

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

На правах рукопису

БАЛІЙЧУК ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 629.423.064.5:621.3.025

ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ДОПОМІЖНИХ МАШИН
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

05.22.09 – електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник
Муха Андрій Миколайович
доктор технічних наук, професор

Дніпропетровськ - 2015

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	5
 РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ	 12
1.1. Статистичний аналіз виходу з ладу допоміжних машин електропоїздів змінного струму по Укрзалізниці	 12
1.2. Причини і фактори, що впливають на вихід з ладу допоміжних машин.....	 14
1.3. Аналіз існуючих схем живлення допоміжних машин на рухомому складі змінного струму.....	 15
1.4. Аналіз схем захисту допоміжних машин на електропоїздах змінного струму.....	 27
1.5. Постановка і шляхи вирішення задачі досліджень.....	34
1.6. Висновки до першого розділу	35
 РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕЯКИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА НАГРІВАННЯ СТАТОРНИХ ОБМОТОК ДОПОМІЖНИХ МАШИН.....	 37
2.1. Причини зниження показників якості електричної енергії, що живить допоміжні машини при роботі від фазорозщеплювача.....	 37
2.2. Залежність несиметрії живлячої напруги від електричного навантаження фазорозщеплювача.....	 40
2.3. Дослідження впливу коефіцієнта несиметрії живлячої напруги на додатковий нагрів ізоляції машин	 51
2.4. Вплив зміни значення рівня живлячої напруги на додатковий нагрів ізоляції машин	 54
2.5. Дослідження сумарного нагріву ізоляції з урахуванням всіх додаткових нагрівів	 57
2.6. Висновки до другого розділу.....	59

РОЗДІЛ 3 ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЗМІННОГО СТРУМУ	61
3.1. Аналіз існуючих аналітичних методів визначення нагріву електричних машин.....	61
3.2. Метод узагальненої теплової моделі як спосіб визначення середнього перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна.....	67
3.3. Врахування проектного запасу за потужністю допоміжних машин при визначенні середнього перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна	70
3.4. Математична тепла модель статорних обмоток допоміжних машин електропоїзду змінного струму серії EP9M	77
3.5. Визначення перегріву обмоток статора допоміжних машин електропоїзда EP9M при реальній експлуатації за допомогою математичної моделі	84
3.6. Висновки до третього розділу	91

РОЗДІЛ 4 ПРИСТРОЇ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ ДОПОМІЖНИХ МАШИН	93
4.1. Теоретичні передумови симетрування живлячої напруги та обґрунтування структури симетруючого пристрою для живлення допоміжних машин електропоїзда EP9M	93
4.2. Вибір потужності ємнісного СП для симетрування живлячої напруги допоміжних машин електропоїзда EP9M.....	95
4.3. Синтез структури пристрою теплового захисту асинхронних допоміжних машин електропоїздів серії EP9M.....	103
4.3.1. Теоретичні передумови роботи запропонованого пристрою теплового захисту асинхронних допоміжних машин	103

4.3.2. Схема та принцип дії запропонованого пристрою теплового захисту допоміжних машин.....	112
4.4. Експериментальне дослідження впливу коефіцієнта несиметрії та відхилення напруги живлення від номінального значення на температуру нагріву обмоток статора асинхронних допоміжних машин.....	114
4.5. Вплив якості живлячої енергії на термін служби допоміжних машин електропоїзда ЕР9М	123
4.6. Висновки до четвертого розділу.....	125
 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	 128
 ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	 132
ДОДАТОК А Акти впровадження результатів дослідження	141
ДОДАТОК Б Довідка про капітальні ремонти допоміжних машин ПрАТ «КЕВРЗ»	143
ДОДАТОК В Випробування електротеплових реле на точність спрацьовування	144
ДОДАТОК Д Визначення числових значень залежності коефіцієнта несиметрії від електричного навантаження фазорозщеплювача при проміжних значеннях напруги	154
ДОДАТОК Є Апроксимація емпіричної залежності аналітичним виразом за допомогою програмного середовища Origin 6.1.....	161
ДОДАТОК Ж Розрахунки нагріву асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором за допомогою математичного процесора MathCad	164

ВСТУП

Основним видом рухомого складу, яким виконуються приміські пасажирські перевезення на залізницях України, наразі є електропоїзди. Інвентарний парк Укрзалізниці складається із електропоїздів виробництва Ризького вагонобудівного (Латвія), Луганського тепловозобудівного (Україна) та Деміхівського машинобудівного заводів (Російська Федерація) різних років побудови. Загальна кількість секцій, що знаходяться в експлуатації, станом на 2014 рік складає 1340 одиниць, що приблизно становить 270 електропоїздів. Найбільш багаточисленими є електропоїзди виробництва РВЗ серії ЕР. На ділянках Укрзалізниці, які електрифіковано змінним струмом, основним видом моторвагонного рухомого складу (МВРС) є електропоїзди серії ЕР9М [60, 61].

Хоча електропоїзди змінного струму серії ЕР9М в багатьох випадках вже відпрацювали свій встановлений термін служби, проте адміністрацією Укрзалізниці впроваджуються організаційно технічні заходи щодо продовження встановленого терміну служби до 50 років. В рамках названих заходів проводяться роботи із підвищення надійності машин, механізмів і обладнання – заміна несправних вузлів, капітальний ремонт і модернізація[60].

При виконанні капітальних ремонтів електропоїздів змінного струму серії ЕР9М в першу чергу приділяється особлива увага тяговим електричним двигунам, апаратам керування, екіпажній частині МВРС, моральному і санітарно-гігієнічному стану останнього, виконується також заміна допоміжних машин, що вийшли з ладу під час експлуатації.

Основною причиною виходу з ладу допоміжних машин електропоїздів серії ЕР9М є ушкодження ізоляційного шару обмотки статора внаслідок перевищення гранично допустимих значень температури робочого перегріву, через що відбувається скорочення терміну служби ізоляційного шару і, відповідно, зниження працездатності допоміжних машин.

Причинами перевищення допустимої температури робочого перегріву обмотки статора електричної машини можуть бути перевантаження під час експлуатації, недостатня точність спрацювання теплового захисту і додаткові перегріву обмоток статорів електричних машин внаслідок живлення їх електрич-

ною енергією більш низької якості (із значним відхиленням напруги від номінального значення та несиметрією живлячої напруги, що більша за гранично допустимі значення) [24, 34, 77]. Останнє є можливим на електропоїздах побудованих за спільною схемою електричної частини (серії електропоїздів ЕР9М, ЕД9М, ЕПЛ9Т), де живлення асинхронних допоміжних машин загальнопромислового виконання здійснюється від електромашинного перетворювача кількості фаз – фазорозщеплювача [17, 23].

Проблемам покращення показників якості електричної енергії в колах допоміжних машин електрорухомого складу та дослідженню умов роботи трифазних асинхронних двигунів на ньому присвячено велику кількість робіт відомих вчених, таких як В.І.Бочаров, Д.Д. Захарченко, М.А. Козорезов, В.В. Кравчук, А.С. Курбасов, А.Л. Лісцін, В.Н. Лісунов, О.А. Маєвський, Л.В. Маханьков, Л.А. Мугінштейн, О.А. Некрасов, А.В. Плакс, В.Є. Розенфельд, Н.А. Ротанов, А.М. Рутштейн, Б.М. Тихменьов, Л.М. Трахтман, В.П. Феокистов, В.П. Янов та ін. Однак, недостатньої уваги знайшли в названих роботах [27, 36, 40, 48, 57, 58] питання теплового захисту допоміжних машин та впливу якості живлячої електроенергії на перегрів допоміжних машин, їх термін служби.

Перед автором постає задача дослідити вплив якості електричної енергії на величину перегріву обмоток статорів і термін служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М в умовах реальної експлуатації, а також на основі проведених досліджень і отриманих результатів розробити рекомендації, схемні рішення і методи щодо зниження цього впливу на температуру перегріву обмоток статора допоміжних машин. Впровадження цих заходів при модернізації існуючих електропоїздів серії ЕР9М дозволить збільшити термін служби їх допоміжних машин.

Актуальність теми:

Представлена робота присвячена питанню підвищення терміну служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії ЕР9М шляхом зниження температури перегріву до гранично допустимих значень ізоляції обмоток ста-

торів за рахунок контролю за якістю електричної енергії, якою живляться допоміжні машини, та підвищенням її деяких показників, а також впровадження розробленого автором зразку мікропроцесорного теплового реле для захисту допоміжних машин із урахуванням гранично допустимої тривалості перевантаження і класу ізоляції для кожної окремої допоміжної машини. Незважаючи на те, що існують добре відомі методи щодо вибору раціональної потужності приводних двигунів допоміжних машин [21, 36, 48], 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 АИР. 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 недостатню точність спрацювання штатного теплового захисту і довели необхідність при захисті допоміжних машин враховувати не тільки їх номінальний струм (як це рекомендовано у відповідній технічній літературі [79]), 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.

Аналіз робіт, що виконувались фахівцями галузі до досліджень автора [27, 36, 40, 48, 57, 58], вказує на низький рівень якості електричної енергії в системі живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії EP9M 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 допустимих 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 проведення досліджень з метою розробки рекомендацій по підвищенню терміну служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму.

Мета роботи:

Метою роботи є підвищення терміну служби 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.

Об'єкт досліджень: процеси впливу якості живлячої напруги на працездатність допоміжних машин електропоїздів.

Предмет досліджень: допоміжні машини електропоїздів змінного струму.

Наукова новизна отриманих результатів:

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 неси-

метрії 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 враховуванням 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. Впровадження рекомендацій, отриманих в результаті проведених досліджень, дає змогу суттєво підвищити термін служби допоміжних машин електропоїздів змінного струму і 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, 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.

Особистий внесок здобувача.

Мета та задачі дослідження сформульовано автором спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, викладені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем 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 у 13 наукових працях, у тому числі: 4 – статті у фахових наукових виданнях, в тому числі 2 роботи, опубліковані 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.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Статистичний аналіз виходу з ладу допоміжних машин електропоїздів змінного струму по Укрзалізниці

З метою визначення надійності роботи існуючих систем допоміжних машин ЕРС в реальних умовах автором було проведено аналіз технічного стану електропоїздів залізниць України за 2009 – 2012р.р., за основу якого взято офіційну статистику Головного управління приміських пасажирських перевезень [11].

Основними депо по обслуговуванню електропоїздів змінного струму на Укрзалізниці є депо Фастів (Південно-Західна залізниця) та депо Одеса-Застава (Одеська залізниця), як депо із найбільшим приписним парком МВРС змінного струму.

Основними серіями електропоїздів змінного струму, що експлуатуються на Укрзалізниці на сьогодні, ЕР9, ЕР9П, ЕР9Е, ЕР9М, ЕР9ЕТ, ЕР9Т, ЕД9М, ЕПЛ9Т.

Протягом 2008 – 2012 р.р. у зв'язку із старінням парку моторвагонного рухомого складу на залізницях України проводять щорічні роботи по виконанню капітальних ремонтів в умовах ремонтних заводів електропоїздів серій ЕР1, ЕР2, ЕР9П, ЕР9М з подовженням терміну служби та відновлювальних ремонтів в умовах моторвагонних депо. З 2010 року введені в дію технічні умови, що дозволяють продовжити термін служби електропоїздів названих серій до 50 років.

Частіше за все несправності допоміжних машин виявляють в межах проведення поточних ремонтів (ПР) та виконують заміну несправного агрегату. Існує статистика позапланової заміни допоміжних машин. Кількість позапланових машин, що було замінено протягом 2008 – 2012 р.р по основним депо, наведено в табл. 1.1.

На рис. 1.1 наведено діаграму розподілу кількості позапланових замін допоміжних машин електропоїздів змінного струму по основним депо протягом 2008 – 2012р.р.

Кількість непланових замін допоміжних машин

Роки	2008	2009	2010	2011	2012
Кількість замін, шт	209	207	359	380	415

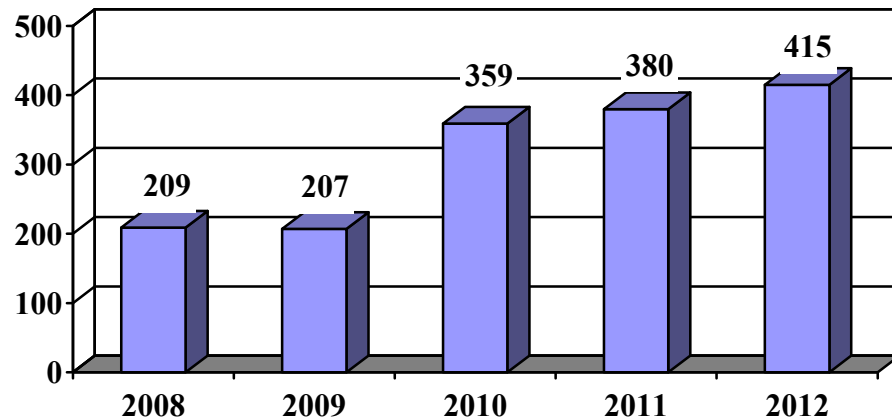


Рис. 1.1. Розподіл кількості позапланових замін допоміжних машин електропоїздів змінного струму по основним депо протягом 2008 – 2012р.р.

Як впливає із діаграми, протягом останніх 5 років кількість непланових замін допоміжних машин по основним депо коливалася в широких межах. В 2009 році трохи знизилась кількість замін у порівнянні із попереднім роком на 2 випадків – 207 у 2009 р. проти 209 у 2008 р.; в 2010 р. спостерігається стрімке зростання кількості непланових замін допоміжних машин на 152 випадків, що в 1,73 рази більше ніж в попередньому році; протягом 2011 року продовжується зростання кількості позапланових замін несправних допоміжних машин – загальна кількість замінених машин збільшилась на 21 одиницю в порівнянні із 2010 роком і в 2012 році мав місце приріст кількості замін обладнання на 35 одиниць у порівнянні із попереднім роком. Середня кількість замінених позапланово протягом 5 років допоміжних машин складає в цілому по основним депо 314 штук щорічно, що підтверджує необхідність проведення відповідних досліджень і розробки на їх основі комплексу заходів по підвищенню надійності допоміжних машин електропоїздів змінного струму.

1.2. Причини і фактори, що впливають на вихід за ладу допоміжних машин

Основними видами несправностей, відповідно до статистичних даних (див. додаток Б), є ушкодження ізоляції – пробій ізоляції на корпус, міжвиткові замикання та інші ушкодження обмотки. Причинами передчасного виходу з ладу ізоляції обмоток електричних двигунів є теплове старіння ізоляції внаслідок перевищення допустимих температур частин двигуна.

Перегрів ізоляції двигунів може виникати при зниженні якості живлячої електричної енергії. Норми якості електричної енергії (ЯЕ) в системах електропостачання загального призначення визначені міждержавним ГОСТ 13109-97 [12]. На електропоїздах серії ЕР9М при живленні допоміжних машин від обертового розщеплювача фаз норми якості живлячої електричної енергії наближені до вимог вказаного стандарту 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 контактної мережі лежить в діапазоні 19...27,5 кВ [15], а навантаження асинхронного фазорозщеплювача коливається від 0,8кВт до 11 кВт. Тобто двигуни названих серій працюють в суттєво більш важких умовах, ніж у промисловості з точки зору якості живлячої електричної енергії. Це призводить до перегріву ізоляції і відповідно її пробою, чим зменшується тривалість служби допоміжних машин.

Зниження тривалості служби асинхронного двигуна при живленні його від джерела із низькою якістю електричної енергії пов'язано, передусім, з тепловим старінням ізоляції через перевищення температури обмотки статора внаслідок значної несиметрії струмів навіть при незначній несиметрії напруги живлення. При несинусоїдності напруги виникає перегрів за рахунок додаткових втрат активної потужності в обмотках статора, ротора і сталі АД. Значного впливу на теплове старіння ізоляції і скорочення терміну служби АД також завдають відхилення напруги від номінального значення [13, 14].

Отже, можливими причинами через які відбувається вихід з ладу допоміжних машин, є додаткові перегріву ізоляції внаслідок зниження якості живлячої енергії та мала точність теплових реле. Вказані обставини потребують відповідного дослідження, які проведені автором в подальших розділах.

1.3. Аналіз існуючих схем живлення допоміжних машин на рухомому складі змінного струму

На електрорухомому складі змінного струму в якості приводних двигунів різноманітних допоміжних машин і агрегатів застосовують трифазні асинхронні двигуни загальнопромислового виконання. Їх живлення відбувається від обмотки власних потреб тягового трансформатора через електромашинний перетворювач – фазорозщеплювач [1 - 5]. Цей спосіб є одним із найбільш розповсюджених на рухомому складі, що сьогодні експлуатується на залізницях України. Однак, на більш сучасних зарубіжних електровозах та електропоїздах, рухомому складі, який тільки вводиться в експлуатацію, а також на перспективному рухомому складі для живлення допоміжних машин застосовують статичні перетворювачі власних потреб, які входять до складу тягового перетворювача [50 - 53].

Перетворення однофазного струму в трифазний розщеплювачем фаз засновано на властивості обертового магнітного потоку асинхронного електродвигуна наводити в трифазній статорній обмотці електрорушійні сили, зсунуті в часі відповідно до розташування обмоток на статорі. Застосовують асинхронні розщеплювачі фаз, які за конструкцією подібні до асинхронних двигунів [1 - 5].

В топології побудови схем живлення допоміжних машин від фазорозщеплювача на вітчизняному електрорухомому складі змінного струму виділено три основних напрями [1 – 5, 6]:

1. Системи із несиметричним фазорозщеплювачем.
2. Системи із несиметричним фазорозщеплювачем і вирівнюючим трансформатором.
3. Конденсаторно-розщеплювальні системи.

Система допоміжних машин із несиметричними фазорозщеплювачами будується за схемою, наведеною на рис. 1.2.

Перетворення кількості фаз здійснюють комбіновано розщеплювачами фаз і конденсаторами, які увімкнені на затискачі двигунів. Застосовують розщеплювачі фаз із несиметричною обмоткою, яку конструюють так, щоб забезпечити задовільну симетрію живлення двигунів при повному навантаженні.

Система із симетричним розщеплювачем та вирівнюючим трансформатором будується за схемою, наведеною на рис. 1.3.

