначено межі гранично допустимих значень коефіцієнта несиметрії живлячої напруги при різних значеннях напруги обмотки живлення додаткових кіл головного тягового трансформатора, вплив на нагрівання статорних обмоток від дії яких компенсується проектним запасом за потужністю приводних двигунів. Для двигуна компресора гранично допустимі значення k_{2U} становлять $k_{2U} = [8...10\%]$; для насоса трансформатора - $k_{2U} = [11...12,5\%]$; для двигуна вентилятора АОМ 32-4 - $k_{2U} = [4,5...5,5\%]$; для двигуна вентилятора АОМ 22 - 2 -

$$k_{2U} = [4...11,5\%].$$

Таблиця 3

Коефіцієнти $a_0...a_8$ рівнянь при різних значеннях однофазної живлячої напруги U

$U, \text{В}$	Коефіцієнти								
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
160	5,43282	-0,80747	-0,08275	0,06338	-0,00672	$2,11 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
205	5,35838	-0,69581	-0,13586	0,05849	-0,00548	$1,61 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
220	5,36449	-0,70606	-0,13127	0,05882	-0,00558	$1,65 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
225	5,32827	-0,45606	-0,33919	0,12041	-0,014	$7,02 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
260	5,27036	-0,27878	-0,44687	0,1324	-0,01244	$8,53 \cdot 10^{-5}$	$5,93 \cdot 10^{-5}$	$-3,7 \cdot 10^{-6}$	$7,06 \cdot 10^{-8}$

У четвертому розділі автором запропоновано принципові схеми пристроїв для поліпшення якості електричної енергії та теплового захисту допоміжних машин електропоїздів змінного струму, а також проведено дослідження щодо визначення впливу якості електричної енергії на термін служби ізоляції обмоток статора допоміжних машин.

Враховуючи вплив сумарного електричного навантаження на несиметрію напруги на виході розщеплювача фаз, зміну величини напруги в контактній мережі, а відповідно і напругу в системі живлення допоміжних машин, різну гранично допустиму несиметрію напруги за умови нормальної температури нагріву кожної допоміжної машини доцільним є застосування індивідуальних способів симетрування напруги керованими симетруючими пристроями.

На рис. 9 наведено загальний вигляд принципової схеми пропонованого автором пристрою для симетрування системи лінійних напруг в колах живлення допоміжних машин електропоїзда серії EP9M.

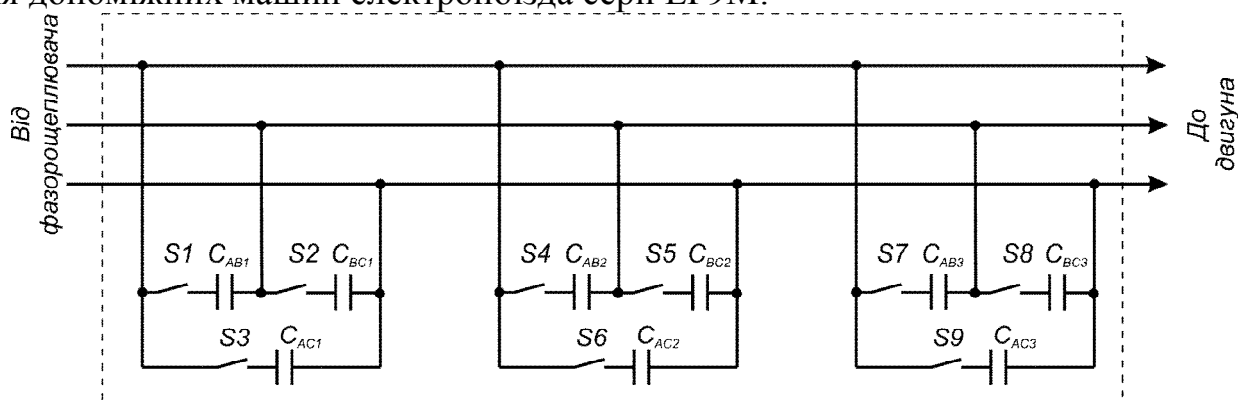


Рис. 9. – Принципова схема силової частини пристрою для симетрування напруги живлення допоміжних машин електропоїзда EP9M

Симетрування напруги в даному пристрої виконується за допомогою під'єднання батареї конденсаторів паралельно до кожної допоміжної машини. Набір необхідної величини ємності відбувається шляхом почергового підключення до схеми кожної із батарей конденсаторів. Момент комутації батарей конденсаторів, а також послідовність їх комутації визначає мікроконтролерна система керування, яка відслідковує поточне значення лінійних напруг в системі живлення допоміжних машин, порівнюючи напругу в лінійних проводах і

обчислює поточне значення несиметрії живлячої напруги. При досягненні значення несиметрії напруги, що перевищує гранично допустимі величини для конкретної допоміжної машини система керування формує сигнал на підключення до працюючого допоміжного двигуна симетруючих батарей конденсаторів, ємність яких компенсує реактивну потужність, що виникне в колі живлення внаслідок протікання струмів зворотної послідовності, які виникли в результаті дії напруги зворотної послідовності, що прикладена до симетричних допоміжних машин.