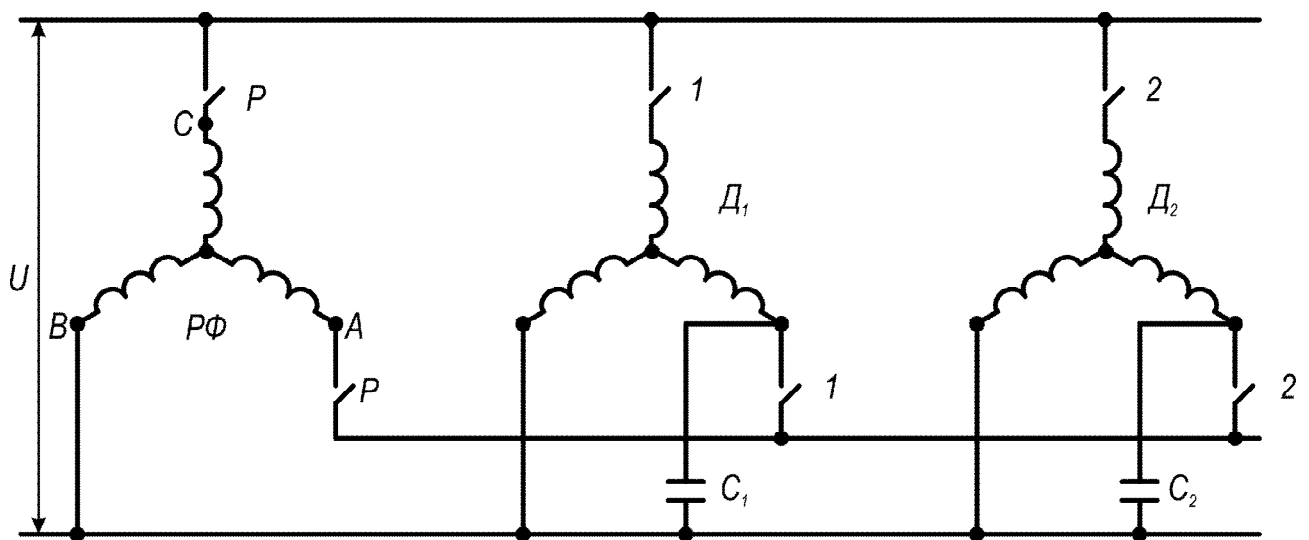


Рис.1.2. Система допоміжних машин із несиметричним фазорозщеплювачем

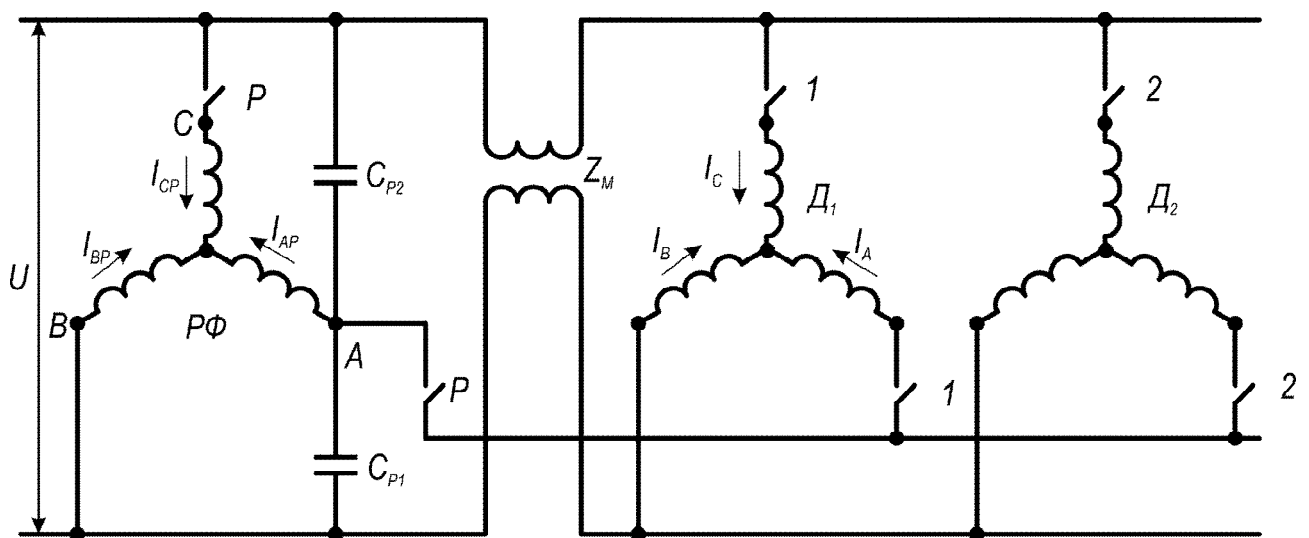


Рис. 1.3. Система допоміжних машин із симетричним розщеплювачем і вирівнюючим трансформатором

Під навантаженням спеціальний трансформатор вводить в коло живлячих лінійних проводів додаткові напруги, які вирівнюють трикутник лінійних напруг трифазної системи. Вирівнююча дія тим більша, чим більше навантаження. На холостому ході трифазну напругу симетрують конденсаторами. В результаті при коливаннях навантаження в межах $0,5 \dots 1,5$ номінального навантаження несиметрія напруги залишається в межах 2%. Недоліком даної системи є те, що напруга прямої послідовності значно зменшується із навантаженням при низькому коефіцієнті потужності.

Така система могла б бути застосована на електропоїздах, коли сумарне навантаження фазорозщеплювача від споживаної потужності допоміжних двигунів в умовах реальної експлуатації суттєво коливається, але широкого розповсюдження схема не знайшла.

Відомими також є системи допоміжних машин без розщеплювачів. В них перетворення кількості фаз відбувається за рахунок лише конденсаторів. Така система називається конденсаторно-розщеплювальною.

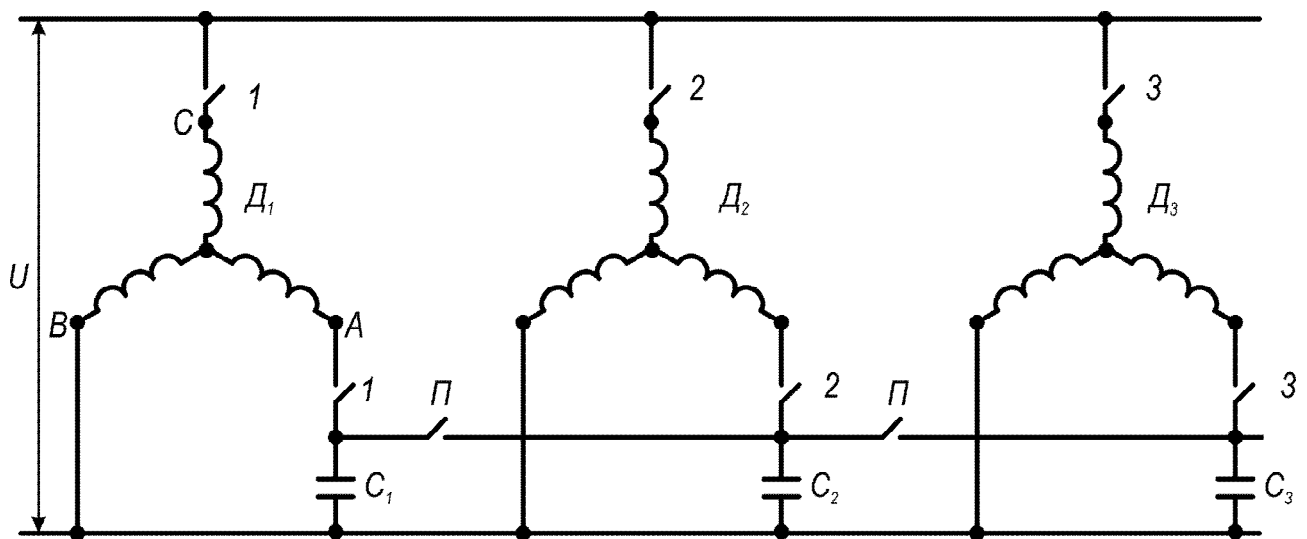


Рис. 1.4. Конденсаторно-розщеплювальна система допоміжних машин

На рис. 1.4 наведено принципову схему конденсаторно-розщеплювальної системи допоміжних машин. Її особливість полягає в тому, що на період пуску будь-якого двигуна вмикається пусковий контактор П. До двигуна, що запускається, під'єднуються конденсатори всієї групи машин, таким чином утворюється пускова ємність, і раніше запущені двигуни, які створюють фазорозщеплю-

ючий ефект. Після завершення етапу пуску контактор П відключається і двигуни продовжують працювати як конденсаторні [6], тобто фактично в однофазному режимі.

Найбільш поширеними серед систем допоміжних машин із обертовими фазорозщеплювачами є система із несиметричним розщеплювачем фаз, симетруючими конденсаторами і симетричними асинхронними двигунами та її варіанти без симетруючих конденсаторів.

За базовий тип електрорухомого складу в даній роботі приймається електропоїзд серії ЕР9М. Цей вибір обумовлено розповсюдженістю серії на залізницях України, їх переважною більшістю в порівнянні із іншими електропоїздами змінного струму локомотивного парку Укрзалізниці. Крім того, варто відзначити конструктивні подібності між електропоїздами серії ЕР9М і більш пізніми серіями, в т.ч. електропоїздами українського виробництва ЕПЛ9Т.

На вітчизняних моторвагонних поїздах змінного струму перетворення фаз виконують лише фазорозщеплювачами (рис. 1.5).

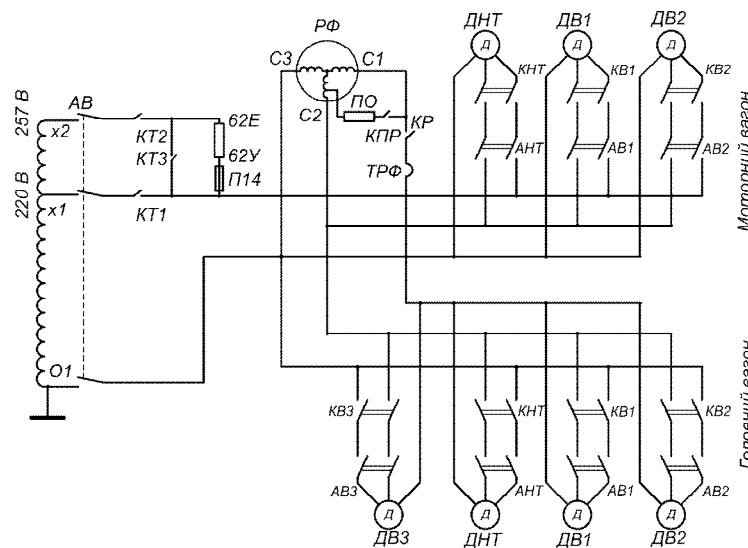


Рис. 1.5. Принципова схема системи допоміжних машин секції електропоїзда ЕР9М

Електропоїзди серій ЕР9М і подібні мають допоміжні машини із живленням від розщеплювача фаз без симетруючих конденсаторів. Номінальна напруга мережі 220В, двигуни увімкнено за схемою «трикутник». На секції електропоїзда ЕР9М вентилятор охолодження елементів випрямної установки розташова-

но на валу розщеплювача фаз РФ. Наявність такого додаткового механічного навантаження на фазорозщеплювач позитивно впливає на якість несиметрії напруги системи при малих потужностях [7].

На рис. 1.6 представлено структурну схему системи живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

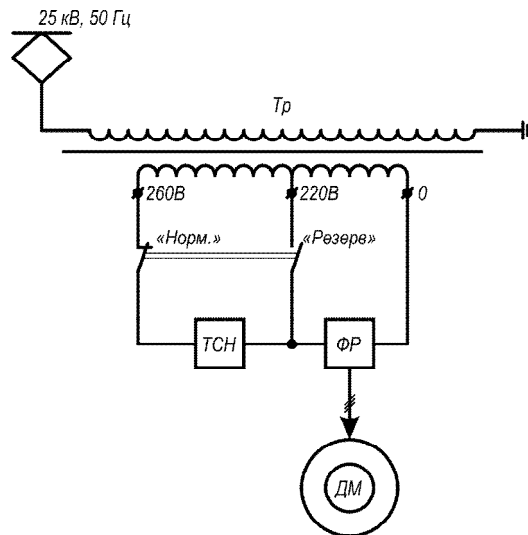


Рис. 1.6. Структурна схема системи живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

Система живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М включає в собі: обмотку живлення додаткових кіл головного тягового трансформатора Tr , тиристорний стабілізатор напруги ТСН, обертовий перетворювач кількості фаз – фазорозщеплювач ФР та власне допоміжні машини ДМ. [1 – 3, 7]

В нормальному режимі роботи (перемикання виконано так, як показано на рис. 1.8) фазорозщеплювач ФР отримує живлення від відпайки на 260 В обмотки додаткових кіл головного тягового трансформатора Tr через тиристорний стабілізатор напруги ТСН, на виході якого підтримується напруга величиною 205...225 В, що відповідає коливанням напруги контактної мережі 22...27,5 кВ.

При неробочому тиристорному стабілізаторі напруги фазорозщеплювач отримує живлення за резервною схемою (контактор «Резерв» замкнено, а зблокований з ним контактор «Норм.» розімкнено, див. рис. 1.8) від відпайки на 220 В обмотки додаткових кіл головного тягового трансформатора Tr . При цьому напруга на вході фазорозщеплювача не стабілізована і коливається в межах 160...260 В, що відповідає коливанням напруги в контактній мережі в діа-

пазоні 19...27,5 кВ. Допоміжні машини ДМ отримують живлення від фазорозщеплювача ФР, напруга на виході якого за величиною рівна напрузі на його вході.

З урахуванням вище сказаного, а також виключаючи перетворення за величиною напруги у фазорозщеплювачі приймаємо характерними значеннями діючої напруги в системі живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М 160 В, 205 В, 220 В, 225 В та 260 В.

Тиристорний стабілізатор напруги, принципову схему якого наведено на рис. 1.7, побудований на двох зустрічно увімкнених тиристорах Тт1 та Тт2. Керування тиристорами здійснюється блоком БУС (на схемі не показано), який під'єднується через стандартний штепсельний роз'єм. Керування стабілізатором відбувається автоматизованою системою керування. В інтервалах часу, який відповідає відкритому стану тиристорів вихідна напруга стабілізатора дорівнює напрузі обмотки додаткових кіл головного тягового трансформатора. А в інтервалах часу, які відповідають закритому стану тиристорів, вихідна напруга визначається електрорушійною силою фазорозщеплювача[7].

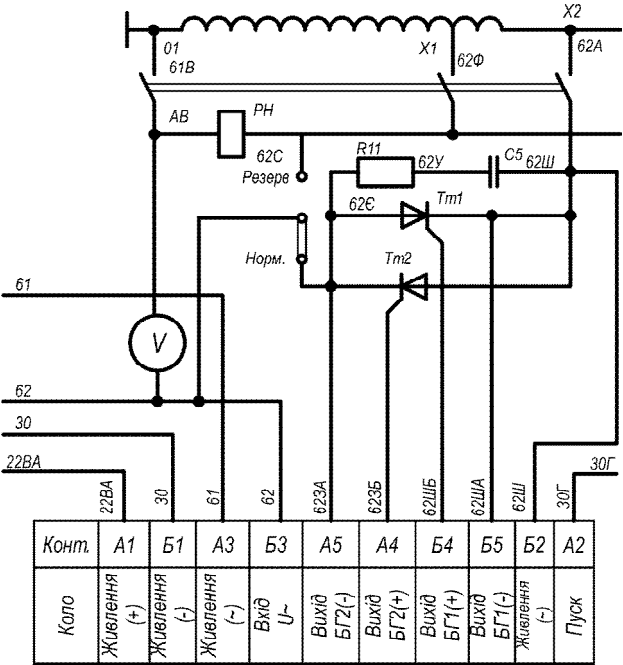


Рис. 1.7. Принципова схема тиристорного стабілізатора напруги

Розщеплювач фаз (див. рис. 1.8) перетворює однофазний змінний струм в трифазний для живлення асинхронних двигунів. Він являє собою асинхронну

машину з короткозамкненим ротором і несиметричною трифазною обмоткою на статорі.

У обмотки статора двигуни фази А і С живляться напругою 220 В (виводи С1 та С3 під'єднано до обмотки власних потреб тягового трансформатора), а генераторна фаза В (вивод С2) під час обертання ротора разом із напругою трансформатора створює трифазну систему живлення.

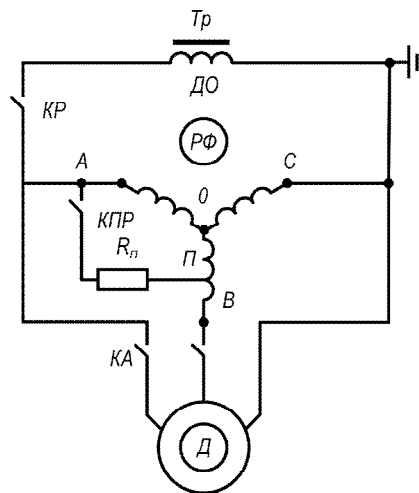


Рис. 1.8. Схема увімкнення обмоток статора асинхронного розщеплювача фаз на електропоїзді змінного струму

Якщо на виводи С1 та С3 при нерухомому роторі подати напругу, то обмотки фаз А і С будуть створювати пульсуюче магнітне поле, яке може бути розкладене на два поля, що обертаються з однаковою швидкістю але в зустрічних напрямках. Струми, що індукуються цими полями в стрижнях ротора, взаємодіючи з потоками, що обертаються, створюють рівні за величиною і взаємно зустрічні електромагнітні моменти. Внаслідок цього результуючий момент дорівнює нулю.

Якщо ротор розщеплювача обертати з частотою, яка буде трохи менша за частоту обертання полів, то поле, напрямок обертання якого співпадає із напрямком обертання ротора, буде рідше пересікати його стрижні, ніж при нерухомому роторі. Поле, яке має протилежний напрямок обертання, буде при цьому перетинати стрижні ротора майже із подвійною частотою. Обертовий момент, що створиться прямим полем, значно більший за гальмівний момент, створюваний

зворотнім полем, тому ротор розщеплювача після розгону може обертатися самостійно.

Для створення обертового магнітного поля, яке б утворило пусковий момент, необхідно мати в обмотках струми, зсунені в часі. Для цього під час пуску розщеплювача в коло його генераторної фази вмикають пусковий резистор. По мірі розгону обертовий момент прямого поля збільшується. Коли частота обертання стає близькою до синхронної, а напруга на генераторній фазі досягає необхідного значення, пусковий резистор відключають.

У приведеному в рух роторі виникає вторинне магнітне поле, яке обертаючись разом із ним, перетинає трифазну обмотку статора і наводить в ній трифазну електрорушійну силу (е.р.с.) з деякою несиметрією напруги, яка залежить від навантаження фаз. З метою зменшення та утримання несиметрії в робочому діапазоні при робочих навантаженнях обмотку статора розщеплювача виконують несиметричною як за кількістю витків в різних фазах, так і за кількістю пазів, що припадають на один полюс. Струми в фазах також різні.

Конструктивно розщеплювач фаз подібний до асинхронного двигуна. Ротор розщеплювача – короткозамкнений із подвійною білячою кліткою: верхня клітка пускова, нижня – робоча.

Трифазна обмотка статора укладається в 48 напіввідкритих пазах осердя статора і закріплюється клинами з текстоліту, а в лобових частинах склострічкою. Обмотка статора з'єднана в «зірку» і має п'ять виводів: три з них початки фаз А, В, С; один – пусковий відвід від фази В, до якого під'єднується пусковий резистор в момент пуску, і один – нульова точка «зірки» [2].

Крім безпосереднього виконання функцій розщеплення фаз, фазорозщеплювач також може виконувати корисну механічну роботу. Наприклад, на електропоїздах серій ЕР9М на його валу розміщено вентиляторне колесо для охолодження випрямної установки, згладжуючого реактора і тягового трансформатора.

Нормальна робота розщеплювача фаз забезпечується при коливаннях напруги на затискачах допоміжної обмотки тягового трансформатора в межах 175В... 275В [3, 7]. Технічні дані розщеплювача фаз РФ – 1Д5 наведено в табл.1.2.

На виході фазорозчеплювача отримують трифазну напругу 220 В. Двигуни допоміжних машин з'єднано «трикутником»

Даний тип розщеплювача фаз за рахунок простоти конструкції є вживаним практично на всіх вітчизняних серіях електропоїздів змінного струму, зокрема таких як ЕР9М, ЕПЛ9Т та ЕД9М.

Таблиця 1.2

Технічні дані фазорозщеплювача РФ – 1Д5

Потужність, кВт	Частота струму, Гц	Частота обертання, об/хв	Напруга живлення, В	Опори фаз, Ом		
				А	В	С
18	50	1470	220	0,0415	0,0650	0,0395

В якості приводу допоміжних пристроїв і механізмів (компресори, вентилятори, масляні насоси) на вантажних електровозах змінного струму, які експлуатуються на Укрзалізниці, застосовуються трифазні асинхронні двигуни. Вони отримують живлення, як і на електропоїздах змінного струму, від несиметричних обертових розщеплювачів фаз. Різниця між розщеплювачами на електропоїздах та електровозах полягає в їх тривалій потужності і величині номінальної напруги. На значення цих величин безумовно впливають кількість і сумарна потужність тих допоміжних машин, що одночасно живляться від фазорозщеплювача. На один електровоз припадає два фазорозщеплювача – по одному на кожну секцію.

На вантажних електровозах встановлюють фазорозщеплювачі типів НБ-455 та НБ-455А. Фазорозщеплювач НБ-453А наразі не застосовується. Його замінено більш потужними аналогами, що вказані раніше [4].

Всі перелічені фазорозщеплювачі мають подібну конструкцію. Вони виконуються на базі асинхронного трифазного двигуна єдиної серії А92-4. Обмотка статора розщеплювача виконується за схемою несиметричної зірки. Технічні дані основних типів фазорозщеплювачів наведено в табл. 1.3.

Наведені розщеплювачі фаз перетворюють однофазну напругу 380В, яку знімають з обмотки власних потреб тягового трансформатора, в трифазну напругу 380В.

Ротор розщеплювача фаз короткозамкнений, залитий алюмінієм. На статорі укладено дві обмотки – двигунна і генераторна. Перша з них під'єднана до обмотки власних потреб тягового трансформатора. Допоміжні електродвигуни приєднуються до затискачів С1, С2, С3 розщеплювача фаз.

Таблиця 1.3

Технічні дані фазорозщеплювачів НБ-453А, НБ-455, НБ-455А

Параметри	Тип розщеплювача фаз		
	НБ-453А	НБ-455	НБ-455А
Номінальна потужність, кВ·А	115	115	165
Напруга, В	380	380	380
Частота обертання, об/хв	1490		

Вал розщеплювача НБ-455А на відміну від валу РФ-1Д5 механічної роботи не виконує. На ньому встановлено реле обертів РО-60, яке виконує функції контролю обертів фазорозщеплювача і під'єднує резистор до двигунної обмотки фазорозщеплювача в період пуску [5].

Промисловістю для модернізації електрорухомого складу змінного струму із тяговими двигунами постійного (пульсуючого) струму запропоновано структуру статичного перетворювача, яку представлено на рис. 1.9 [54].

Статичний перетворювач, структурна схема якого наведена на рис 1.9, застосовується для живлення тягового приводу і кіл власних потреб локомотива.

Блок В-ОПП-3200 являє собою чотириканальний тиристорний випрямляч для багатозонного ступеневого регулювання напруги живлення чотирьох колекторних тягових двигунів. Живлення випрямляча здійснюється від спеціальних виводів головного трансформатора [54].

Блоки ШПЧ – 150 призначені для живлення асинхронних допоміжних машин – вентиляторів, компресорів, масляного насоса головного тягового трансформатора локомотива. Кожний із названих блоків складається із трьох трифазних інверторів [54].

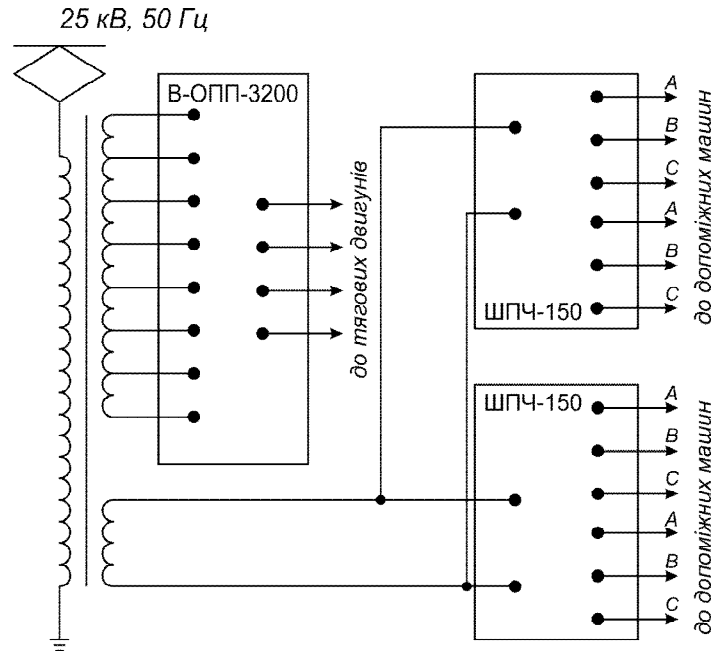


Рис. 1.9. Статичний перетворювач для рухомого складу змінного струму

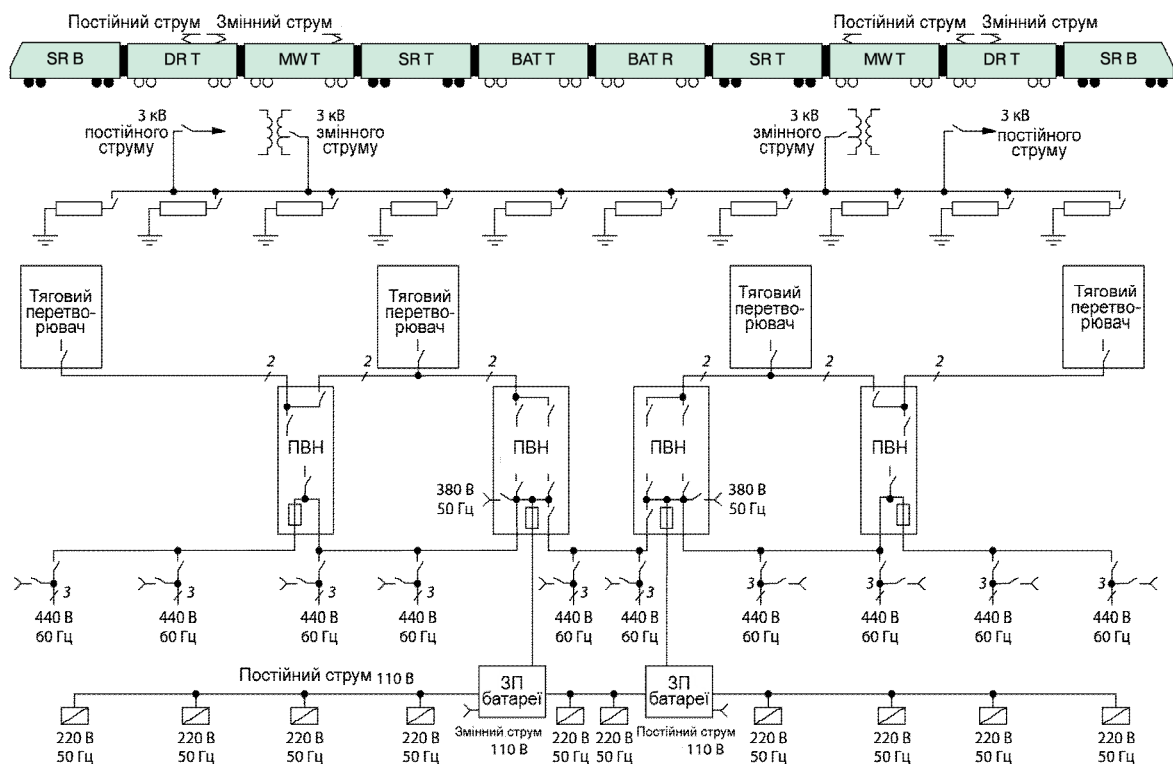


Рис. 1.10. Функціональна схема живлення кіл власних потреб електропоїзда Siemens Velaro

На зарубіжних двосистемних електропоїздах типу Siemens Velaro бортова мережа власних потреб, тобто все допоміжне обладнання, опалення, кліматична установка, освітлення, компресори для забезпечення систем електропоїзда стисненим повітря тощо живляться електроенергією від проміжних контурів тягового перетворювача [55].

Як впливає з рис. 1.10, енергопостачання бортової мережі власних потреб відбувається за допомогою двох перетворювачів власних потреб (ПВП) і двох подвійних ПВП. При виході з ладу одного із ПВП бортова мережа може працювати далі без втрат потужності. Живляча напруга бортової мережі 440 В трифазного змінного струму частотою 60 Гц. Енергозабезпечення власних потреб напругою 110 В постійного струму здійснюється від двох зарядних пристроїв потужністю по 60 кВт кожен, які живляться від бортової мережі власних потреб змінного струму. Схема енергопостачання потягу передбачає живлення систем від зовнішнього джерела під час відстою чи стоянки [55].

ПВП електропоїзда типу Siemens Velaro виконано на IGBT-модулях із повітряним охолодженням. На рис. 1.11 наведено його функціональну схему.

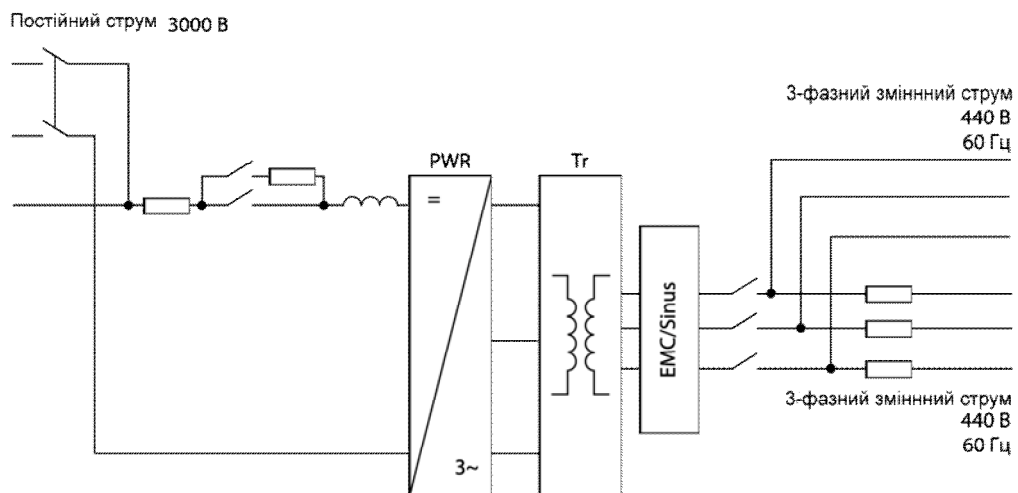


Рис. 1.11. Функціональна схема перетворювача власних потреб електропоїздів Siemens Velaro

Імпульсний інвертор PWR живиться безпосередньо із тягового проміжного контура. Живлення потужної поїзної шини змінним струмом напругою 440 В забезпечується одночасною роботою всіх шести імпульсних інверторів. Узго-

дження за величиною напруги здійснюється за допомогою трансформатора із синус- та ЕМС-фільтром на виході. Кожний із ПВП в разі несправності може бути відключений незалежно від інших перетворювачів [55].

1.4. Аналіз схем захисту допоміжних машин на електропоїздах змінного струму

В схемі живлення допоміжних машин на електропоїздах серії ЕР9М, фрагмент якої зображено на рис. 1.12, передбачений захист від аварійних режимів роботи електродвигунів. Захист від коротких замикань виконаний на плавких запобіжниках типу ПР-2, увімкнених в розриви двох фаз. Для захисту двигунів вентиляторів застосовують запобіжники із номінальним струмом вставки 25 А. Для захисту двигуна компресора - 100 А. Для захисту двигуна насоса охолодження тягового трансформатора використовуються запобіжники із струмом вставки 15 А. На головному вагоні двигун вентилятора кабіни живиться через плавкі запобіжники типу ПР-2 із струмом вставки 6 А.

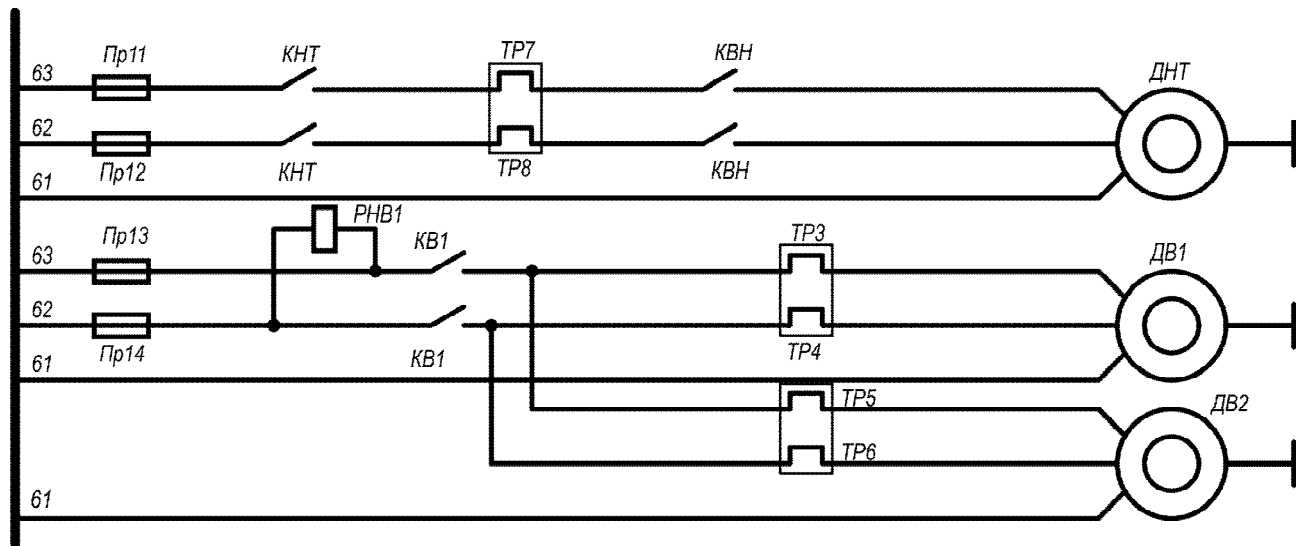


Рис. 1.12. Схема живлення допоміжних машин електропоїзда серії ЕР9М

Тепловий захист двигунів допоміжних машин, в тому числі і захист від перегріву при роботі від 2 фаз виконується тепловими реле промислового призначення без самоповернення типу ТРТП. Так, для електродвигуна насоса охолодження тягового трансформатора і електродвигуна вентилятора кабіни машини-

ста на головному вагоні використовуються реле ТРТП 114Р; для двигунів вентиляторів салону ТРТП 115Р; для двигуна компресора реле ТРТП 137Р. Діапазони струмів неспрацювання названих теплових реле представлено в табл. 1.4. Для забезпечення заборони пуску допоміжних машин при неробочому фазорозщеплювачі застосовуються блокування на базі реле напруги РЭВ 261 [7] .

Система захисту забезпечує відключення допоміжних машин в разі виникнення аварійних режимів – коротких замикань і тривалих струмових перевантажень і неробочому фазорозщеплювачі.

Таблиця 1.4

Діапазони струмів неспрацювання теплових реле

Параметр	Марка теплового реле		
	ТРТП 114Р	ТРТП 115Р	ТРТП 137Р
Діапазон струму неспрацювання, А	4,3 – 5,8	6,0 – 8,0	47,6 – 64,4

Основною характеристикою теплового реле є залежність часу спрацювання від струму навантаження (часострумова характеристика). В загальному випадку до початку перевантаження через реле протікає струм I_0 , який нагріває біметалічну пластину до температури θ_0 . Залежність часу спрацювання від струму для цього випадку має вигляд:

$$t_{\text{спр}} = T \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_\infty^2}, \quad (1.1)$$

де T - стала часу нагрівання;

I_0 - струм попереднього навантаження;

I_∞ - струм, при якому реле спрацює за час $t \gg T$;

I - струм при якому реле спрацює за час $t_{\text{спр}}$.

Теплові реле типу ТРТ марок, які наведені в табл.1.4, мають часострумові характеристики, графічний вигляд яких представлено на рис. 1.13.

Крива 1 справедлива для теплових реле ТРТ 114 та ТРТ 115, характеристика 2 – для реле ТРТ 137 [8, 9].

Для узгодження характеристик реле і об'єкта, який цим реле захищено, будують їх часо-струмові характеристики. При правильному виборі теплового реле характеристики об'єкта і реле повинні проходити поруч. При цьому забезпечено рівність їх постійних часу нагрівання, досягнуто умови, коли $I_{\text{спр}} = 1,2 \dots 1,3 I_{\text{ном}}$. В такому випадку попередньо нагріте номінальним струмом реле надійно спрацює і швидко відімкне захищаємий двигун.

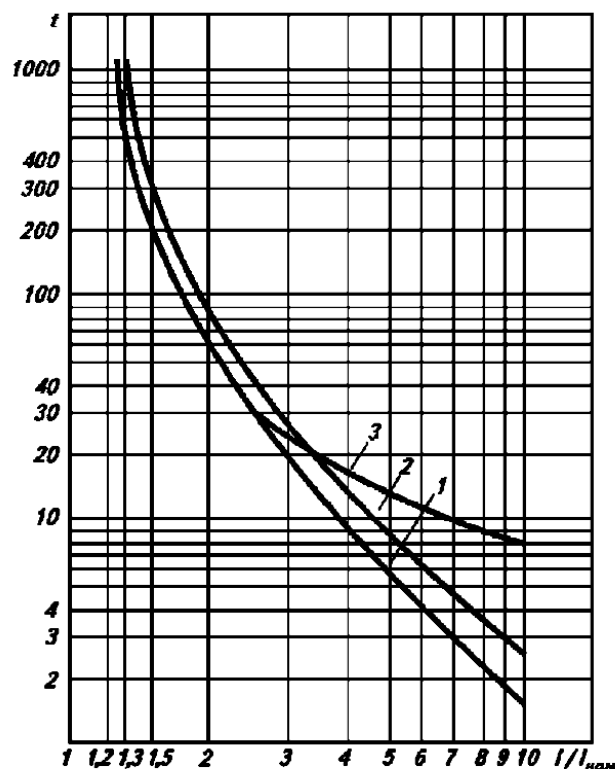


Рис. 1.13. Часо-струмові характеристики теплових реле типу ТРТ [66]

Величина сталої часу нагрівання визначається розмірами електродвигуна і формою захисту його від впливів зовнішнього середовища. Для двигунів малої потужності стала часу нагрівання складає 20...30 хв.

На практиці стала часу нагрівання електричного двигуна змінюється в залежності від тривалості перевантаження. При короткочасних перевантаженнях, коли в процесах нагріву приймає участь лише обмотка двигуна, стала часу нагрівання може зменшуватися до 5 – 10 хв (2,5 – 5 хв для двигунів малої потужності типу АОМ 32-4, АОМ 22-2), через те, що обмотка має малу масу. Тоді, як

при тривалих перевантаженнях, на які розраховується тепловий захист, коли нагрівається не лише обмотка машини, а і вся її маса, стала часу складає 40 – 60 хв (20 – 30 хв для двигунів малої потужності типу АОМ 32-4, АОМ 22-2) [8].

В ідеальному варіанті тепловий захист двигуна повинен обиратися у відповідності до теплових параметрів машини, зокрема до сталої часу її нагрівання. Лише в такому випадку можливе надійне відмикання двигуна при перевантаженні. На практиці ж основним критерієм щодо вибору типу теплового реле є величина струму неспрацювання, при якій двигун повинен працювати в сталому режимі.

На електропоїздах серії ЕР9М для виконання примусової циркуляції масла в системі охолодження тягового трансформатора застосовується електронасос 2ТТ-16/10-01. Цей електронасос обладнано асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором. Відповідно до паспорту насоса його номінальний струм при живленні від мережі 220В становить $I_{\text{ном}} = 3,5$ А. Його обладнано тепловим захистом на основі реле ТРТ 114, для якого струм не спрацювання, відповідно до табл. 3, лежить в діапазоні 4,3...5,8 А.

Електронасос є механізмом з важкими умовами пуску. Струм в період пуску складає $I_{\text{пуск}} = 25,55$ А

Відповідно до часострумової характеристики теплового реле ТРТП 114, що наведено на рис. 1.4, при перевищенні часу пуску насоса реле повинно відключити двигун з 7,3-кратним перевантаженням за струмом в теплому стані (при температурі повітря 40°C) через 3 секунди.

В умовах, коли реле знаходиться в холодному стані (після відстою електропоїзда в зимовий період) і час пуску затягується через загустіння масла в баку трансформатора, час до спрацювання теплового реле збільшується. Обмотка двигуна гріється, внаслідок протікання нею струму, що в 7,3 рази більше за номінальний, теплове реле не встигає вчасно відімкнути двигун.

Двигуни типу АОМ-32-4 вентиляторів салонів розраховані на номінальний струм $I_{\text{ном}} = 7,62$ А. Діапазон струмів неспрацювання теплових реле, якими за-

хищено двигуни цього типу 6,0...8,0 А. Струм під час прямого пуску для цих механізмів $I_{\text{пуск}} = 19,1 \text{ А}$.

При такому перевантаженні реле спрацює через 40 секунд. При затягуванні процесу пуску можливе протікання обмоткою статора двигуна струмів, що в 2,5 рази перевищують номінальні. Цим явищем буде викликано короткочасне перегрівання ізоляції обмотки статора.

З метою перевірки працездатності та адекватності роботи теплового захисту допоміжних машин електропоїзда ЕР9М автором було проведено випробування електротеплових реле типу ТРТ-115 на точність спрацювання у відповідності до [44]. Программу випробувань теплових реле приведено в додатку Б.

Випробування проводили на 5 зразках теплових реле ТРТ-115 зав. №№ 0711916, 0711954, 0713529, 0713702, 1215190 із використанням типової випробувальної схеми, яку представлено на рис.1.14 та у додатку В.

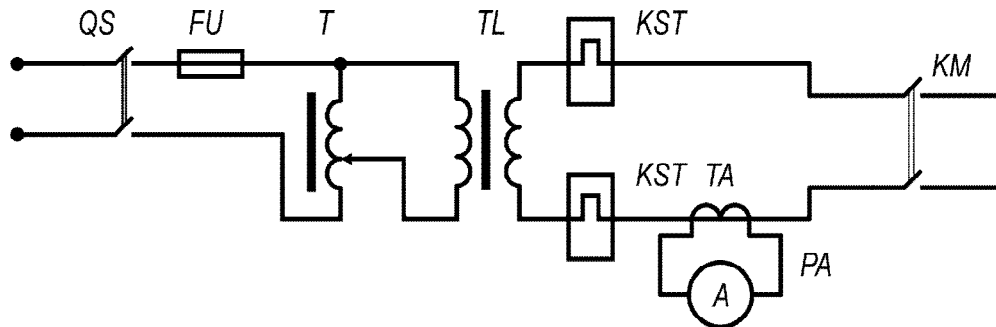


Рис. 1.14. Схема випробування теплових реле

У випробувальній схемі використано деякі наступні елементи:

Т – лабораторний автотрансформатор типу ЛАТР $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{ном}} = 4,5 \text{ А}$

ТЛ – трансформатор однофазний знижувальний 220/12 В;

ТА – вимірювальний трансформатор струму типу И54 зав. № 24532, клас точності 0,2;

РА – амперметр типу зав. № 349748, клас точності 0,5;

Для контролю часу спрацювання теплового реле використовується електронний секундомір типу СЭЦ 10000Щ із похибкою вимірювання 0,1с, що відповідає вимогам ГОСТ 16308 стосовно точності визначення часу спрацювання і неспрацювання і не перевищує 10%.