Комутація батарей конденсаторів відбувається за допомогою контакторів модульного виконання.

Ємність батарей конденсаторів для повного симетрування напруги живлення допоміжних машин пропонується визначати за виразом:

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot f \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (16)$$

де k_{2U} - коефіцієнт несиметрії напруги у в.о.;

k_I - кратність усталеного пускового струму двигуна;

$I_{\text{ном}}$ - номінальний струм двигуна, А;

$U_{\text{ном}}$ - номінальна лінійна напруга двигуна, В;

f - частота живлячої змінної напруги, Гц.

Відповідно до виразу (16) для основних допоміжних машин електропоїзда ЕР9М справедливими є залежності $C = f(k_{2U})$, які представлено на рис. 10.

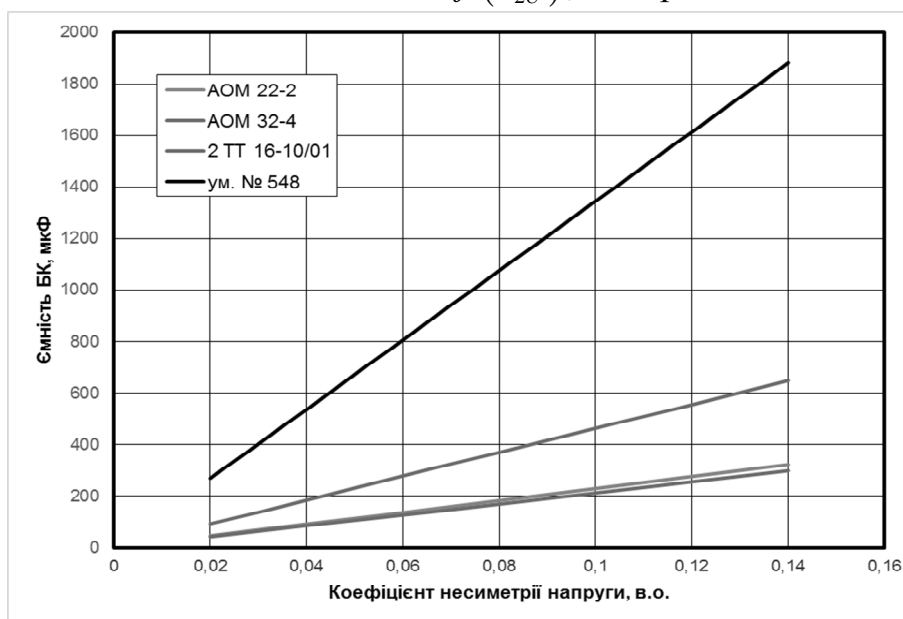


Рис. 10. – Графік залежності ємності конденсаторів симетруючих пристроїв для основних допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги

З представлених залежностей видно, що для симетрування системи напруг, коефіцієнт несиметрії якої знаходиться в діапазоні від 2% до 14%, якою живляться допоміжні машини потрібно застосовувати конденсаторні батареї наступних ємностей: для двигуна компресора ум. № 548 – 300...1900 мкФ; для двигуна насоса трансформатора 2ТТ-16/10-01 – 50...300 мкФ; для двигуна вентилято-

ра АОМ 32-4 – 100...650 мкФ; для двигуна вентилятора АОМ 22-2 – 50...325 мкФ.

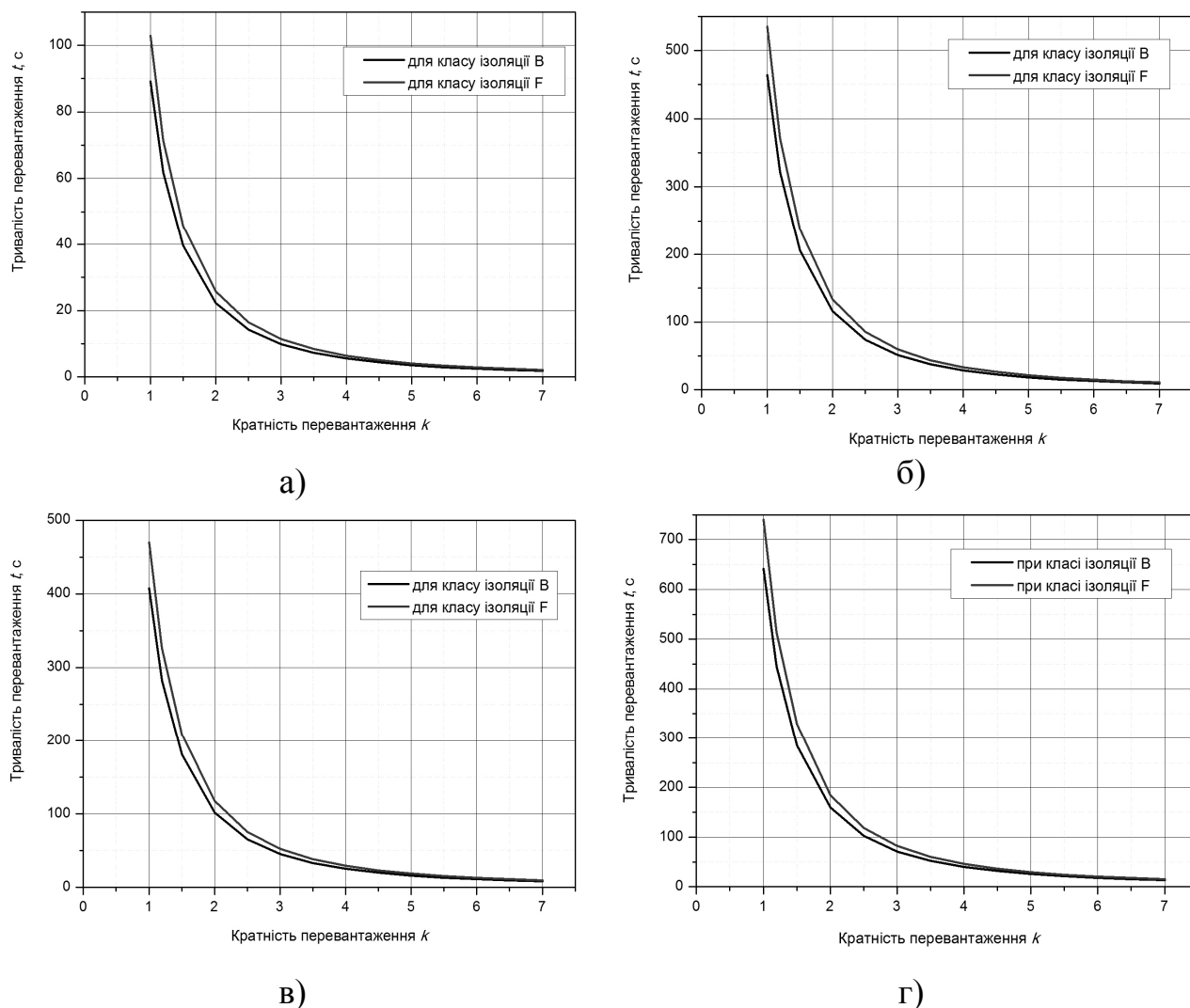


Рис. 11. – Гранично допустимі тривалості перевантаження допоміжних машин електропоїзда серії EP9M:

а) ум. № 548; б) 2ТТ – 16/10-01; в) АОМ 32-4; г) АОМ 22-2

Захист допоміжних машин з допомогою теплових реле, що наразі використовується на електропоїздах серії EP9M і подібних до них має суттєві недоліки, зокрема через те, що номінальні уставки теплових реле за струмом обираються лише за умовою, що номінальний струм реле дорівнює номінальному струму двигуна. При цьому не враховується клас ізоляції обмоток двигуна кліматичні умови, в яких працюють двигун і реле, а також початковий стан теплового елементу реле.

Для розробки більш вдосконаленої системи захисту допоміжних машин електропоїздів важливо з використанням (17) знайти залежність $t_{\text{доп}} = f(k)$ при різних значеннях $\Delta\tau_{\text{доп}}$ під час пуску ($k_{\text{поч}} = 0$), тобто визначити термін часу протікання струму перевантаження через статорну обмотку допоміжної машини, за який не відбудеться перегрів її ізоляції понад гранично допустимі значення.

$$t_{\text{доп}} = \frac{150\tau_{\text{НОМ}}}{j_{\text{S НОМ}}^2} \cdot \frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{НОМ}} \cdot k^2} = \frac{150\tau_{\text{доп}}}{j_{\text{S НОМ}}^2 \cdot k^2} \quad (17)$$

За виразом (17) побудовано залежності $t_{\text{доп}} = f(k)$ для всіх допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, які приведено на рис. 11. Ці залежності є основою для роботи пристрою теплового захисту на сучасній мікропроцесорній елементній базі.