Для кожного теплового реле виконано зняття часострумової характеристики в діапазоні значень відношення $I/I_{\text{ном}}$ від 1,5 до 7. Кількість дослідів для кожного зразку теплового реле - 5. Реле досліджували без попереднього нагріву при температурі навколишнього середовища 20°C.

Результати випробувань кожного зразка теплового реле представлено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Середній час спрацювання теплового реле за зразками

Кратність струму нагрівального елемента, $I/I_{\text{ном}}$	Час спрацювання реле (t , с) за зразками				
	0711916	0711954	0713529	0713702	125190
1,5	351,04	217,68	330,58	248,92	242,5
2	84,228	73,466	84,148	74,124	76,166
3	32,34	28,512	31,04	26,42	28,614
4	16,388	14,322	16,578	15,56	15,59
5	9,836	8,952	9,244	9,218	9,25
6	6,934	6,07	6,58	6,248	6,654
7	4,76	4,484	4,508	4,408	4,728

Отримано середній термін часу спрацювання для реле типу ТРТП-115 як середнє арифметичне значення терміну часу спрацювання кожного зразка при певному значенні струмового перевантаження.

Точність спрацювання реле, відповідно до [45] визначається відхиленням уставки δ при нормальних кліматичних умовах випробування

$$\delta = \frac{M - T}{T} \cdot 100, \quad (1.2)$$

де T – номінальне значення величини уставки;

M – середнє арифметичне значення ряду величин спрацювання.

Для кожної точки експериментально визначеної часошумової характеристики теплового реле, що відповідає певному значенню відношення $I/I_{\text{ном}}$, визначимо похибку часу спрацювання у порівнянні із паспортною характеристикою за наведеною вище формулою. Результати порівняння наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Визначення похибки терміну часу спрацювання теплових реле типу ТРТП-115

Кратність струму нагрівального елемента, $I/I_{\text{ном}}$	Середній термін часу спрацювання теплового реле типу ТРТП-115, с	Паспортний термін часу спрацювання реле ТРТП-115, с	Похибка терміну часу спрацювання
1,5	278,144	180	54,5%
2	78,4264	65	20,7%
3	29,3852	19	54,7%
4	15,6876	9	74,3%
5	9,3	6,5	43,1%
6	6,4972	4,3	51,1%
7	4,5776	3,2	43,1%

На рис. 1.15 наведено часошумові характеристики реле ТРТП-115

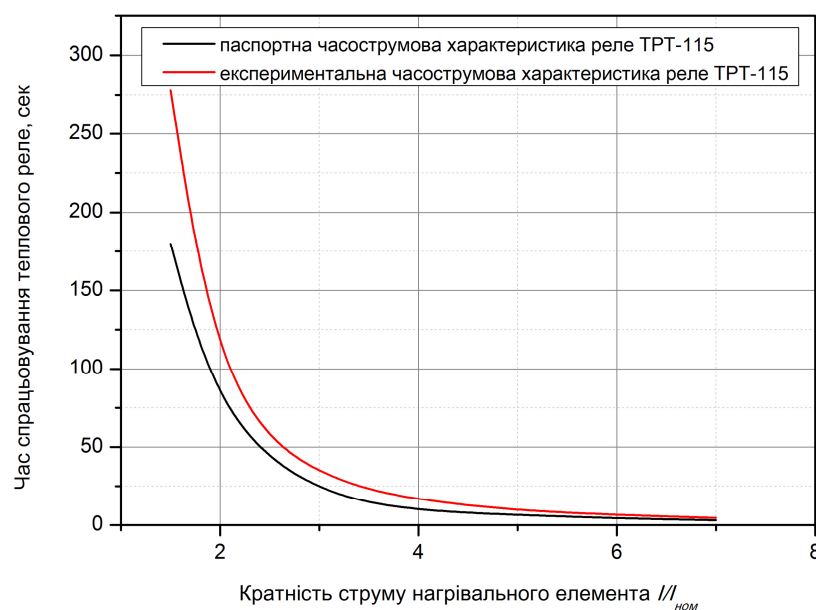


Рис. 1.15. Порівняння паспортних та експериментальних часошумових характеристик електротеплових реле типу ТРТП-115

Як впливає за табл. 1.5, значення похибки часу спрацювання не є сталим і стохастично змінюється при зміні кратності струму нагрівального елемента теплового реле. Значення δ коливається в межах від 20,7% до 74,3%. Середнє значення похибки часу спрацювання досліджуваного теплового реле типу ТРТ-115 в умовах реальної експлуатації становить 48,8%, що в окремих випадках може призвести до перегрівання ізоляції допоміжних машин.

Можна зробити висновок, що цілком можливим є такий режим роботи двигуна при короткочасному перевантаженні, коли температура його обмотки вже досягла гранично допустимого значення і продовжує нагріватися, а тепловий захист не спрацьовує через суттєву різницю в сталих часу нагрівання.

Таким чином, результати експерименту показують, що з точки зору точності спрацювання теплового реле, відхилення в умовах реальної експлуатації може складати до 74,3% у порівнянні із паспортною характеристикою. Цей фактор може вплинути на нагрівання обмоток допоміжних машин і тому його необхідно враховувати при дослідженні нагрівання обмоток у наступних розділах.

1.5. Постановка задач досліджень

Зважаючи на проведений аналіз, автор вважає, що необхідним для досягнення мети роботи, є проведення таких досліджень:

1. Визначення ступеню впливу на нагрів допоміжних машин якості живлячої електроенергії та точності спрацювання захисних пристроїв;
2. Визначення граничних значень показників якості живлячої електроенергії, при яких температура перегріву двигуна не буде перевищувати максимально допустимих значень для конкретних класів ізоляції. Отримані границі зміни показників якості електричної енергії потрібно відобразити у рекомендаціях стосовно підвищення працездатності допоміжних машин.
3. Визначення 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.

4. Створення математичної моделі для дослідження нагріву допоміжних машин електропоїзда серії EP9M в реальних умовах експлуатації.
5. Оцінки ступеню впливу окремих показників якості живлячої електроенергії (несиметрія напруги і відхилення її від номінального значення) на сумарний нагрів двигунів на моделі.
6. Отримання аналітичних залежностей між значенням показників якості електричної енергії та величиною сумарного нагріву ізоляції двигуна.
7. Визначення граничних значень показників якості електричної енергії, при яких не відбувається перегріву допоміжних машин понад допустимі значення.
8. Синтез структури пристрою для контролю якості живлячої електричної енергії в системі допоміжних машин електропоїздів серії EP9M з метою її покращення.
9. Створення алгоритму роботи названого пристрою з урахуванням граничних значень показників якості електричної енергії, при яких не відбувається перегріву допоміжних машин понад допустимі значення.

1.6. Висновки до першого розділу

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.
2. Основними причинами виходу з ладу асинхронних двигунів допоміжних машин відповідно до статистичних даних, є різного роду ушкодження ізоляції – пробій ізоляції на корпус, міжвиткові замикання та інші ушкодження обмотки, які, на думку автора, виникають внаслідок виникнення додаткових перегрівів ізоляції в результаті зниження якості живлячої електроенергії і недостатньої точності спрацьовування захисних теплових реле.
3. Експериментально доведено, що теплові реле, які використовуються в якості захисту допоміжних машин на електропоїздах EP9M, володіють недостатньою точністю спрацювання. В результаті лабораторного дослідження виявле-

но похибку терміну часу спрацювання теплових реле серії ТРТП-115 від 20,7% до 74,3% у порівнянні із паспортним часом спрацювання.

4. Розглянуто основні способи живлення допоміжних машин на електропоїздах та локомотивах змінного струму вітчизняного та закордонного виробництва. Виділено три основні способи живлення – від виводу тягового трансформатора через трифазний автономний інвертор; від проміжних кіл головного тягового статичного перетворювача через ПВП, який побудовано на IGBT-модулях; від обертового електромашинного перетворювача – фазорозщеплювача.

5. Показано, що на електропоїздах серії ЕР9М для приводу допоміжних машин використовуються загальнопромислові трифазні асинхронні двигуни, які отримують живлення від обертового розщеплювача фаз. При цьому можливий низький рівень якості електричної енергії (несиметрія, відхилення напруги), якою живляться двигуни.

6. Постає задача в теоретичному дослідженні додаткового нагрівання ізоляції допоміжних машин під впливом несиметрії живлячої напруги та її відхилення від номінального значення в реальних умовах експлуатації і точність спрацювання теплових реле на нагрівання обмоток статора.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕЯКИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА НАГРІВАННЯ СТАТОРНИХ ОБМОТОК ДОПОМІЖНИХ МАШИН

2.1 Причини зниження показників якості електричної енергії, що живить допоміжні машини при роботі від фазорозщеплювача

Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення обумовлюються міждержавним стандартом ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [81].

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 привідних двигунів допоміжних машин загальнопромислових асинхронних двигунів типу АИР, АОМ та ін. дозволяє зробити висновки про можливість застосування названого стандарту для оцінки якості електричної енергії в системах допоміжних машин.

Відповідно до чинного стандарту показниками якості електричної енергії (ПЯЕ) є:

- стале відхилення напруги δU_c ;
- розмах зміни напруги δU_t ;
- доза флікера P_f ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n-ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} ;
- відхилення частоти Δf ;

- тривалість провалу напруги Δt_{Π} ;
- імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$.

З точки зору умов роботи допоміжних електричних машин в системах електрорухомого складу змінного струму із перерахованих показників якості електричної енергії (ПЯЕ) виділяємо наступні показники [57, 58]:

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

Для кожного із названих ПЯЕ стандартом регламентоване нормально допустиме і гранично допустиме значення.

Відхилення напруги (ВН) визначається відносною різницею між дійсним U і номінальним $U_{\text{ном}}$ значеннями напруги.

$$\Delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}. \quad (2.1)$$

Відповідно до [81] нормально допустиме значення ВН $\pm 5\%$, гранично допустиме - $\pm 10\%$.

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

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (2.2)$$

де U_v - діюче значення напруги v -ої гармоніки, В (кВ);

n – номер останньої із врахованих гармонік.

Встановлено [57, 58], що вплив несинусоїдності напруги на додаткові перегріву допоміжних машин електрорухомого складу в порівнянні з іншими пока-

зниками якості електричної енергії не перевищують 5%, тому ними можна знехтувати.

З цієї ж причини спотворюючу дію, яка виникає внаслідок роботи тристорного стабілізатора напруги [85, 86, 87] на форму живлячої допоміжні машини напруги в роботі не враховуємо. Форму живлячої напруги в системі допоміжних машин електропоїзда ЕР9М приймаємо синусоїдною.

Несиметрія напруг трифазної мережі характеризується коефіцієнтом зворотної послідовності напруг K_{2U} , який визначається відношенням напруги зворотної послідовності U_2 до номінальної напруги $U_{\text{ном}}$:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100. \quad (2.3)$$

Відповідно до [81] значення $K_{2U} = 2\%$ є нормально допустимим на затискачах симетричного приймача. Гранично допустиме значення складає 4% [34, 81].

Погіршення ПЯЕ впливає на працездатність допоміжних машин в системах електропоїздів змінного струму.

При ВН на затискачах АД змінюється частота обертання ротора, значення активних втрат і споживаної реактивної потужності. Тепловий знос ізоляції двигуна залежить від ВН та навантаженості 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 зворотньому 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%, термін 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 [34].

Причини, що впливають на зниження ПЯЕ в системах допоміжних машин електропоїздів змінного струму серії EP9M, на думку автора, можна розподілити на два види:

- зовнішні причини;
- внутрішні причини.

Зовнішньою причиною зниження ПЯЕ є значне допустиме відхилення напруги в контактній мережі змінного струму. Відповідно до [75], напруга в контактній мережі змінного струму може коливатися в межах 19...27,5 кВ.

Розкриттю суті внутрішніх причин присвячено наступні розділи даної роботи.

2.2. Залежність несиметрії живлячої напруги від електричного навантаження фазорозщеплювача

Електричним навантаженням фазорозщеплювача виступають допоміжні машини моторного і причіпного (головного) вагонів. В номінальному режимі від фазорозщеплювача отримують живлення [57, 58, 85, 86, 87]:

- двигуни вентиляторів пасажирських салонів моторного і причіпного (головного) вагонів (ДВ1, ДВ2) (по два на кожному вагоні), а на головних вагонах і двигуни вентиляторів кабін машиніста (ДВ3);
- двигун насоса трансформатора (ДНТ), який встановлено лише на моторному вагоні;
- двигун компресора (ДК), встановлено лише на причіпному вагоні.

В табл. 2.1. наведено типи асинхронних двигунів і їх паспортні дані.

Тут і надалі будемо розглядати систему допоміжних машин секції, утвореної із одного моторного і одного причіпного вагонів. Тому сумарне електричне навантаження асинхронного фазорозщеплювача секції складається з потужностей перерахованих машин, або $\sum P_{\text{фр}} = 4 \cdot P_{\text{дв}} + P_{\text{днт}} + P_{\text{дк}}$.

Для робочого режиму фазорозщеплювача характерні часті зміни сумарної потужності електричного навантаження.

Паспортні дані асинхронних двигунів системи допоміжних машин
електропоїзда ЕР9М

Призначення машини	Кіль- кість на сек- ції	Тип двигуна, агрегата	Номінальні дані				
			P_n , кВт	I_n , А	n , об/хв	η_n	P_1 , кВт
ДВ1, ДВ2	4	АОМ 32-4	1,5	7,62	1390	0,7	2,14
ДНТ	1	2ТТ-16/10-01	0,82	3,5	2900	0,45	1,82
ДК	1	Ум. № 548	5	28	975	0,8	6,25
ДВ3	1	АОМ 22-2	1	3,78	2850	0,81	1,23

У випадку, коли на секції електропоїзду ЕР9М увімкнено всі допоміжні машини в номінальному режимі, сумарна потужність навантаження становить $\sum P_{\text{фр}} = 16,63$ кВт. Однак можливим є режим роботи, коли працюють лише ДВ та ДНТ, тоді сумарна потужність навантаження становить $\sum P_{\text{фр}} = 10,38$ кВт. Це обумовлюється режимом роботи двигуна компресора ДК, який працює в повторно-короткочасному режимі із номінальною тривалістю увімкнення 50%.

Питома вага потужності ДК в загальному навантаженні фазорозщеплювача досить велика. Це є однією із суттєвих особливостей систем допоміжних машин електропоїздів ЕР9М [57, 58, 85, 86, 87].

В [58] описано результати випробувань, проведених під керівництвом О.А. Некрасова, в ході яких було встановлено, що під час реальної експлуатації електропоїздів серії ЕР9П при зміні навантаження на фазорозщеплювач змінюється і коефіцієнт несиметрії напруги на його виході. Було отримано експериментальні криві залежностей коефіцієнта несиметрії від електричного навантаження на фазорозщеплювач для систем допоміжних машин електропоїздів ЕР9 та ЕР9П, які наведено на рис. 2.1.

Порівняльний аналіз структури системи допоміжних машин показав, що системи допоміжних машин електропоїздів змінного струму серій ЕР9П та ЕР9М не мають суттєвих принципових відмінностей і побудовані на базі ідентичних фазорозщеплювачів РФ-1В (електропоїзд ЕР9П) та 1РФ-Д5 (електропоїзд ЕР9М). Це дозволяє використати експериментально отримані [58] залежності для отримання аналітичного виразу залежності між електричним навантаженням та коефіцієнтом несиметрії напруги на виході фазорозщеплювача електропоїзда ЕР9М з метою знаходження цієї залежності ще й для напруг 160 В, 205 В, 220 В, 225 В та 260 В, що передбачено схемою електропоїзда.

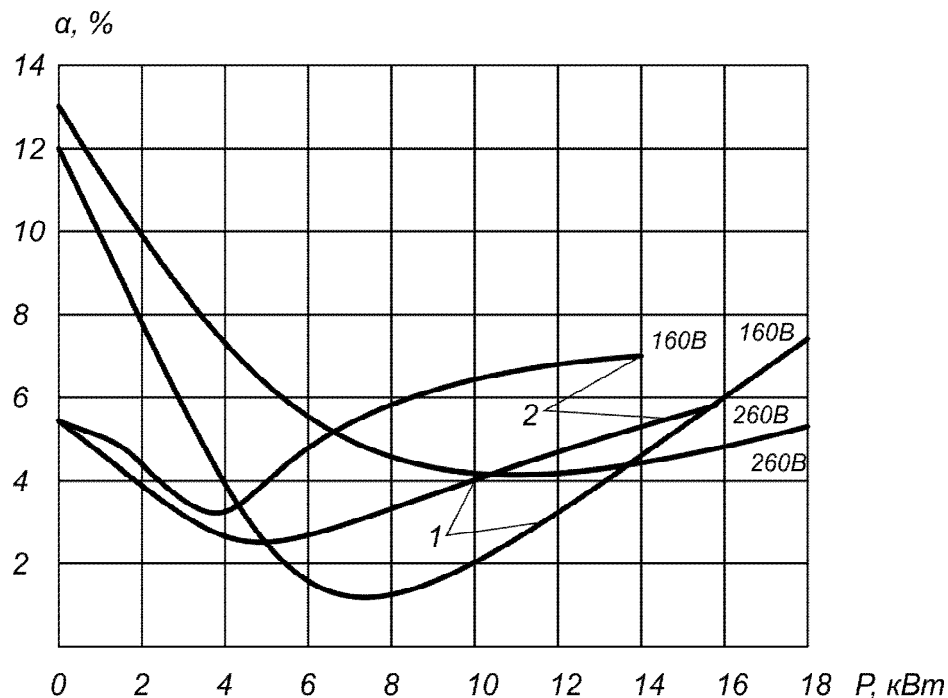


Рис. 2.1. Залежність коефіцієнта несиметрії від електричного навантаження розщеплювачів в системах допоміжних машин електропоїздів ЕР9 (криві 1) та ЕР9П (криві 2) [58]

Апроксимацію названих емпіричних кривих залежності $K_{2U} = f(P)$ виконуємо за допомогою прикладного програмного забезпечення Origin Microcal 6.0, основне призначення якого графічне відображення, обробка і числовий аналіз даних та моделей [19]. Вихідними даними при апроксимації емпіричних залежностей є таблиця взаємопов'язаних числових послідовностей незалежної та залежної змінних. Такий ряд чисел при наявності графічного зображення залеж-

ності $K_{2U} = f(P)$ отримаємо шляхом інтерполяції кривих, яку виконуємо в порядку, що наведено нижче.

Будуємо на масштабно-координатному папері пару кривих 2 з рис. 2.1. Визначаємо масштаби по вісі абсцис та вісі ординат. Для цього приймаємо шкалу відповідних осей лінійними і рівномірними, тоді справедливим буде визначення масштабу за виразом $m_P = \frac{P_2 - P_1}{\Delta P}$, де P_1 та P_2 - відповідно менше та більше

відоме значення поділки вісі абсцис; ΔP - відстань між значеннями P_1 та P_2 у одиницях виміру довжини. Тоді, $m_P = \frac{P_2 - P_1}{\Delta P} = \frac{4 \text{ кВт} - 2 \text{ кВт}}{9 \text{ мм}} = \frac{2 \text{ кВт}}{9 \text{ мм}} = 0,22 \frac{\text{кВт}}{\text{мм}}$.

Аналогічно масштабу по вісі ординат

$$m_{k_{2U}} = \frac{k_{2U2} - k_{2U1}}{\Delta k_{2U}} = \frac{8\% - 6\%}{9 \text{ мм}} = \frac{2\%}{9 \text{ мм}} = 0,22 \frac{\%}{\text{мм}}.$$

Приймаємо приріст аргументу P функції $K_{2U} = f(P)$ 1 кВт. Визначаємо значення координат точок графіків для 160 В та 260 В; помноживши координати, визначені в одиницях довжини, на відповідні масштаби отримаємо числові послідовності взаємопов'язаних змінних, які представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Інтерпольована залежність $K_{2U} = f(P)$ для системи допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії ЕР9М для різних напруг на виході обмотки власних потреб тягового трансформатора

P, кВт	$K_{2U}, \%$	$K_{2U}, \%$
	160 В	260 В
0	5,43	5,27
1	4,6	4,66
2	3,89	3,79
3	3,42	3,04
4	3,43	2,57
5	3,71	2,41
6	4,23	2,50

7	4,87	2,73
8	5,50	3,02
9	6,01	3,32
10	6,32	3,60
11	6,42	3,87
12	6,40	4,16
13	6,46	4,45
14	6,92	4,73

Числова послідовність із табл. 2.2. являє собою поліноміальну регресію, якій в загальному випадку відповідає математичний вираз:

$$\begin{cases} y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon; \\ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2), \end{cases} \quad (2.4)$$

де β_i у виразі (2.4) – коефіцієнти регресії, а ε - похибка, під якою розуміють не пояснену зміну залежної змінної регресії [56].