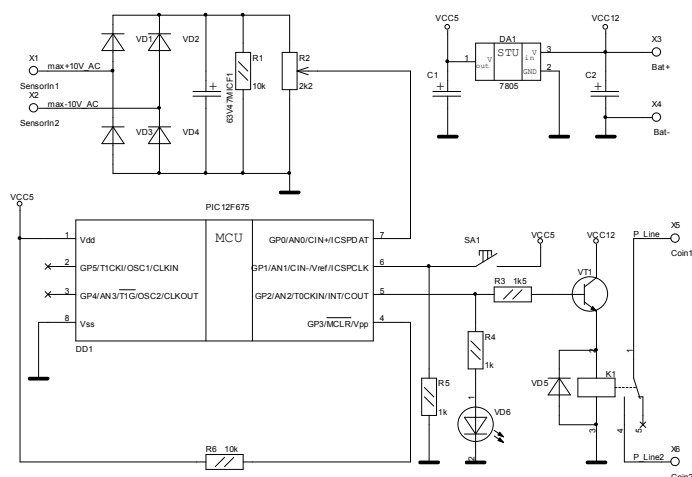


Рис. 12. – Принципова схема пристрою теплового захисту допоміжних машин

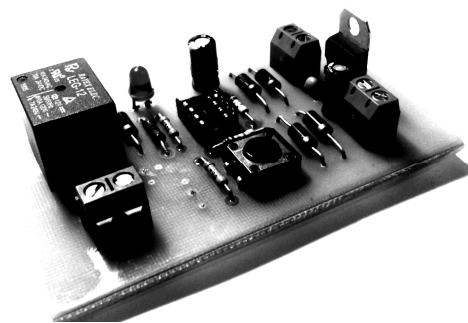


Рис. 13. – Зовнішній вигляд дослідного зразка пристрою теплового захисту допоміжних машин

На рис. 12 показано принципову схему пристрою теплового захисту для допоміжних машин електропоїздів серії ЕР9М. Живлення пристрою здійснюється від бортової мережі постійного струму напругою 110 В через DC/DC конвертор, що знижує напругу 110В до 12В. Узгодження значення напруги мережі із напругою живлення мікроконтролера відбувається через інтегральний стабілізатор напруги DA7805, на виході якого отримують стабілізовану напругу +5 В для живлення мікроконтролера PIC12F675.

Інформацію про поточне значення струму в колі живлення допоміжної машини знімають безконтактним датчиком струму на ефекті Холла. Сигнал від датчика струму приходить на клеми X1 X2 у вигляді змінної напруги. Ця напруга випрямляється за допомогою мостового випрямляча, зібраного на чотирьох діодах VD1-VD4 і через згладжуючий фільтр, подається на потенціометр R2, що використовується в якості підлаштовуючого подільника напруги. Сигнал з подільника напруги подається в АЦП мікроконтролера, де відбувається його перетворення із аналогової форми в цифрову і подальша обробка відповідно до алгоритму програми.

Під час програмування мікроконтролера в нього передається інформація про витримку в часі перед спрацюванням захисту при певних значеннях струму перевантаження двигуна. Ця інформація отримана із часострумової характеристики допоміжного асинхронного двигуна (рис. 11), який захищено даним пристроєм із урахуванням класу ізоляції за нагрівостійкістю.

Відповідно до алгоритму роботи пристрою мікроконтролер формує сигнал на керування котушкою реле K1, силові контакти якої знаходяться в колі керування контактором допоміжної машини. Сигнал із порту GP2 мікроконтролера (ніжка № 5) через струмообмежуючий резистор R3 потрапляє в базу транзистора VT1, який працює в ключовому режимі. При наявності струму в базі транзистора VT1 він відкривається і котушка реле K1 отримує живлення +12В від акумуляторної батареї або мережі постійного струму напругою 12В. При цьому її силові контакти замикаються і збирається штатна схема живлення допоміжної машини через індивідуальний контактор. Наявність сигналу на спрацювання реле K1 можна контролювати візуально за допомогою світлодіода VD6 червоного кольору, що горить, коли мікроконтролер подає сигнал на замикання реле.

Коли на вхід АЦП мікроконтролера від датчика струму надходить напруга, пропорційна струмові перевантаження певної кратності, мікроконтролер запускає підпрограму реалізації витримки часу, що відповідає допустимій тривалості перевантаження при цьому значенні струму. По закінченні роботи підпрограми витримки часу система знову перевіряє поточне значення струму і, якщо воно не досягло номінального значення, формує сигнал на відключення допоміжної машини. При цьому зникає сигнал +5В на виході порту GP2 мікроконтролера, без струму бази закривається транзистор VT1 і котушка реле K1 втрачає живлення, розриваючи своїми силовими контактами коло живлення індивідуального контактора допоміжного двигуна, гасне світлодіод VD6. Повторний запуск допоміжної машини можливий одразу після примусового вимкнення. Якщо з будь-яких причин струм, споживаний двигуном не зменшиться до струму номінальної уставки протягом встановленого часу пристрій теплового захисту знову відключить допоміжну машину.