Визначення коефіцієнтів регресії виконується обчислювальним апаратом програми Origin 6.1 за допомогою зваженого методу найменших квадратів, який мінімізує суму квадратів відхилень між теоретичною кривою та експериментальними точками ряду незалежної змінної.

Члени поліноміального рівняння регресії, що мають більш високий порядок, мають високий вплив на залежну змінну. Тому округлення коефіцієнтів, особливо при змінних високих порядків, може призвести до суттєвої різниці в результаті, іноді навіть до висновку про неадекватність моделі. Коефіцієнти β_i обчислюються з точністю до п'яти знаків після коми [19].

Отримаємо аналітичний вираз для кривої, що описує зміну $K_{2U} = f(P)$ при 160 В.

В додатку Є приведено розгорнуту процедуру апроксимації емпіричної залежності аналітичним виразом за допомогою прикладного програмного забезпечення Origin 6.1.

Поступово змінюючи величину порядку многочлена наближаємо форму аналітичної кривої до заданого графіка. В результаті виконаних дій апроксимуємо емпіричну криву залежності $K_{2U} = f(P)$ при напрузі 160В поліноміальною кривою (див. рис. 2.2) і отримаємо рівняння п'ятого порядку в загальному вигляді (2.5), яке описує цю криву із достатньою точністю.

$$y = 5,43282 - 0,80747x - 0,08275x^2 + 0,06338x^3 - 0,00672x^4 + 2,10587 \cdot 10^{-4} \cdot x^5. \quad (2.5)$$

Замінімо змінні y та x на K_{2U} та P відповідно, отримаємо рівняння у вигляді:

$$K_{2U} = 5,43282 - 0,80747 \cdot P - 0,08275 \cdot P^2 + 0,06338 \cdot P^3 - 0,00672 \cdot P^4 + 2,10587 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \quad (2.6)$$

Взаємне розташування кривих на рис. 2.6. – кривої $K_{2U} = f(P)$ при 160 В, отриманої емпірично, та кривої, побудованої за виразом (2.6), свідчить про достатню точність апроксимації представленої залежності.

Апроксимування експериментально отриманої залежності $K_{2U} = f(P)$ при 260 В виконується аналогічно до залежності при 160 В.

Отримаємо аналітичний вираз для залежності $K_{2U} = f(P)$ при 260 В:

$$K_{2U} = 5,27036 - 0,27878 \cdot P - 0,44687 \cdot P^2 + 0,1324 \cdot P^3 - 0,01244 \cdot P^4 + 8,52646 \cdot 10^{-5} \cdot P^5 + 5,93351 \cdot 10^{-5} \cdot P^6 - 3,7117 \cdot 10^{-6} \cdot P^7 + 7,05952 \cdot 10^{-8} \cdot P^8. \quad (2.7)$$

На рис.2.3 приведено аналітичну криву, що побудована за виразом (2.7), і експериментально отриману криву залежності $K_{2U} = f(P)$ при напрузі 260 В. Взаємне розташування названих кривих на рис. 2.7 дозволяє судити про високу точність апроксимування емпіричної залежності аналітичним виразом на заданому проміжку потужностей.

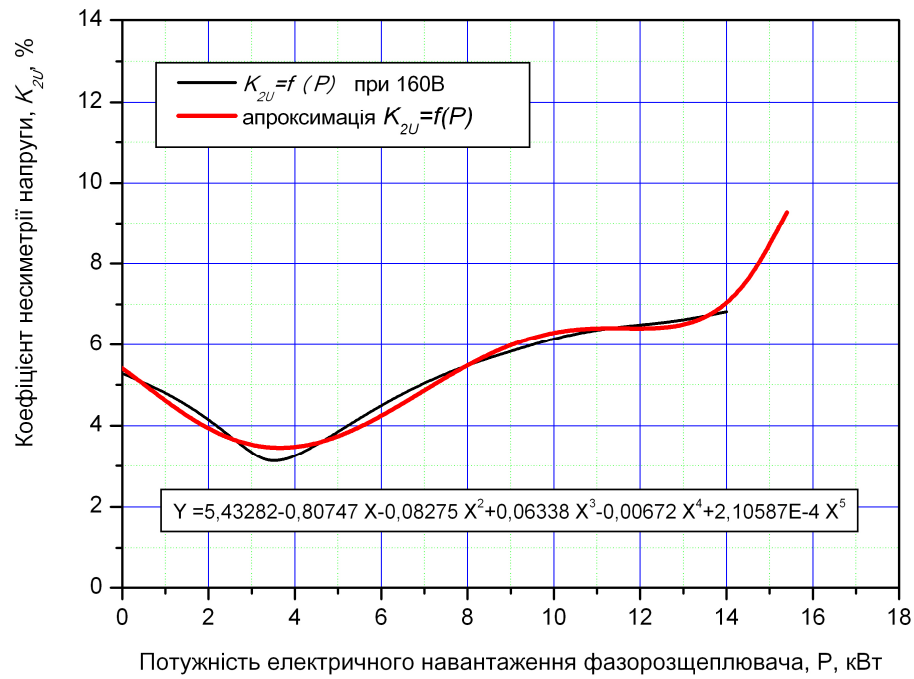


Рис. 2.2. Поліноміальна апроксимація залежності $K_{2U} = f(P)$ при 160 В

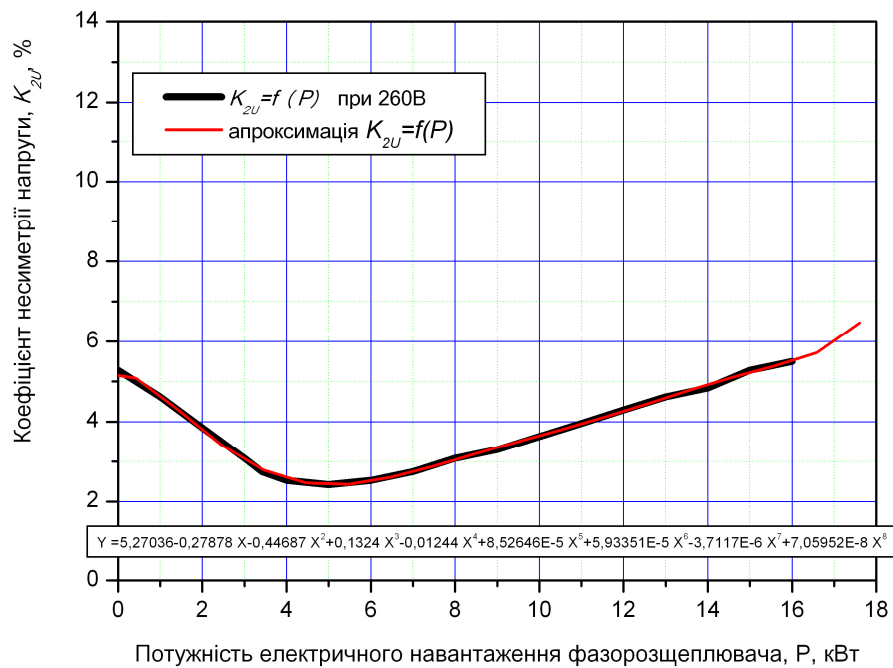


Рис. 2.3. Поліноміальна апроксимація залежності $K_{2U} = f(P)$ при 260 В

В результаті отримано аналітичні вирази для залежності $K_{2U} = f(P)$ за відомими експериментальними кривими при крайніх значеннях напруги – 160 і 260 В. Виходячи із описаних раніше особливостей схеми живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, необхідно визначити аналітичні вирази залежності

$K_{2U} = f(P)$ ще при деяких значеннях напруги, а саме при 205 В, 220 В та 225 В.

З огляду на те, що експериментальні залежності $K_{2U} = f(P)$ для відповідних значень напруги відсутні, зроблено припущення щодо того, що шукані залежності знаходяться між кривими при 160 В та 260 В, а тому пропонується ці залежності знаходити шляхом інтерполяції координатної площини, обмеженої сімейством залежностей $K_{2U} = f(P)$ для напруг 160 В і 260 В.

Знаходження шуканих залежностей пропонується вести шляхом визначення середнього арифметичного значення функції між двома відомими сусідніми значеннями при тому ж аргументі. Наприклад, для отримання аналітичної кривої $K_{2U} = f(P)$ при 210 В, яка лежить між емпіричними залежностями $K_{2U} = f(P)$ при 160 В і 260 В, для кожного значення незалежної змінної P , яку змінюємо із приростом в 1 кВт знаходимо із табл. 2.2 значення K_{2U} для нижнього (160 В) і верхнього (260 В) значення напруги. Шукане значення K_{2U} при $P = 0$ і напрузі 210 В буде являти собою середнє арифметичне значення крайніх K_{2U} , тобто $K_{2U\ 210В} = \frac{K_{2U\ 160В} + K_{2U\ 260В}}{2} = \frac{5,43 + 5,27}{2} = 5,35\%$.

Аналогічно знаходимо значення K_{2U} , що відповідають іншим значенням P при напрузі 210 В. Проміжок між експериментально отриманими кривими розділено на 400 елементарних ділянок із малим приростом ΔU ($\Delta U = 0,25$ В), що дає змогу із високою точністю аналітично отримати залежності $K_{2U} = f(P)$ для всіх характерних значень напруги в системі живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М в діапазоні 160...260 В.

В додатку В представлено таблицю із аналітично отриманими залежностями $K_{2U} = f(P)$ при напругах в діапазоні 160...260 В із кроком 1 В.

Отримані результати для найбільш характерних значень напруги представлені в табл. 2.3.

Залежності $K_{2U} = f(P)$ в системі допоміжних машин електропоїзда змінного струму ЕР9М при найбільш характерних значеннях напруги на затискачах додаткової обмотки

P , кВт	Коефіцієнт несиметрії напруги K_{2U} [%] при значенні напруги (у В) на вході фазорозщеплювача				
	160	205	220	225	260
0	5,433	5,360	5,335	5,327	5,270
1	4,599	4,629	4,639	4,642	4,665
2	3,893	3,847	3,832	3,827	3,792
3	3,419	3,246	3,189	3,170	3,036
4	3,431	3,042	2,914	2,870	2,568
5	3,707	3,124	2,930	2,865	2,411
6	4,227	3,449	3,190	3,103	2,497
7	4,870	3,907	3,587	3,480	2,731
8	5,503	4,387	4,016	3,892	3,024
9	6,012	4,800	4,397	4,262	3,319
10	6,322	5,096	4,690	4,553	3,600
11	6,424	5,276	4,894	4,766	3,873
12	6,403	5,391	5,055	4,942	4,155
13	6,456	5,553	5,253	5,152	4,449
14	6,927	5,940	5,613	5,502	4,735

Наведені в аналітичному вигляді результати дослідження в табл. 2.3 залежності представлено графічно на рис. 2.4.

Виконаємо апроксимацію кривої залежності $K_{2U} = f(P)$ для напруги 220 В поліноміальним рівнянням за допомогою програмного забезпечення Origin 6.1 (див. рис. 2.5). Для цього із табл. 2.3 передамо до програми значення P і відповідні ним значення K_{2U} при 220 В. Аналогічно до описаного раніше способу віднайдемо аналітичний вираз залежності $K_{2U} = f(P)$.

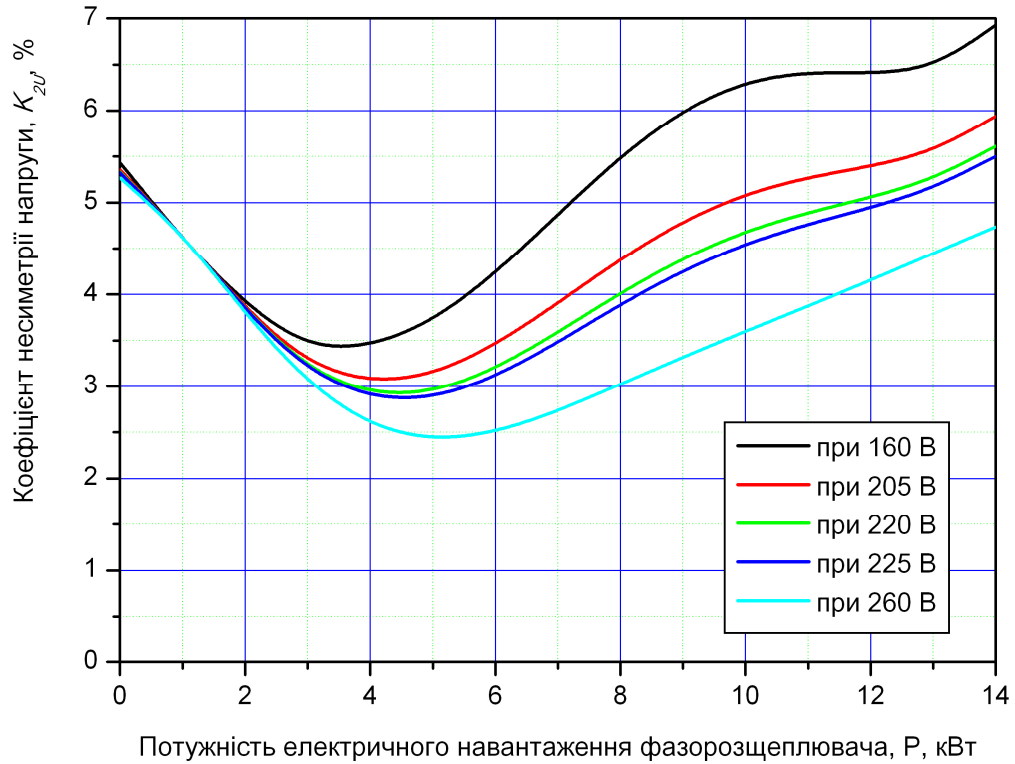


Рис. 2.4. Залежності $K_{2U} = f(P)$ в системі живлення допоміжних машин електропоїзда змінного струму ЕР9М при різних напругах на виводах додаткової обмотки тягового трансформатора

$$K_{2U} = 5,36449 - 0,70606 \cdot P - 0,13127 \cdot P^2 + 0,05882 \cdot P^3 - 0,00558 \cdot P^4 + 1,64905 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \quad (2.8)$$

Аналогічно виконується апроксимація залежності $K_{2U} = f(P)$ при напрузі 205 В та 225 В. На рис. 2.6 та 2.7 наведено графіки названих залежностей, побудовані за табл. 2.3, а також результати їх апроксимації многочленами.

В результаті апроксимації отримано аналітичні вирази, якими описуються залежності $K_{2U} = f(P)$ при напрузі 205 В та 225 В.

$$K_{2U} = 5,35838 - 0,69581 \cdot P - 0,13586 \cdot P^2 + 0,05849 \cdot P^3 - 0,00548 \cdot P^4 + 1,61093 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \quad (2.9)$$

$$K_{2U} = 5,32827 - 0,45606 \cdot P - 0,33919 \cdot P^2 + 0,12041 \cdot P^3 - 0,014 \cdot P^4 + 7,01625 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \quad (2.10)$$

Вираз (2.9) описує залежність $K_{2U} = f(P)$ при 205 В, а вираз (2.10) – при 225 В.

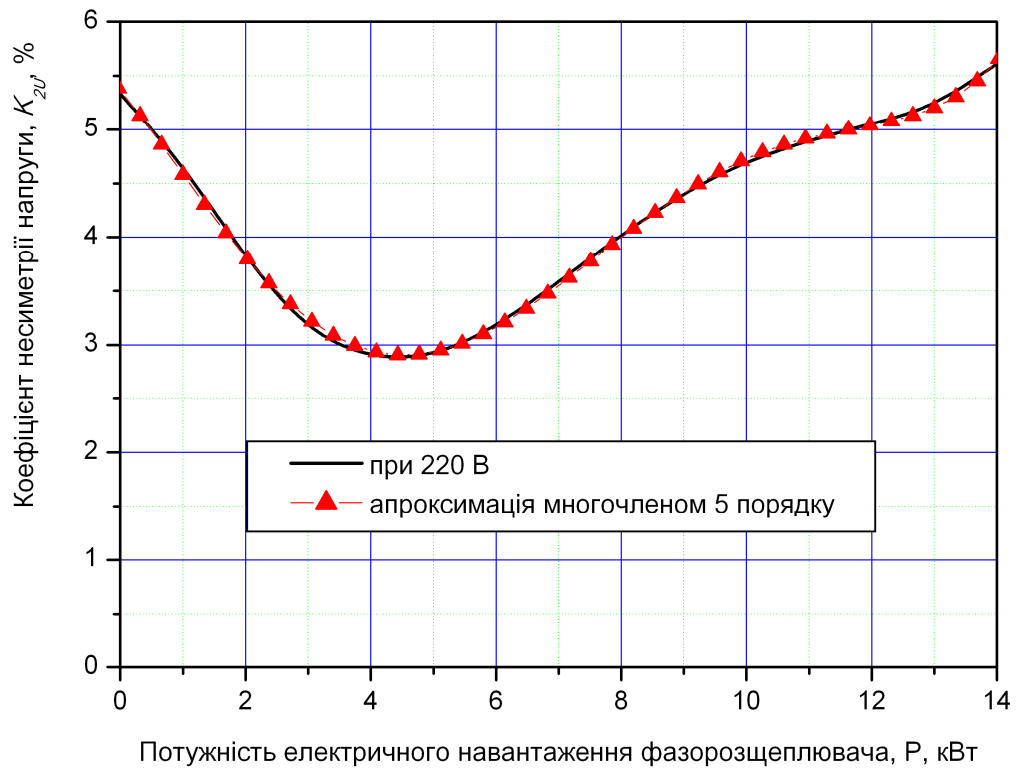


Рис. 2.5. Поліноміальна апроксимація залежності $K_{2U} = f(P)$ при 220 В



Рис. 2.6. Поліноміальна апроксимація залежності $K_{2U} = f(P)$ при 205 В

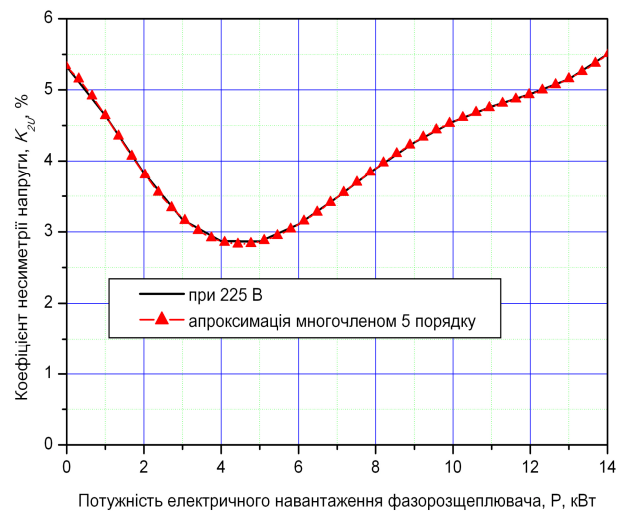


Рис. 2.7. Поліноміальна апроксимація залежності $K_{2U} = f(P)$ при 225 В

В роботі отримано аналітичні залежності $K_{2U} = f(P)$ в системі живлення допоміжних машин електропоїзда EP9М при різних значеннях напруг на виводах

додаткової обмотки тягового трансформатора. Для характерних напруг отримано аналітичні вирази для визначення коефіцієнту несиметрії напруги при певній величині електричного навантаження фазорозщеплювача. При необхідності визначення таких аналітичних залежностей при інших значеннях напруги допоміжної обмотки головного трансформатора їх можна отримати шляхом апроксимації відповідних кривих, побудованих за даними таблиці додатку Д.

2.3. Дослідження впливу коефіцієнта несиметрії живлячої напруги на додатковий нагрів ізоляції машин

Додатковий нагрів під впливом несиметрії живлячої напруги визначається за виразом [1, 39]:

$$\Delta \tau_{(2)} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_1. \quad (2.11)$$

Для двигунів, вказаних в табл. 2.1 при роботі із номінальним навантаженням, оцінимо вплив несиметрії живлячої напруги на величину додаткового перегріву. Підставимо у вираз (2.11) значення середнього перевищення температури обмотки статора для кожного двигуна із табл. 2.4, яке визначили за методикою [46], представленою в додатку Ж та значення коефіцієнта K_{2U} із діапазону від 0 до 10% [58].

Таблиця 2.4

Результати обчислення середнього перевищення температури обмотки статора за методикою [46]

№ з/п	Тип двигуна	Середнє перевищення температури обмотки статора $\theta_{\text{ном}}$, °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

Результати дослідження зведено в табл. 2.5. Графічно залежність додаткового нагріву допоміжних машин у функції коефіцієнта несиметрії живлячої напруги показано на рис. 2.8.

Таблиця 2.5

Додатковий нагрів [$^{\circ}\text{C}$] допоміжних машин електропоїзда змінного струму
EP9M при різних коефіцієнтах несиметрії живлячої напруги

Тип двигуна	Коефіцієнт несиметрії живлячої напруги, %										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ум. №548	0	0,98	3,93	8,83	15,71	24,54	35,34	48,10	62,82	79,51	98,16
2ТТ-16/10-01	0	1,04	4,14	9,32	16,56	25,88	37,27	50,73	66,26	83,86	103,53
АОМ 32-4	0	2,05	8,19	18,43	32,77	51,21	73,74	100,37	131,09	165,91	204,83
АОМ 22-2	0	0,96	3,82	8,61	15,30	23,91	34,42	46,85	61,20	77,45	95,62

Як випливає з рис. 2.8, в більшій мірі додатковий нагрів проявляється для машин, площа охолодження і коефіцієнт корисної дії яких менші. Для всіх машин, крім двигуна АОМ 32-4, додатковий нагрів від несиметрії живлячої напруги при можливому коефіцієнті $K_{2U} = 8\%$ не критичний і при класі ізоляції В не викликає її перегрів понад допустимі значення. Проте, мова йде лише про додатковий нагрів від несиметрії живлячої напруги. Для оцінки реального теплового стану допоміжних машин потрібно врахувати середнє перевищення температури їх обмоток і при номінальному режимі θ_1 . Тобто

$$\tau_1 = \theta_1 + \Delta\tau_{(2)}. \quad (2.12)$$

За виразом (2.12) визначимо сумарний перегрів обмоток статора для допоміжних машин електропоїзда EP9M при різних коефіцієнтах несиметрії живлячої напруги. Результати дослідження представлено в табл. 2.6.

В даній таблиці зеленим кольором показано значення нагріву ізоляції обмоток статора, що менші за гранично допустимі значення. Білим кольором – значення, що знаходяться на межі гранично-допустимих значень нагріву і менші за $\tau_{\text{доп}}$ на 10°C , а жовтим – нагрів, що знаходиться на межі гранично-допустимих значень перегріву і менший за $\tau_{\text{доп}}$ на 5°C .

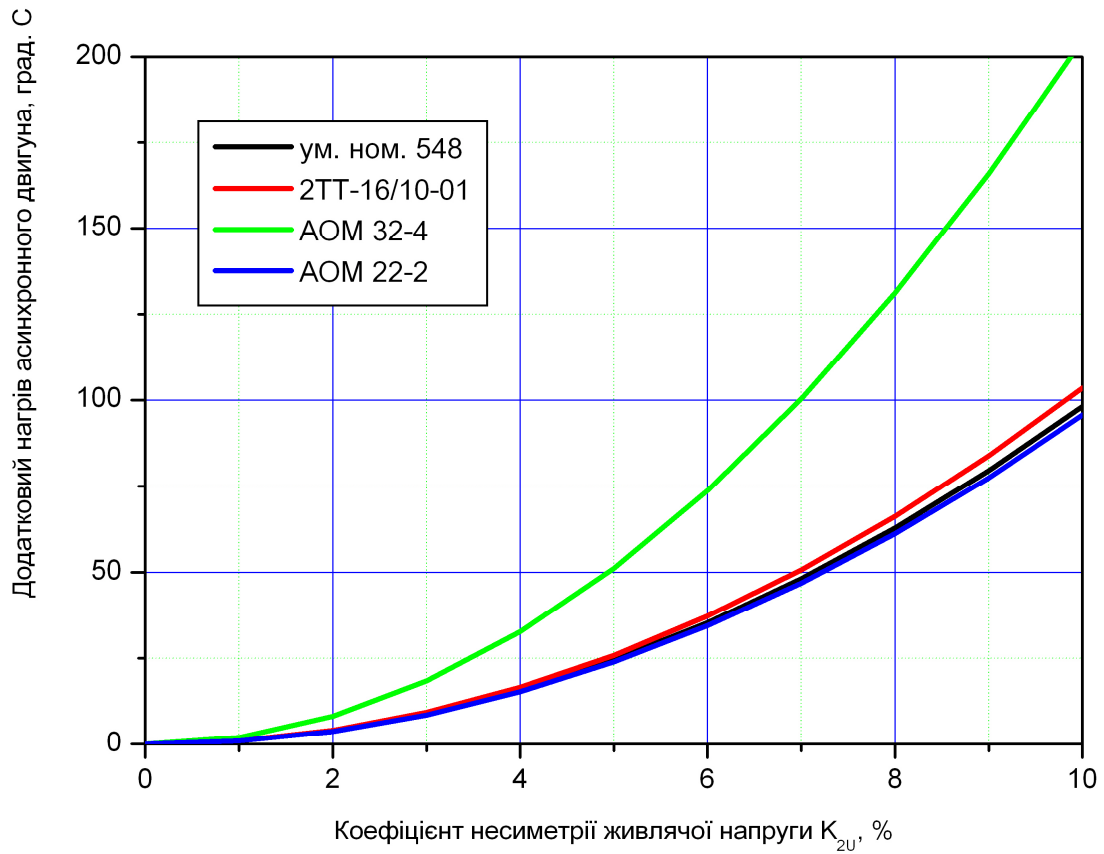


Рис. 2.8. Вплив коефіцієнта несиметрії живлячої напруги на додатковий нагрів допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

Таблиця 2.6

Сумарний нагрів обмоток статора [$^{\circ}\text{C}$] допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при класі ізоляції В при різних коефіцієнтах несиметрії живлячої напруги

Тип двигуна	Коефіцієнт несиметрії, %										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ум. №548	49,08	50,06	53,01	57,92	64,79	73,62	84,42	97,18	111,9	128,6	147,2
2ТТ-16/10-01	51,76	52,80	55,91	61,08	68,33	77,65	89,04	102,5	118	135,6	155,3
АОМ 32-4	102,4	104,5	110,6	120,9	135,2	153,6	176,2	202,8	233,5	268,3	307,2
АОМ 22-2	47,81	48,77	51,64	56,42	63,11	71,72	82,23	94,66	109	125,3	143,4

З табл. 2.6 випливає, що робота допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при коефіцієнті несиметрії більшому за 6% призводить до нагрівання їх обмоток статора до гранично-допустимих значень нагріву [51].

При використанні інших класів ізоляції границі допустимих значень нагріву змінюються і відповідно змінюються значення коефіцієнта K_{2U} , наприклад, при використанні класу ізоляції Н ($\nu_{\text{доп}} = 180^\circ\text{C}$) границя допустимого значення нагріву з урахуванням запасу 10°C складає $180^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 145^\circ\text{C}$. При цьому допустимий коефіцієнт несиметрії складає приблизно 4,5%

2.4. Вплив зміни значення рівня живлячої напруги на додатковий нагрів ізоляції допоміжних машин

При наявності відхилення напруги живлення від номінального значення також виникає додатковий нагрів ізоляції машини [39]:

$$\Delta\tau_U = 60\Delta U, \quad (2.13)$$

де ΔU - відносне відхилення живлячої напруги

$$\Delta U = \left| \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right|. \quad (2.14)$$

Згідно [75], напруга в контактній мережі коливається в межах 19...27,5 кВ.

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 приймаємо,

що номінальне значення напруги живлення допоміжних двигунів дорівнює номінальному значенню напруги обмотки живлення додаткових кіл головного трансформатора $U_{\text{ном}} = U_{\text{дк ном}}$.

Значення коефіцієнта трансформації тягового трансформатора залежить лише від кількості витків в його обмотках і не залежить від режиму роботи. Тому 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

$$U_{\text{дк min}} \dots U_{\text{дк max}}.$$

При цьому

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

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

Відхилення напруги при цьому 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 $\Delta \tau_{U \text{ min}} = 60 \Delta U_{\text{ min}} = 60 \cdot 0,24 = 14,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а при напрузі 27,5 кВ -

$$\Delta \tau_{U \text{ max}} = 60 \Delta U_{\text{ max}} = 60 \cdot 0,1 = 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Розраховану залежність $\Delta \tau = f(\Delta U_{*})$ наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Додатковий нагрів допоміжних машин при відхиленні живлячої напруги від номінального значення

U, В	ΔU_{*}	Додатковий перегрів, $^{\circ}\text{C}$
160	0,27	16,36
165	0,25	15
170	0,23	13,64
175	0,20	12,27
180	0,18	10,91
185	0,16	9,55
190	0,14	8,18
195	0,11	6,82
200	0,09	5,45
205	0,07	4,09

210	0,05	2,733
215	0,02	1,36
220	0	0
225	0,02	1,36
230	0,05	2,72
235	0,07	4,09
240	0,09	5,45
245	0,11	6,82
250	0,14	8,18
255	0,16	9,55
260	0,18	10,91

Графічно залежність нагріву допоміжних машин при відхиленні живлячої напруги від номінального значення, як показано на рис. 2.9.

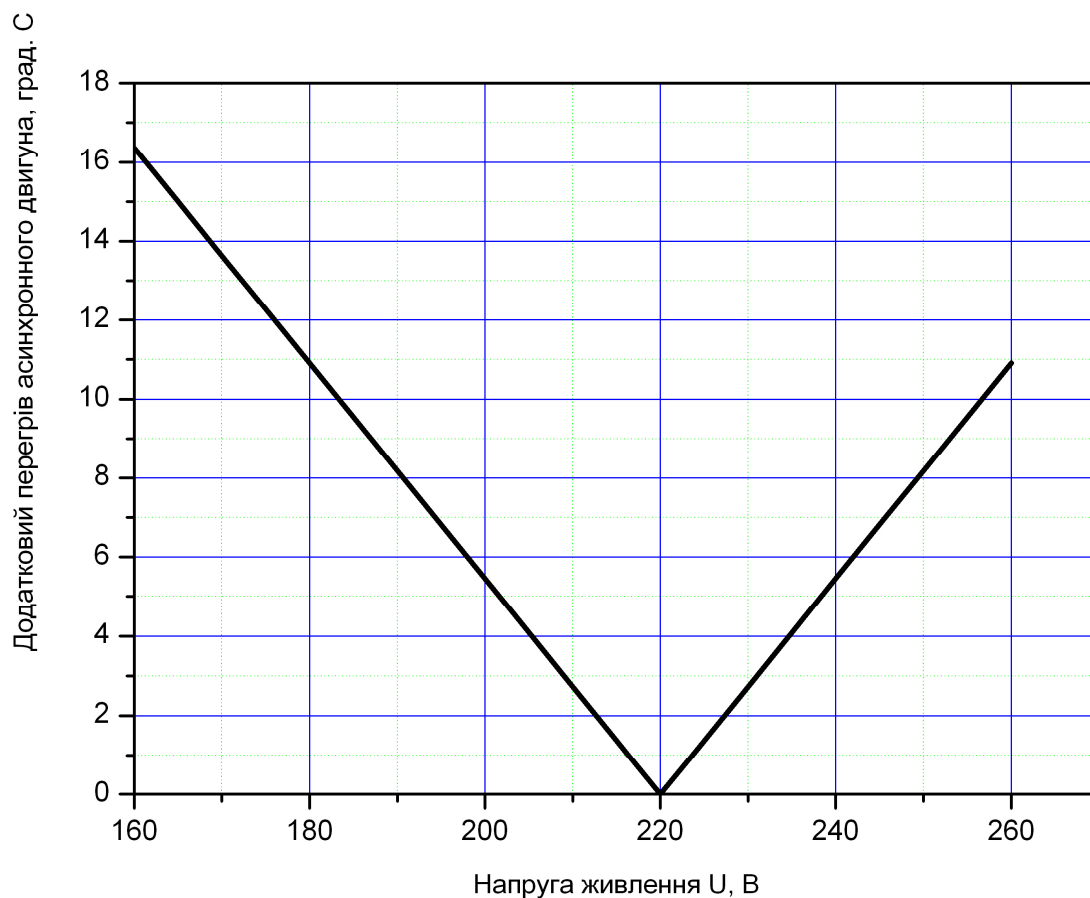


Рис. 2.9. Залежність додаткового перегріву асинхронних двигунів від відхилення напруги живлення

Як впливає із виразу (2.13), додатковий нагрів при відхиленні напруги живлення допоміжних машин від номінального значення не залежить від типу асинхронних двигунів, а визначається лише величиною відносного відхилення напруги живлення від номінального її значення.

2.5. Дослідження сумарного нагріву ізоляції з урахуванням всіх додаткових нагрівів

Для оцінки реального теплового стану ізоляції необхідно розглядати сумарний перегрів, що виникає від несиметрії напруги, відхилення напруги живлення та перегрів, що обумовлений номінальним режимом роботи електричної машини.

Сумарний перегрів обмотки статора можна визначити за виразом

$$\tau_1 = \theta_1 + \Delta\tau_{(2)} + \Delta\tau_{\Delta U}. \quad (2.15)$$

В табл. 2.8 приведено сумарний перегрів обмоток статора допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при одночасній дії несиметрії та відхиленні живлячої напруги з урахуванням перегріву при роботі в номінальному режимі.

Таблиця 2.8

Сумарний перегрів [°C] обмоток статора допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при несиметрії та відхиленні живлячої напруги

U, В	Коефіцієнт несиметрії, %										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ум. №548											
160	65,44	66,43	69,37	74,28	81,15	89,98	100,78	113,54	128,27	144,96	163,61
165	64,08	65,06	68,01	72,92	79,79	88,62	99,42	112,18	126,90	143,59	162,24
170	62,72	63,70	66,64	71,55	78,42	87,26	98,06	110,82	125,54	142,23	160,88
175	61,35	62,34	65,28	70,19	77,06	85,89	96,69	109,45	124,18	140,86	159,52
180	59,99	60,97	63,92	68,82	75,70	84,53	95,33	108,09	122,81	139,50	158,15
185	58,63	59,61	62,55	67,46	74,33	83,17	93,96	106,73	121,45	138,14	156,79
190	57,26	58,24	61,19	66,10	72,97	81,80	92,60	105,36	120,09	136,77	155,42
195	55,90	56,88	59,83	64,73	71,60	80,44	91,24	104,00	118,72	135,41	154,06
200	54,54	55,52	58,46	63,37	70,24	79,08	89,87	102,63	117,36	134,05	152,70
205	53,17	54,15	57,10	62,01	68,88	77,71	88,51	101,27	116,00	132,68	151,33
210	51,81	52,79	55,73	60,64	67,51	76,35	87,15	99,91	114,63	131,32	149,97
215	50,44	51,43	54,37	59,28	66,15	74,98	85,78	98,54	113,27	129,96	148,61
220	49,08	50,06	53,01	57,92	64,79	73,62	84,42	97,18	111,90	128,59	147,24
225	50,44	51,43	54,37	59,28	66,15	74,98	85,78	98,54	113,27	129,96	148,61
230	51,81	52,79	55,73	60,64	67,51	76,35	87,15	99,91	114,63	131,32	149,97
235	53,17	54,15	57,10	62,01	68,88	77,71	88,51	101,27	116,00	132,68	151,33

240	54,54	55,52	58,46	63,37	70,24	79,08	89,87	102,63	117,36	134,05	152,70
245	55,90	56,88	59,83	64,73	71,60	80,44	91,24	104,00	118,72	135,41	154,06
250	57,26	58,24	61,19	66,10	72,97	81,80	92,60	105,36	120,09	136,77	155,42
255	58,63	59,61	62,55	67,46	74,33	83,17	93,96	106,73	121,45	138,14	156,79
260	59,99	60,97	63,92	68,82	75,70	84,53	95,33	108,09	122,81	139,50	158,15
2ТТ-16/10-01											
160	68,13	69,16	72,27	77,45	84,69	94,01	105,40	118,86	134,39	151,99	171,66
165	66,76	67,80	70,91	76,08	83,33	92,65	104,04	117,49	133,02	150,62	170,29
170	65,40	66,44	69,54	74,72	81,97	91,28	102,67	116,13	131,66	149,26	168,93
175	64,04	65,07	68,18	73,36	80,60	89,92	101,31	114,77	130,30	147,90	167,57
180	62,67	63,71	66,81	71,99	79,24	88,56	99,94	113,40	128,93	146,53	166,20
185	61,31	62,35	65,45	70,63	77,87	87,19	98,58	112,04	127,57	145,17	164,84
190	59,95	60,98	64,09	69,26	76,51	85,83	97,22	110,68	126,21	143,81	163,48
195	58,58	59,62	62,72	67,90	75,15	84,47	95,85	109,31	124,84	142,44	162,11
200	57,22	58,25	61,36	66,54	73,78	83,10	94,49	107,95	123,48	141,08	160,75
205	55,86	56,89	60,00	65,17	72,42	81,74	93,13	106,59	122,11	139,71	159,39
210	54,49	55,53	58,63	63,81	71,06	80,37	91,76	105,22	120,75	138,35	158,02
215	53,13	54,16	57,27	62,45	69,69	79,01	90,40	103,86	119,39	136,99	156,66
220	51,76	52,80	55,91	61,08	68,33	77,65	89,04	102,49	118,02	135,62	155,29
225	53,13	54,16	57,27	62,45	69,69	79,01	90,40	103,86	119,39	136,99	156,66
230	54,49	55,53	58,63	63,81	71,06	80,37	91,76	105,22	120,75	138,35	158,02
235	55,86	56,89	60,00	65,17	72,42	81,74	93,13	106,59	122,11	139,71	159,39
240	57,22	58,25	61,36	66,54	73,78	83,10	94,49	107,95	123,48	141,08	160,75
245	58,58	59,62	62,72	67,90	75,15	84,47	95,85	109,31	124,84	142,44	162,11
250	59,95	60,98	64,09	69,26	76,51	85,83	97,22	110,68	126,21	143,81	163,48
255	61,31	62,35	65,45	70,63	77,87	87,19	98,58	112,04	127,57	145,17	164,84
260	62,67	63,71	66,81	71,99	79,24	88,56	99,94	113,40	128,93	146,53	166,20
AOM 32-4											
160	118,78	120,83	126,97	137,21	151,55	169,98	192,52	219,14	249,87	284,69	323,61
165	117,41	119,46	125,61	135,85	150,19	168,62	191,15	217,78	248,50	283,32	322,24
170	116,05	118,10	124,24	134,48	148,82	167,26	189,79	216,42	247,14	281,96	320,88
175	114,69	116,73	122,88	133,12	147,46	165,89	188,42	215,05	245,78	280,60	319,51
180	113,32	115,37	121,52	131,76	146,10	164,53	187,06	213,69	244,41	279,23	318,15
185	111,96	114,01	120,15	130,39	144,73	163,17	185,70	212,32	243,05	277,87	316,79
190	110,60	112,64	118,79	129,03	143,37	161,80	184,33	210,96	241,69	276,51	315,42
195	109,23	111,28	117,43	127,67	142,00	160,44	182,97	209,60	240,32	275,14	314,06
200	107,87	109,92	116,06	126,30	140,64	159,08	181,61	208,23	238,96	273,78	312,70
205	106,50	108,55	114,70	124,94	139,28	157,71	180,24	206,87	237,59	272,42	311,33
210	105,14	107,19	113,33	123,58	137,91	156,35	178,88	205,51	236,23	271,05	309,97
215	103,78	105,83	111,97	122,21	136,55	154,98	177,52	204,14	234,87	269,69	308,61
220	102,41	104,46	110,61	120,85	135,19	153,62	176,15	202,78	233,50	268,32	307,24
225	103,78	105,83	111,97	122,21	136,55	154,98	177,52	204,14	234,87	269,69	308,61
230	105,14	107,19	113,33	123,58	137,91	156,35	178,88	205,51	236,23	271,05	309,97
235	106,50	108,55	114,70	124,94	139,28	157,71	180,24	206,87	237,59	272,42	311,33
240	107,87	109,92	116,06	126,30	140,64	159,08	181,61	208,23	238,96	273,78	312,70
245	109,23	111,28	117,43	127,67	142,00	160,44	182,97	209,60	240,32	275,14	314,06
250	110,60	112,64	118,79	129,03	143,37	161,80	184,33	210,96	241,69	276,51	315,42
255	111,96	114,01	120,15	130,39	144,73	163,17	185,70	212,32	243,05	277,87	316,79
260	113,32	115,37	121,52	131,76	146,10	164,53	187,06	213,69	244,41	279,23	318,15
AOM 22-2											
160	64,17	65,13	68,00	72,78	79,47	88,08	98,60	111,03	125,37	141,63	159,80
165	62,81	63,77	66,64	71,42	78,11	86,72	97,23	109,66	124,01	140,26	158,43
170	61,45	62,40	65,27	70,05	76,75	85,35	95,87	108,30	122,64	138,90	157,07
175	60,08	61,04	63,91	68,69	75,38	83,99	94,51	106,94	121,28	137,54	155,70

180	58,72	59,68	62,54	67,33	74,02	82,62	93,14	105,57	119,92	136,17	154,34
185	57,36	58,31	61,18	65,96	72,66	81,26	91,78	104,21	118,55	134,81	152,98
190	55,99	56,95	59,82	64,60	71,29	79,90	90,42	102,85	117,19	133,45	151,61
195	54,63	55,58	58,45	63,23	69,93	78,53	89,05	101,48	115,83	132,08	150,25
200	53,27	54,22	57,09	61,87	68,56	77,17	87,69	100,12	114,46	130,72	148,89
205	51,90	52,86	55,73	60,51	67,20	75,81	86,32	98,76	113,10	129,35	147,52
210	50,54	51,49	54,36	59,14	65,84	74,44	84,96	97,39	111,74	127,99	146,16
215	49,17	50,13	53,00	57,78	64,47	73,08	83,60	96,03	110,37	126,63	144,80
220	47,81	48,77	51,64	56,42	63,11	71,72	82,23	94,66	109,01	125,26	143,43
225	49,17	50,13	53,00	57,78	64,47	73,08	83,60	96,03	110,37	126,63	144,80
230	50,54	51,49	54,36	59,14	65,84	74,44	84,96	97,39	111,74	127,99	146,16
235	51,90	52,86	55,73	60,51	67,20	75,81	86,32	98,76	113,10	129,35	147,52
240	53,27	54,22	57,09	61,87	68,56	77,17	87,69	100,12	114,46	130,72	148,89
245	54,63	55,58	58,45	63,23	69,93	78,53	89,05	101,48	115,83	132,08	150,25
250	55,99	56,95	59,82	64,60	71,29	79,90	90,42	102,85	117,19	133,45	151,61
255	57,36	58,31	61,18	65,96	72,66	81,26	91,78	104,21	118,55	134,81	152,98
260	58,72	59,68	62,54	67,33	74,02	82,62	93,14	105,57	119,92	136,17	154,34

Зафарбовано ті ячейки, в яких міститься значення перегріву ізоляції понад 105°C, вони розташовані на перетині стовпця і рядку із певними значеннями напруги живлення та коефіцієнту несиметрії. Тривала робота двигуна при одночасній дії вказаного коефіцієнта несиметрії та відхилення напруги за умовами теплового стану асинхронного двигуна неможлива.