Впровадження заходів із підвищення якості електричної енергії, що живить допоміжні двигуни, а також пристроїв захисту допоміжних машин на мікропроцесорній елементній базі дозволяє отримати ефект у вигляді збільшення терміну служби допоміжних машин в 1,7...7,5 рази у порівнянні із реальним терміном служби в експлуатації.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішено актуальну наукову задачу підвищення терміну служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії EP9M шляхом зниження температури перегріву до гранично допустимих значень ізоляції обмоток статорів за рахунок контролю за якістю електричної енергії, якою живляться допоміжні машини. Отримані результати в сукупності мають суттєве значення в області електричного транспорту та його електропостачання.

Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації полягають у наступному:

1. Статистичний аналіз виходу з ладу допоміжних машин електропоїздів змінного струму по основним депо протягом 2008 – 2012р.р. показує, що в середньому за рік відбувається близько 20% позапланових замін допоміжних

машин з причин їх виходу з ладу. Основною причиною виходу з ладу асинхронних двигунів допоміжних машин є пробій ізоляції на корпус, який на думку автора, виникає в процесі експлуатації при низькій якості живлячої електроенергії і недостатньої точності спрацювання захисних теплових реле. Експериментально доведено, що теплові реле, які використовуються в якості захисту допоміжних машин на електропоїздах ЕР9М володіють недостатньою для існуючих умов експлуатації точністю спрацювання. В результаті лабораторного дослідження виявлено похибку часу спрацювання теплових реле серії ТРТП-115 від 20,7% до 74,3% у порівнянні із паспортним часом спрацювання.

2. При живленні системи допоміжних машин від фазорозщеплювача електрична енергія характеризується низьким рівнем якості: несиметрія живлячої напруги при зміні навантаження на фазорозщеплювач коливається в межах 3..7%, а відхилення напруги в системі становить ($-27,3\% \dots 18,2\%$) при зміні напруги в контактній мережі в діапазоні 19...29 кВ. Отримано аналітичні вирази залежності коефіцієнта несиметрії напруги від електричного навантаження фазорозщеплювача у вигляді многочленів п'ятого, шостого та восьмого степенів при найбільш характерних значеннях напруги на вході фазорозщеплювача – 160, 205, 220, 225 та 260 В.

3. В реальних умовах експлуатації перегрів допоміжних машин в середньому для різних видів машин знаходиться в діапазоні $68 \dots 124,3^\circ\text{C}$ і при відхиленнях напруги від номінального значення не залежить від температури частин машини при роботі в номінальному режимі, а лише пропорційний величині відносного відхилення напруги. Зниження напруги в колах живлення допоміжних машин змінного струму до 160 В дає додатковий перегрів на $16,4^\circ\text{C}$.

4. Встановлено, що гранично допустимими значеннями несиметрії напруги за умовами нормального робочого перегріву обмоток статора допоміжних машин (при відхиленні напруги $-27,3\%$) є значення $K_{2U} = 5 \dots 7\%$ при класі ізоляції В для всіх машин, крім двигуна вентилятора пасажирського салону АОМ 32-4, для якого при тому ж самому класі ізоляції гранично допустимими значеннями коефіцієнта несиметрії напруги є $K_{2U} = 1 \dots 2\%$.

5. Удосконалення математичної теплової моделі допоміжних машин електропоїзда змінного струму, дозволило визначити найбільш раціональне сполучення факторів, що впливають на нагрівання їх статорних обмоток, а саме коефіцієнта запасу за потужністю, відхилення напруги та несиметрії живлячої напруги, при яких статорні обмотки допоміжних машин не будуть перегріватися понад гранично допустимі значення температури для відповідних класів ізоляції.

6. Встановлено, що вибір двигуна із запасом за потужністю $k_3 = 1,4$ призводить до зниження перегріву його обмотки статора на $33,5\%$ у порівнянні із перегрівом обмотки статора аналогічного двигуна, який працює без запасу за потужністю; збільшення коефіцієнту запасу до $k_3 = 1,8$ зменшує перегрів на $20,8\%$ у порівнянні із аналогічним двигуном, що працює із $k_3 = 1,4$.