2.6. Висновки до другого розділу

1. Із всіх показників якості електричної енергії, з точки зору впливу на ізоляцію допоміжних машин електропоїздів EP9M, автором для розгляду в роботі обрано ті, які більше за все впливають на температуру ізоляції: несиметрія живлячої напруги та відхилення напруги від номінального значення. Із названих двох показників найбільшого впливу на перегрів ізоляції завдає несиметрія живлячої напруги.

2. Основним джерелом несиметрії живлячої напруги в системі допоміжних машин електропоїздів EP9M є фазорозщеплювач, принципом дії якого обумовлена наявність несиметрії системи лінійних напруг.

3. Із аналізу технічної літератури встановлено залежність коефіцієнта несиметрії живлячої напруги від електричного навантаження на фазорозщеплювач та від величини напруги живлення. Виявлено, що в умовах реальної експлуата-

ції електропоїзда серії EP9M із фазорозщеплювачами типу РФ – 1Д5 коефіцієнт несиметрії живлячої напруги K_{2U} може коливатися в межах $K_{2U} = (3...7\%)$. Отримано аналітичні вирази названої залежності $K_{2U} = f(P)$ у вигляді многочленів п'ятого, шостого та восьмого степенів при найбільш характерних значеннях напруги на вході фазорозщеплювача, а саме – 160, 205, 220, 225 та 260 В.

4. Встановлено, що в реальних умовах експлуатації перегрів допоміжних машин в середньому становить $68...124,3^{\circ}\text{C}$.

5. Перегрів допоміжних машин при відхиленнях напруги від номінального значення не залежить від температури частин машини при роботі в номінальному режимі, а лише пропорційний величині відносного відхилення напруги живлення від номінального значення. Зниження напруги в колах живлення допоміжних машин змінного струму до 160 В дає додатковий перегрів на $16,4^{\circ}\text{C}$.

6. Встановлено, що гранично допустимими значеннями несиметрії напруги за умовами нормального робочого перегріву обмоток статора допоміжних машин є значення $K_{2U} = 5...7\%$ 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 $K_{2U} = 1...2\%$.

РОЗДІЛ 3

ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЗМІННОГО СТРУМУ

Для дослідження теплового стану статорних обмоток асинхронних допоміжних машин електропоїздів змінного струму в режимах реальної експлуатації автором запропоновано створення математичної моделі нагрівання допоміжних машин електропоїзда ЕР9М із урахуванням впливу реального навантаження двигунів, якості живлячої електроенергії та реальних умов експлуатації електропоїздів.

В широкому розумінні математична модель це спосіб математичного моделювання реальності, один із варіантів моделей, як системи, дослідження якої дозволяє отримати інформацію про деяку іншу систему, подібну змодельованій [69]. При виконанні математичного моделювання замінюємо реальний об'єкт дослідження його математичною моделлю, а потім досліджуємо останню. Зв'язок математичної моделі з реальністю відбувається через ряд гіпотез, спрощень і ідеалізацій. Таким чином математично моделюється ідеалізований об'єкт, побудований на етапі змістового моделювання.

3.1. Аналіз існуючих аналітичних методів визначення нагріву електричних машин

Основними джерелами тепла в електричних двигунах є обмотки, сталеві частини магнітного кола і конструктивних елементів, в яких відбуваються втрати від перемагнічення, підшипники, а також тертя обертових частин по середовищу в середині машини [16]. Для оцінки впливу теплових потоків від перелічених джерел нагрівання на сумарне нагрівання електричної машини в інженерній практиці застосовують ряд методик, які в основному базуються на теорії нагрівання твердого однорідного тіла. Нижче наведено основні положення аналітичних методів визначення нагріву електричних машин.

Електричні втрати в обмотці статора, магнітні втрати в зубцях і спинці осердя статора у вигляді тепла частково передаються до станини шляхом теплопровідності через осердя статора і стик між ним і станиною, а частково вглиб ма-

шини внутрішнім циркуляційним повітрям. На рис. 3.1 представлено схему передачі втрат в середині закритої машини. Втрати, що виділяються в роторі знімаються з торцевих частин обмотки ротора і передаються в повітря всередині машини, інша їх частина через повітряний проміжок гріє статор. Частина втрат, що знімається з лобових частин обмоток надходить в підшипникові щити і корпус статора. Сумарні нагрівуючі втрати знімаються із зовнішньої поверхні підшипникових щитів та зовнішньої поверхні статора в навколишнє середовище.

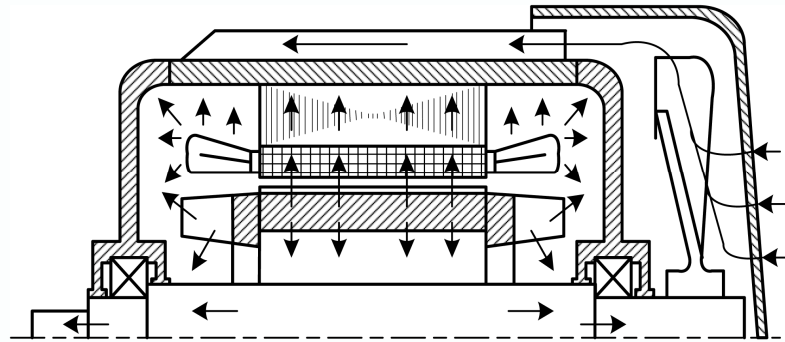


Рис. 3.1. Схема передачі втрат електроенергії всередині закритої машини

Оцінку нагрівання електричних двигунів сьогодні можливо виконувати за теорією нагрівання однорідного тіла з позицій двох основних підходів. Обидва з цих підходів засновані на використанні теплових схем заміщення. Перший передбачає заміну реальних складових частин електричної машини еквівалентними однорідними в тепловому відношенні тілами, з яких будується статична теплова схема заміщення [16]; за другим – електрична машина представляється у вигляді системи однорідних тіл, яким відповідають певні конструктивні елементи машини, джерела тепловипромінювання і теплові провідності, з яких будують еквіваленту динамічну теплову схему заміщення [18].

Основу методу теплових схем заміщення, як зазначено вище, складає теорія нагрівання однорідного тіла. Тому, на думку автора, потрібно навести основні положення цієї теорії [22, 46].

В основу теорії покладено декілька припущень. Реальний двигун вважають однорідним тілом з безкінечно великою теплопровідністю, тобто температура в усіх точках тіла однакова; коефіцієнт тепловіддачі двигуна приймають постійним [16, 17].

На шляху переміщення теплових потоків від джерела тепла відбувається перепад температури в активних частинах машини, товщині шару ізоляції і між охолоджуючими поверхнями і охолоджуючим середовищем. В тепловому розрахунку визначають ці внутрішні перепади і перевищення температури зовнішньої поверхні охолоджуваних частин електричної машини над температурою охолоджуючого повітря. Перепадом температури в шарі металу обмоток і магнітопроводів нехтують через те, що теплопровідність металів значно більша за теплопровідність ізоляції. В практичних розрахунках обмежуються визначенням середнього перевищення температури обмоток. Для визначення повного перегріву обмоток необхідно врахувати підігрів охолоджуючого середовища, яке надходить до машини і сприймає тепло від нагрітих її частин. Сумарне перевищення температури машини складається із двох основних компонентів: температурного перепаду в товщі ізоляційного шару та теплопередачі з поверхні.

Кількість тепла, що пройде через ізоляцію за 1 сек пропорційна перепаду температури по товщині ізоляції, площі ізоляції в площині перпендикулярній руху теплового потоку, коефіцієнту теплопровідності і обернено пропорційна товщині ізоляційного шару.

$$Q = \Delta v_{\text{із}} = \frac{\lambda_{\text{із}} S_{\text{із}}}{b_{\text{із}}} . \quad (3.1)$$

Звідси,

$$\Delta v_{\text{із}} = Q \frac{b_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}} S_{\text{із}}} . \quad (3.2)$$

Вводять поняття теплового опору ізоляції, який викликає перепад температури в товщі шару ізоляції $R_{\text{із}} = \frac{b_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}} S_{\text{із}}}$. В багатошарових ізоляціях сумарний тепловий опір дорівнює сумі опорів ізоляції окремих шарів $R_{\text{із}} = R_{\text{із1}} + R_{\text{із2}} + \dots + R_{\text{ізn}}$.

Відвід тепла з поверхні нагрітого тіла відбувається шляхом випромінювання в оточуюче середовище, шляхом теплопровідної передачі тепла і конвекції.

Перепад температури на поверхні визначається виразом:

$$\Delta v_{\text{пов}} = \frac{Q_{\text{пов}}}{S_{\text{пов}} \alpha_{\text{пов}}}, \quad (3.3)$$

або, якщо прийняти, що $\frac{1}{S_{\text{пов}} \alpha_{\text{пов}}} = R_{\text{пов}}$, тоді тепловий опір поверхні нагрітого тіла визначається як:

$$\Delta v_{\text{пов}} = Q_{\text{пов}} R_{\text{пов}}. \quad (3.4)$$

Коефіцієнти теплопровідності $\lambda_{\text{із}}$ і теплопередачі $\alpha_{\text{пов}}$ визначають експериментально на моделях і з метою використання їх для конкретних випадків розрахунку враховують за допомогою безрозмірних величин подібності.

При визначенні сталої температури певної частини машини необхідно врахувати попередній нагрів повітря, який обдуває поверхню:

$$\Delta v_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}}}{c_{\text{п}}} V_{\text{п}}, \quad (3.5)$$

де $c_{\text{п}}$ - питома теплоємність повітря, $c_{\text{п}} = 1100 \frac{\text{Дж}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^3}$;

$V_{\text{п}}$ - необхідна кількість охолоджуючого повітря, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$.

Приймаючи лінійний характер зміни нагріву повітря вздовж шляху його руху, вважають, що середнє перевищення його температури над температурою холодного повітря $v_{\text{х}}$ приблизно дорівнює $0,5\Delta v_{\text{п}}$. Тому середня стала температура обмотки електричної машини

$$v = \Delta v_{\text{із}} + \Delta v_{\text{пов}} + 0,5\Delta v_{\text{п}} + v_{\text{х}}. \quad (3.6)$$

Метод теплових схем заміщення отримав широкого розповсюдження. Його застосовують для розв'язання не тільки двовірних, а й тримірних задач, коли складаються теплові опори за трьома напрямками теплових потоків. Застосування теплових схем заміщення дає можливість визначати середні температури частин електричної машини, які приймаються за однорідні тіла.

Для кожної частини електричної машини справедливим є рівняння, що витікає із раніше наведених рівнянь для нагрівання однорідного тіла.

$$v_1 - v_2 = Q_{12} R_{12}, \quad (3.7)$$

де Q_{12} - тепловий потік між точками 1 і 2 схеми, що являють собою першу і другу частину машини відповідно, Вт;

ν_1, ν_2 - середні температури цих частин, $^{\circ}\text{C}$;

R_{12} - тепловий опір між точками 1 та 2 схеми, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Чим більша кількість еквівалентних елементів, використаних для заміщення частин електричної машини, тим більш точним виявиться розрахунок. Проте ускладнення теплової схеми повинно бути узгоджене з можливою точністю розрахунку при певній невизначеності вихідних даних.

Відповідно до поширеної на практиці методики І.П. Копилова [16] статор асинхронного двигуна розділяють на три умовно однорідні в тепловому відношенні тіла (див. рис. 3.2): пазову частину обмотки статора з втратами $P_{\text{п}}$, дві лобові частини з сумарними втратами $P_{\text{л}}$ і стальне осердя із втратами $P_{\text{с}}$.

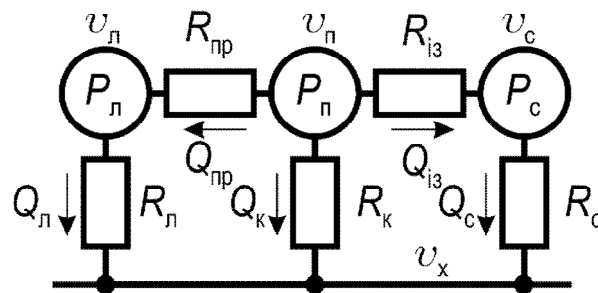


Рис. 3.2. Теплова схема заміщення статора машини змінного струму за методикою І.П. Копилова.

Кожна із частин створює теплові потоки. $Q_{\text{із}}$ - тепловий потік до стінок зубців осердя з перепадом температури в тепловому опорі пазової ізоляції $R_{\text{із}}$; $Q_{\text{к}}$ - тепловий потік до охолоджуючого повітря в радіальних вентиляційних каналах через тепловий опір $R_{\text{к}}$; $Q_{\text{пр}}$ - теплові потоки вздовж провідників обмотки від пазової частини обмотки з перепадом температури в тепловому опорі $R_{\text{пр}}$; $Q_{\text{л}}$ - тепловий потік від поверхонь лобових частин обмотки статора через тепловий опір $R_{\text{л}}$; поверхня осердя статора з бокової частини пакета розсіює тепловий потік $Q_{\text{с}}$ з перепадом температури на тепловому опорі $R_{\text{с}}$.

На схемі, що наведена на рис. 3.2, містяться 8 невідомих:

$\nu_{\text{п}}, \nu_{\text{л}}, \nu_{\text{с}}$ - середні температури пазової частини обмотки, лобових частин і осердя статора відповідно;

$Q_{\text{із}}, Q_{\text{к}}, Q_{\text{пр}}, Q_{\text{л}}, Q_{\text{с}}$ - згадані вище теплові потоки. Для визначення цих невідомих складають систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{п}} + P_{\text{л}} + P_{\text{с}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{с}}; \\ Q_{\text{л}} = P_{\text{л}} + Q_{\text{пр}}; \\ Q_{\text{с}} = Q_{\text{із}} + P_{\text{с}}; \\ \nu_{\text{п}} - \nu_{\text{х}} = Q_{\text{к}} R_{\text{к}}; \\ \nu_{\text{л}} - \nu_{\text{х}} = Q_{\text{л}} R_{\text{л}}; \\ \nu_{\text{с}} - \nu_{\text{х}} = Q_{\text{с}} R_{\text{с}}; \\ \nu_{\text{п}} - \nu_{\text{х}} = Q_{\text{пр}} R_{\text{пр}}; \\ \nu_{\text{п}} - \nu_{\text{с}} = Q_{\text{із}} R_{\text{із}}. \end{array} \right. , \quad (3.8)$$

В результаті розв'язування системи рівнянь знаходять середні температури окремих частин статора.

Модель такого виду є статичною, вона придатна для дослідження теплового стану електродвигуна в сталому режимі з постійним навантаженням, тобто дозволяє розраховувати лише усталений тепловий режим асинхронного двигуна. Для відстеження динаміки нагріву необхідно враховувати інерційність теплових процесів [18].

Для дослідження нагрівання асинхронних двигунів в [6], зокрема, пропонується використовувати метод теплових параметрів, який дозволяє отримати значення перегрівів асинхронних двигунів із необхідною інженерною точністю. Використання цього методу також пов'язано із певними складнощами і для його використання у застосуванні до асинхронних двигунів, що встановлено на електропоїзді ЕР9М є ряд перешкод.

Вказаними методиками зручно користуватися на етапі проектування 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 вище 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 нагріву 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 з експлуатації (паспортні дані, геометричні розміри).

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

Зважаючи на ряд незручностей, з якими пов'язане виконання розрахунку методом еквівалентних теплових моделей та іншими відомими методами, пропонується метод [8, 9, 10, 39] для знаходження додаткового нагріву ізоляції обмотки статора з використанням узагальненої теплової моделі.

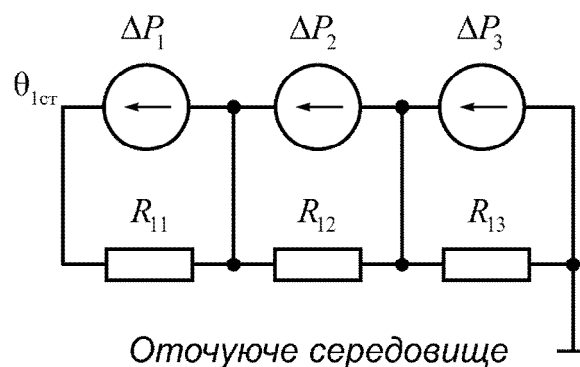


Рис. 3.3. Узагальнена теплова модель асинхронного двигуна

На рис. 3.3 прийнято: θ_1 - середнє перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна в нормальних умовах;

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

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

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

Величини електричних врат в обмотках статора, ротора і втрати сталі для двигунів малої потужності (потужність двигунів допоміжних машин до 5 кВт) на підставі [26, 46] приймемо у наступному відсотковому співвідношенні до повних втрат в двигуні.

Відомо [22, 38, 42], що сумарні втрати в двигуні

$$\sum p = P_1 \cdot (1 - \eta). \quad (3.9)$$

З них [26, 46]:

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

Інші втрати займають лише 5% від сумарних втрат в двигуні

Така теплова схема заміщення, показана на рис. 3.3, дозволяє розрахувати середнє перевищення температури $\theta_{1\text{ном}}$ обмотки статора:

$$\theta_{1\text{ном}} = R_{11}\Delta P_1 + R_{12}\Delta P_2 + R_{13}\Delta P_3. \quad (3.10)$$

При цьому теплові опори визначаємо за допомогою емпіричних виразів

$$R_{11} = \frac{K}{D_{a1}l_1}; \quad (3.11)$$

$$R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6R_{11}, \quad (3.12)$$

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...10 кВт і $35 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}}$ – для АД потужністю 11...250 кВт.