7. Визначено межі гранично допустимих значень коефіцієнта несиметрії живлячої напруги при різних значеннях напруги обмотки живлення додат-

кових кіл головного тягового трансформатора, вплив на нагрівання статорних обмоток від дії яких компенсується проектним запасом за потужністю приводних двигунів. Для двигуна компресора гранично допустимі значення k_{2U} становлять $k_{2U} = [8...10\%]$; для насоса трансформатора - $k_{2U} = [11...12,5\%]$; для двигуна вентилятора АОМ 32-4 - $k_{2U} = [4,5...5,5\%]$; для двигуна вентилятора АОМ 22-2 - $k_{2U} = [4...11,5\%]$.

8. Запропоновано структуру та принципову схему пристрою для контролю якості електричної енергії, якою живляться допоміжні машини електропоїзда змінного струму серії EP9M, із системою керування на базі мікроконтролерів сімейства Microchip PIC16F676, яка дозволяє . Розроблено методику із визначення гранично допустимої тривалості перевантаження допоміжної машини з урахуванням класу ізоляції і розроблено принципову схему пристрою для захисту допоміжних машин електропоїздів змінного струму від теплових перевантажень, проведено експериментальні випробування з метою встановлення працездатності запропонованого пристрою, які повністю підтверджують працездатність експериментального зразка.

9. Для симетрування системи напруг, коефіцієнт несиметрії якої знаходиться в діапазоні від 2% до 14%, якою живляться допоміжні машини потрібно застосовувати конденсаторні батареї наступних ємностей: для двигуна компресора ум. № 548 – 300...1900 мкФ; для двигуна насоса трансформатора 2ТТ-16/10-01 – 50...300 мкФ; для двигуна вентилятора АОМ 32-4 – 100...650 мкФ; для двигуна вентилятора АОМ 22-2 – 50...325 мкФ;

10. Асинхронний двигун типу АОЛ2 31-4, який працює із номінальним навантаженням в годинному режимі, досягає наступних значень температури найбільш навантажених фаз: при $k_{2U} = 0$ - 43,5°C; при $k_{2U} = 2,44$ - 45,5°C; при $k_{2U} = 7,03$ - 82,3°C; при $k_{2U} = 9,12$ - 110,97°C; при 160 В – 60,19°C; при 205 В – 47,97°C; при 225 В – 44,7°C; при 260 В – 55,45°C. При цьому похибка між експериментально отриманими значеннями перегріву та його аналітично розрахованими значеннями при тих же значеннях коефіцієнта несиметрії напруги не перевищує 5%, чим доведено можливість застосування узагальненої теплової моделі асинхронного двигуна для визначення додаткового нагрівання допоміжних машин в умовах реальної експлуатації.

11. Встановлено, що при підвищенні несиметрії живлячої напруги до значення 8...9 % термін служби для допоміжних машин електропоїзда EP9M, в яких застосовано клас ізоляції В, скорочується в 1,7...7,5 раз. При збільшенні коефіцієнта несиметрії напруги до 10% (теоретично) термін служби у двигунів скорочується до менше ніж одного року, тобто в 15 разів у порівнянні із 15 роками, що встановлено заводом-виготовлювачем. Зниження коефіцієнта несиметрії живлячої напруги до 6...7% дозволить продовжити реальний термін служби 1,7...7,5 рази у порівнянні із терміном служби в 15 років, що встановлено заводом-виготовлювачем.

Список опублікованих наукових праць за темою дисертаційної роботи.

Основні праці:

1. Балійчук О.Ю. Аналіз роботи допоміжних електричних машин електропоїздів залізниць України / А.М. Муха, О.Ю. Балійчук, І.Є. Скогарєв // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2014. - № 37. – С.143 – 150. – Бібліогр.: с. 150.

2. Балійчук О.Ю. Вплив якості живлячої електроенергії на нагрівання допоміжних машин електрорухомого складу змінного струму / О.Ю. Балійчук, Л.В. Дубинець, О.М. Духновський, О.О. Маренич, О.Л. Маренич // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2014. - № 3(51). – С.34 – 41. – Бібліогр.: с. 38.

3. Балійчук О.Ю. Термін служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму / О.Ю. Балійчук, // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. - № 2(56). – С.116 – 125. Бібліогр.: с. 125.

4. Балійчук О.Ю. Нагрівання і захист допоміжних машин електропоїздів змінного струму при короткочасних перевантаженнях / О.Ю. Балійчук // Електрифікація транспорту. – 2014. № 8/2014. – С.79 – 85. Бібліогр.: с. 83.

5. Патент 95540 Україна, МПК G05F 1/00, H02M 3/24. Пристрій для забезпечення симетрії живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму / Балійчук О.Ю.; заявник і патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. - № u201408026; заявл. 16.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл.№ 24.

Додаткові праці:

6. О.Ю. Балійчук Особливості експлуатації і надійність допоміжних машин електропоїздів змінного струму залізниць України. / А.М. Муха, О.Ю. Балійчук, І.Є. Скогарєв // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 15 – 16 травня, 2014 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2014. – С.137 – 138.

7. Балійчук О.Ю. Вплив якості живлячої електроенергії на нагрівання допоміжних машин електрорухомого складу змінного струму / О.Ю. Балійчук, Л.В. Дубинець, О.М. Духновський, О.О. Маренич, О.Л. Маренич // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 15 – 16 травня, 2014 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2014. – С. 128 – 129.

8. Балійчук О.Ю. Вплив якості живлячої енергії на термін служби допоміжних машин електрорухомого складу змінного струму / О.Ю. Балійчук, О.Л. Маренич, Л.В. Дубинець // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: междунар. научно-практ. конф., 11 – 13 июня, 2014 р.: тезисы докл. – Д.: ДНУЗТ, 2014. – С. 15

9. Балійчук О.Ю. Вплив деяких показників якості електричної енергії на стан ізоляції не тягових споживачів на електрорухомому складі змінного струму / О.Ю. Балійчук // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: междунар. научно-практ. конф., 11 – 13 июня, 2014 р.: тезисы докл. – Д.: ДНУЗТ, 2014. – С. 15 – 16.

10. Балійчук О.Ю. Нагрівання допоміжних машин електропоїздів змінного струму // Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2014» (Одеса – Дніпропетровськ, 23.10-26.10.2014): Матеріали VII Міжнарод. научно-практ. конф. / ДНУЖТ. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 65-66.

11. Балійчук О.Ю. Підвищення надійності допоміжних машин електропоїздів змінного струму / О.Ю. Балійчук, Л.В. Дубинець, О.М. Духновський // Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2014» (Одеса – Дніпропетровськ, 23.10-26.10.2014): Матеріали VII Міжнарод. научно-практ. конф. / ДНУЖТ. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 66.

12. Балійчук О.Ю. Підвищення надійності роботи перетворювачів електропоїздів постійного струму / О.Ю. Балійчук, Р.В. Краснов, Д.В. Устименко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 14 – 15 травня, 2015 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2015. – С.114 – 115.

13. Балійчук О.Ю. Поліпшення якості електричної енергії, що живить допоміжні машини електропоїздів змінного струму / О.Ю. Балійчук // Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості: міжнар. наук. – практ. конф., 10 – 13 червня, 2015 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2015. – С. 10 – 11.

АНОТАЦІЯ

Балійчук О.Ю. Підвищення терміну служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2015.

Дисертація присвячена питанню підвищення терміну служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М шляхом підвищення якості електричної енергії, якою живляться допоміжні машини, та підвищення точності спрацьовування теплового захисту цих машин за рахунок використання пристроїв захисту на сучасній мікропроцесорній елементній базі.

За допомогою розробленої теплової математичної моделі допоміжних машин електропоїзда ЕР9М визначено перегрів обмоток статорів допоміжних машин в умовах реальної експлуатації з урахуванням навантаження допоміжних машин, коефіцієнта несиметрії живлячої напруги та відхилення її від номінального значення. Визначено гранично допустимі значення коефіцієнта несиметрії живлячої напруги, дія яких не призводить до перегріву обмоток статорів допоміжних машин понад допустимі значення температури для певних класів ізоляції.

Розроблено принципові схеми пристрою контролю і підвищення якості електричної енергії та пристрою теплового захисту допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М та подібних. На основі результатів мате-

матичного моделювання отримано ряд параметрів необхідних для налаштування цих пристроїв.

Отримані наукові результати дозволили розробити рекомендації щодо вибору раціональних запасів за потужністю приводних двигунів для типових допоміжних машин електропоїздів серії EP9M, які компенсують шкідливу дію низької якості електричної енергії, що живить ці машини, а також визначити межі значень коефіцієнта несиметрії напруги, дія якої компенсується наявністю проектного запасу за потужністю приводних двигунів, які зараз встановлені на електропоїздах.

Ключові слова: електропоїзд, змінний струм, показники якості електричної енергії, термін служби, допоміжні машини, перегрів.

АННОТАЦИЯ

Балийчук А.Ю. Повышение срока службы вспомогательных машин электропоездов переменного тока. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 - электротранспорт. - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2015.

Диссертация посвящена вопросу повышения срока службы вспомогательных машин электропоездов переменного тока серии ЭР9М путем повышения качества электрической энергии, которой питаются вспомогательные машины, и повышения точности срабатывания тепловой защиты этих машин за счет использования устройств защиты на современной микропроцессорной элементной базе.

Статический анализ количества выходов из строя моторвагонного подвижного состава железных дорог Украины показал, что около 20% вспомогательных машин электропоездов переменного тока ежегодно выходят из строя.

В результате проведенных исследований установлено, что основными причинами выхода из строя вспомогательных машин электропоездов переменного тока является низкое качество питающей электрической энергии и низкая точность срабатывания штатной тепловой защиты вспомогательных машин, вследствие чего последние претерпевают перегрев свыше гранично допустимых значений, что существенно сокращает срок службы изоляции обмоток машин и приводит к их преждевременному выходу из строя. Исследования показали, что наибольшего влияния с точки зрения теплового состояния изоляции обмоток статора вспомогательных машин имеет коэффициент несимметрии питающего напряжения и отклонение напряжения от номинального значения.

С помощью разработанной тепловой математической модели вспомогательных машин электропоезда ЭР9М определен перегрев обмоток статоров вспомогательных машин в условиях реальной эксплуатации с учетом нагрузки вспомогательных машин, коэффициента несимметрии питающего напряжения

и отклонения его от номинального значения. Определены предельно допустимые значения коэффициента несимметрии питающего напряжения, действие которых не приводит к перегреву обмоток статоров вспомогательных машин сверх допустимых значений температуры для определенных классов изоляции, что позволяет разработать рекомендации относительно повышения уровня качества питающей электроэнергии в системе питания вспомогательных машин электропоездов переменного тока серии ЭР9М в этих пределах.

Проведен анализ известных способов повышения качества питающей электроэнергии на предмет возможности применения их в цепях вспомогательных машин электропоезда ЭР9М. В частности предложена структура и алгоритм работы симметрирующего устройства на базе батарей емкостных элементов с системой управления на микроконтроллерах. Разработаны принципиальные схемы устройства контроля и повышения качества электрической энергии и устройства тепловой защиты вспомогательных машин электропоездов переменного тока серии ЭР9М и подобных. На основе результатов математического моделирования получен ряд параметров необходимых для настройки этих устройств.

Полученные научные результаты позволили разработать рекомендации по выбору рациональных запасов по мощности приводных двигателей для типовых вспомогательных машин электропоездов серии ЭР9М, которые компенсируют вредное воздействие низкого качества электрической энергии, питающей эти машины, а также определить границы значений коэффициента несимметрии напряжения, действие которой компенсируется наличием проектного запаса по мощности приводных двигателей, которые сейчас установлены на электропоездах.

Ключевые слова: электропоезд, переменный ток, показатели качества электрической энергии, срок службы, вспомогательные машины, перегрев.

ABSTRACT

Baliichuk O. Yu. Increasing the life time of auxiliary machines of AC electrical multiple unit trains. - The Manuscript.

The thesis work for a degree of candidate of technical sciences in specialty 05.22.09 – electrical transport. – Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazarjan, Dnepropetrovsk, 2015.

The thesis dedicated to improving the life time of auxiliary electric machines of AC electrical multiple unit trains ER9M series by improving the quality of electricity, which feeds auxiliary machines and by improving the operation accuracy of thermal protection these vehicles by use protection devices on modern microprocessor element base.

By means a thermal mathematical model of auxiliary electric machines of AC electrical multiple unit trains ER9M series, which developed, defined overheat of stator of auxiliary electric machines in a real operation conditions including auxiliary machine's load, asymmetry factor and supply voltage deviation from its nominal value. Defined maximum permissible values of supply voltage asymmetry coefficients,

whose action does not lead to overheat of stator of auxiliary machines over allowable temperature for certain classes of isolation.

Developed principles circuits of device for monitoring and improving the quality of electricity and device for thermal protection of auxiliary electric machines of AC electrical multiple unit trains ER9M series and like them too. Based on mathematical modeling received a number of parameters needed to configure these devices.

The obtained scientific results have allowed to develop recommendations on the choice of rational reserves for power outputs for typical auxiliary electric machines of AC electrical multiple unit trains ER9M series that compensate for the harmful influences of poor quality electrical power that feeds these machines, as well as define the limits of values of voltage asymmetry, the effect of which is offset by the availability of project reserve for power outputs that are currently installed on trains.

Keywords: electric rolling stock, alternating current, marks of quality of electrical energy, life time, auxiliary machines, overheat.

Балійчук Олексій Юрійович

**ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ДОПОМІЖНИХ МАШИН
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Формат паперу 60×48 1/16. Папір для розмножувальних апаратів. Різограф
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна

Свідоцтво ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса університету і дільниці оперативної поліграфії:
49010, вул. акад. В Лазаряна, 2, Дніпропетровськ
www.diit.dp.ua