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

З метою перевірки придатності узагальненої теплової моделі для дослідження нагрівання допоміжних машин електропоїздів змінного струму порівнюємо результати обчислення середнього перевищення температури обмотки статора за узагальненою тепловою моделлю із результатами отриманими за допомогою відомої методики І.П. Копилова. В табл. 3.1 приведено порівняння результатів обчислення середнього перевищення температури обмоток статора $\theta_{\text{ном}}$ визначеного за узагальненою тепловою моделлю і класичним методом.

Таблиця 3.1

Порівняння результатів обчислення середнього перевищення температури обмотки статора $\theta_{\text{ном}}$ визначеного за узагальненою тепловою моделлю із класичним методом

Тип двигуна	Середнє перевищення температури обмотки статора $\theta_{\text{ном}}$, $^{\circ}\text{C}$		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 видно із табл. 3.1, 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.

3.3. Врахування проектного запасу за потужністю допоміжних машин при визначенні середнього перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна

На нагрів допоміжних машин впливає ще той факт, що допоміжні машини, виходячи із умов експлуатації, вибирають із певним запасом за потужністю. При побудові математичної теплової моделі допоміжних машин електропоїздів змінного струму пропонується враховувати запас за потужністю наступним чином.

При проектуванні рухомого складу рекомендують обирати двигуни із запасом за потужністю до 1,5...1,6 [36, 48]. Досвід показав, що при вказаних значеннях коефіцієнту запасу забезпечується пуск допоміжних машин без перегріву їх обмоток. Коефіцієнт запасу досліджуваних двигунів показано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Коефіцієнти запасу за потужністю для допоміжних машин
електропоїздів серії EP9M

Вид допоміжної машини	Тип застосованого двигуна	Коефіцієнт запасу k_3
Двигун компресора	ум. № 548	1,43
Двигун насоса трансформатора	2ТТ-16/10-01	1,7
Двигун вентилятора пасажирського салону	АОМ 32-4	1,5
Двигун вентилятора кабіни машиніста	АОМ 22-2	1,3

При цьому в тривалих режимах вказані вище двигуни працюють із навантаженням меншим за номінальне через різницю між їх номінальною потужністю і механічною потужністю приводимого агрегату.

Відомо, що коефіцієнт корисної дії двигуна залежить від корисної механічної потужності на його валу. При малих навантаженнях ККД малий, а при більших – зростає [55]. Із зміною ККД двигуна при зміні його навантаження змінюється чисельно величина втрат ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 [55].

Величиною, яка характеризує ступінь навантаження двигуна є коефіцієнт навантаження, що являє собою відношення механічної потужності навантаження P_c до номінальної потужності двигуна $P_{\text{ном}}$, тобто $k_H = \frac{P_c}{P_{\text{ном}}}$.

Значення коефіцієнта корисної дії при даному коефіцієнті навантаження k_H знайдено із виразу[55]:

$$\eta = \frac{k_H \cdot P_{\text{ном}}}{k_H \cdot P_{\text{ном}} + P_{=} + P_{=}^2 \cdot P_{\sim\text{ном}}}, \quad (3.13)$$

де $P_{=} = \Delta P_3 + p_{\text{мех}}$ - постійні втрати потужності в двигуні;

$P_{\sim\text{ном}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$ - номінальні змінні втрати потужності в двигуні.

Коефіцієнт запасу за потужністю k_3 являє собою відношення номінальної потужності двигуна $P_{\text{ном}}$ до механічної потужності навантаження P_c , тобто $k_3 = \frac{P_{\text{ном}}}{P_c}$. Отже, коефіцієнт запасу взаємообернена величина до коефіцієнту на-

вантаження $k_H = \frac{1}{k_3}$, тому можемо привести вираз для визначення ККД у вигляді:

$$\eta = \frac{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}}}{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}} + P_{=} + \left(\frac{1}{k_3}\right)^2 \cdot P_{\sim\text{ном}}}. \quad (3.14)$$

При зміні коефіцієнту запасу змінюється коефіцієнт корисної дії двигуна при заданому коефіцієнті навантаження.

Дослідимо $\eta = f(k_3)$ зміну ККД двигуна при роботі із запасом потужності.

Результати наведено в табл.3.3

Таблиця 3.3

Коефіцієнт корисної дії асинхронних двигунів при роботі їх із коефіцієнтом запасу за потужністю k_3

Тип двигуна	Аналог	Аналог	Аналог	Аналог
k_3	АОМ 22-2	АОМ 32-4	Ум. № 548	2ТТ16/10-01
1,0	0,81	0,7	0,8	0,73
1,1	0,8167	0,70919	0,80697	0,73861
1,2	0,82171	0,71611	0,81218	0,74509
1,3	0,82538	0,72122	0,81601	0,74986
1,4	0,82798	0,72485	0,81871	0,75324
1,5	0,82971	0,72727	0,82051	0,7555
1,6	0,83072	0,72869	0,82157	0,75682
1,7	0,83113	0,72928	0,822	0,75737
1,8	0,83105	0,72917	0,82192	0,75726
1,9	0,83056	0,72847	0,8214	0,75661
2,0	0,82971	0,72727	0,82051	0,7555

Під терміном «аналог» в табл. 3.3 розуміємо двигуни, що виконують функції аналогічні даним, але вибрані із відповідними запасами потужності.

На рис. 3.4 наведено залежності $\eta = f(k_3)$ для допоміжних машин електропоїздів, побудовані відповідно до табл. 3.3. Як впливає з рис. 3.4 та табл. 3.3, при проектному запасі потужності $k_3 = 1,6$ коефіцієнт корисної дії двигунів збільшується на 2,49% для двигуна вентилятора кабіни, на 3,94% - для двигуна вентилятора салона; на 2,63% - для двигуна компресора; на 3,54% - для двигуна електронасоса трансформатора. Це пояснюється тим, що для двигунів малої потужності максимальне значення ККД на характеристиці $\eta = f(P_2)$ розташована лівише точки номінального режиму [55]. Тому при збільшенні запасу приблизно на 40% відбувається збільшення коефіцієнту корисної дії, зменшення втрат в двигуні.

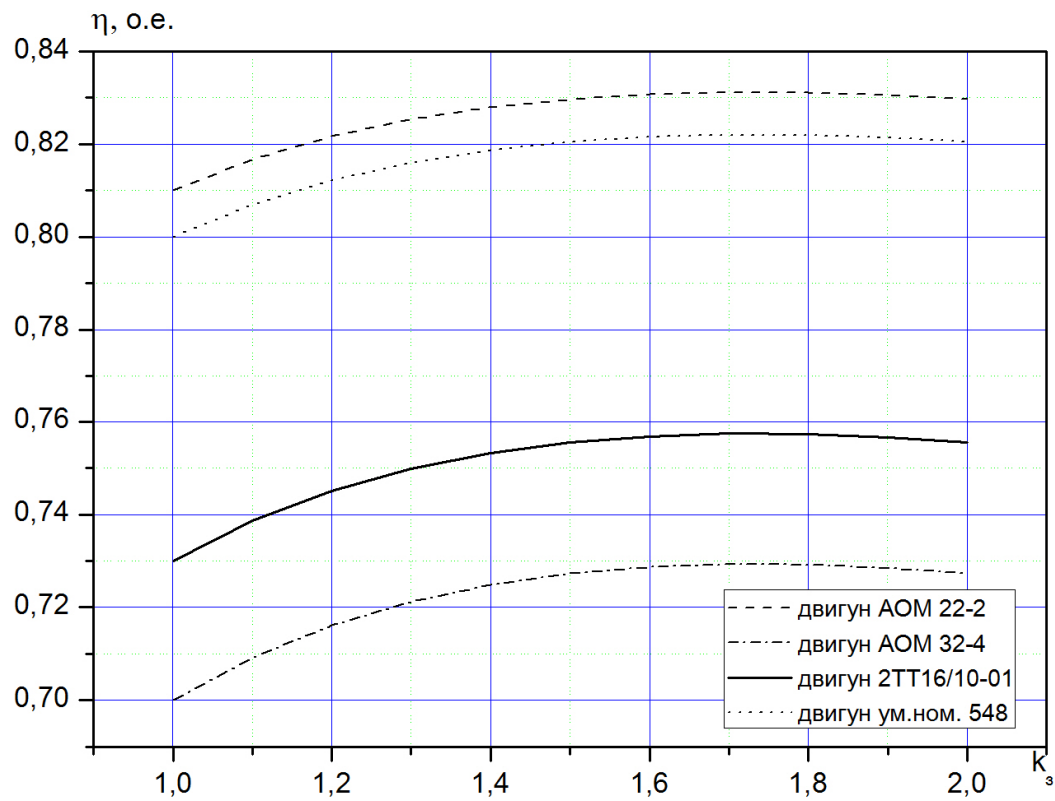


Рис. 3.4. Залежність значення ККД допоміжних машин від коефіцієнту запасу k_3

На прикладі двигуна вентилятора пасажирського салона типу АОМ 32-4 покажемо методику визначення впливу коефіцієнта запасу за потужністю k_3 на середнє перевищення температури обмотки статора двигуна θ_1 .

Відповідно до табл. 2.1, номінальна потужність названого двигуна $P_n = 1500$ Вт, номінальний ККД $\eta_n = 0,7$, споживана двигуном потужність $P_1 = 2140$ Вт.

Сумарні втрати в двигуні в номінальному режимі за виразом (3.9) складають:

$$\sum p_n = P_1 \cdot (1 - \eta_n) = 2140 \cdot (1 - 0,7) = 642 \text{ Вт.}$$

З них [16, 33]:

•електричні втрати в обмотці статора

$$\Delta P_{1n} = 0,5 \cdot \sum p_n = 0,5 \cdot 642 = 321,43 \text{ Вт;}$$

•електричні втрати в обмотці ротора

$$\Delta P_{2n} = 0,25 \cdot \sum p_n = 0,25 \cdot 642 = 160,71 \text{ Вт;}$$

•втрати в сталі складають $\Delta P_{3н} = 0,2 \cdot \sum p_{н} = 0,2 \cdot 642 = 128,57$ Вт.

•механічні втрати $\Delta p_{мн} = 0,05 \cdot \sum p_{н} = 0,05 \cdot 642 = 32,1$ Вт.

Постійні втрати потужності в двигуні
 $P_{\pm} = \Delta P_{3н} + \Delta p_{мн} = 128,57 + 32,1 = 160,71$ Вт.

Номінальні змінні втрати потужності в двигуні
 $P_{\sim} = \Delta P_{1н} + \Delta P_{2н} = 321,43 + 160,71 = 482,14$ Вт.

Середнє перевищення температури обмотки статора двигуна при номінальному навантаженні за виразом (3.10) складає $\theta_{1н} = 102,41^{\circ}\text{C}$.

Відповідно до табл. 3.2, двигун вентилятора має коефіцієнт запасу за потужністю $k_3 = 1,5$. За виразом (3.14) визначимо коефіцієнт корисної дії двигуна при такому k_3 .

$$\eta_{1,5} = \frac{\frac{1}{k_3} \cdot P_{н}}{\frac{1}{k_3} \cdot P_{н} + P_{\pm} + \left(\frac{1}{k_3}\right)^2 \cdot P_{\sim}} = \frac{\frac{1}{1,5} \cdot 1500}{\frac{1}{1,5} \cdot 1500 + 160,71 + \left(\frac{1}{1,5}\right)^2 \cdot 482,14} = 0,72727$$

Корисна потужність P на валу двигуна при $k_3 = 1,5$ становить
 $P = \frac{P_{н}}{k_3} = \frac{1500}{1,5} = 1000$ Вт.

Визначимо споживану двигуном потужність при $k_3 = 1,5$

$$P_{1,5} = \frac{P}{\eta_{1,5}} = \frac{1000}{0,72727} = 1375 \text{ Вт}$$

та сумарні втрати в двигуні

$$\sum p_{1,5} = P_{1,5} \cdot (1 - \eta_{1,5}) = 1375 \cdot (1 - 0,72727) = 375 \text{ Вт}$$

З них:

•електричні втрати в обмотці статора
 $\Delta P_{1,5} = 0,5 \cdot \sum p_{1,5} = 0,5 \cdot 375 = 187,5$ Вт;

•електричні втрати в обмотці ротора
 $\Delta P_{2,5} = 0,25 \cdot \sum p_{1,5} = 0,25 \cdot 375 = 93,75$ Вт;

•втрати в сталі складають $\Delta P_{3,5} = 0,2 \cdot \sum p_{1,5} = 0,2 \cdot 375 = 75$ Вт.

За виразом (3.10) визначимо середнє перевищення температури обмотки статора $\theta_{1,5}$ двигуна АОМ 32-4 при $k_3 = 1,5$

$$\theta_{1,5} = R_{11}\Delta P_{1,5} + R_{12}\Delta P_{2,5} + R_{13}\Delta P_{3,5} = 0,21 \cdot 187,5 + 0,12 \cdot 93,75 + 0,12 \cdot 75 = 59,74^\circ\text{C}.$$

Нехай коефіцієнт запасу за потужністю приймає значення $k_3 = 1 \dots 3$. Результати дослідження зміни середнього перевищення температури обмотки статора θ_1 двигуна АОМ 32-4 при зміні k_3 за наведеною вище методикою представлено у вигляді графіка на рис. 3.5. та у табличному вигляді у додатку В.

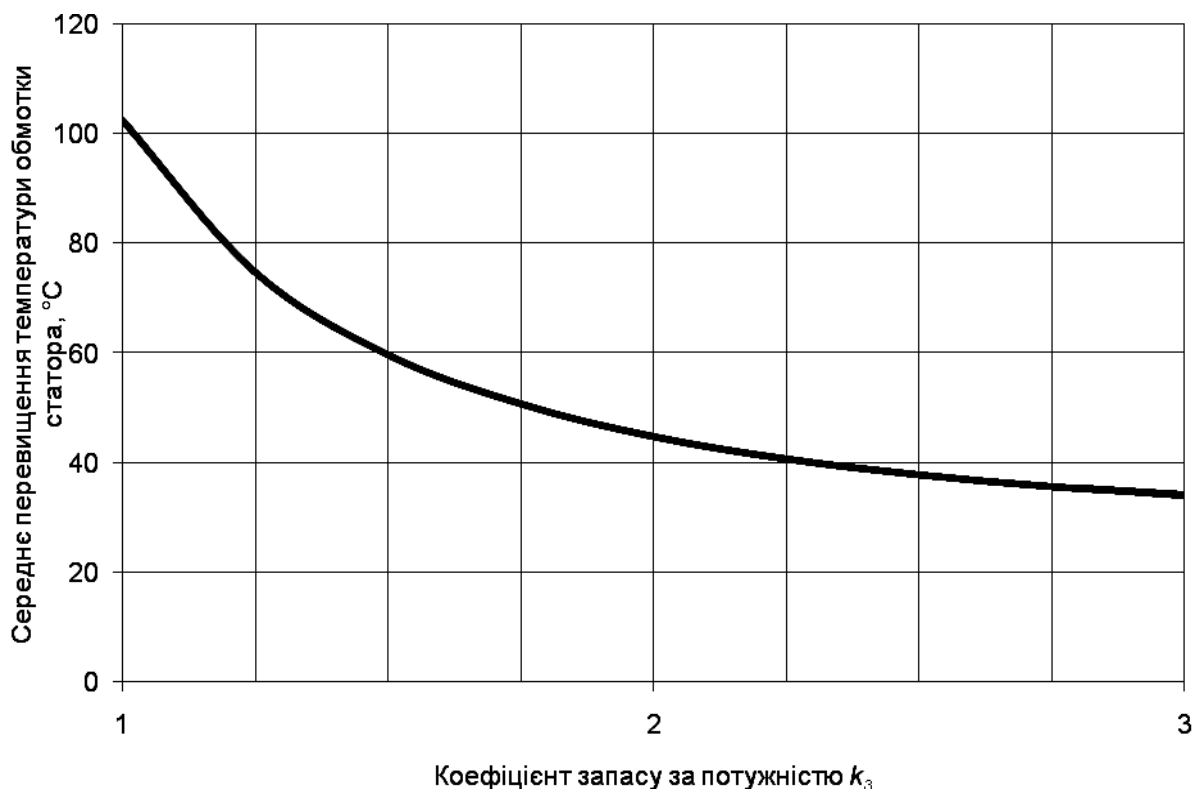


Рис. 3.5. Залежність середнього перегріву обмотки статора θ_1 двигуна АОМ 32-4 від зміни коефіцієнту запасу k_3

Аналогічно знайдемо залежності $\theta_1 = f(k_3)$ для інших допоміжних машин електропоїзда ЕР9М. Результати розрахунків представлено в додатку В, а графіки названих залежностей на рис. 3.6.

З представлених залежностей видно, що збільшення коефіцієнту запасу за потужністю призводить до зменшення перегріву обмоток статора допоміжних машин. Для якісної оцінки впливу запасу за потужністю на перегрів обмотки

статора на рис 3.7 наведено діаграми зниження перегріву обмоток статора допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при збільшенні коефіцієнта запасу за потужністю на проміжку $k_3 = (1,0 \dots 3,0)$.

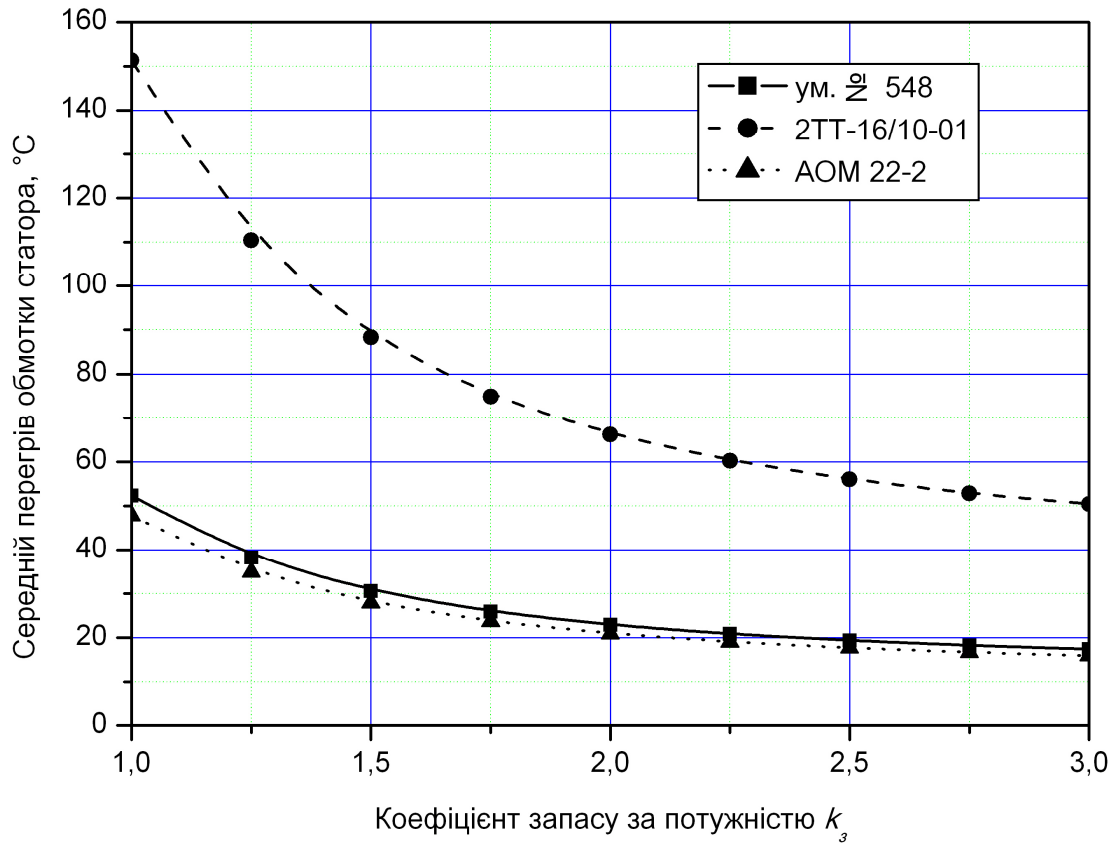


Рис. 3.6. Залежність середнього перегріву обмотки статора θ_1

двигунів ум. № 548, 2ТТ-16/10-01 та АОМ 22-2 від зміни коефіцієнту запасу k_3

Як видно з наведених рисунків, найбільший ефект зниження перегріву обмоток статора допоміжних машин вдається досягти збільшенням коефіцієнту запасу до $k_3 = 1,4$ та дещо меншого при $k_3 = 1,8$; при цьому зниження перегріву обмотки статора в середньому відбувається на 33,5% (при $k_3 = 1,4$) у порівнянні із перегрівом обмотки статора аналогічного двигуна, що працює без запасу за потужністю та на 20,8% (при $k_3 = 1,8$) у порівнянні із аналогічним двигуном, який працює із коефіцієнтом запасу $k_3 = 1,4$.

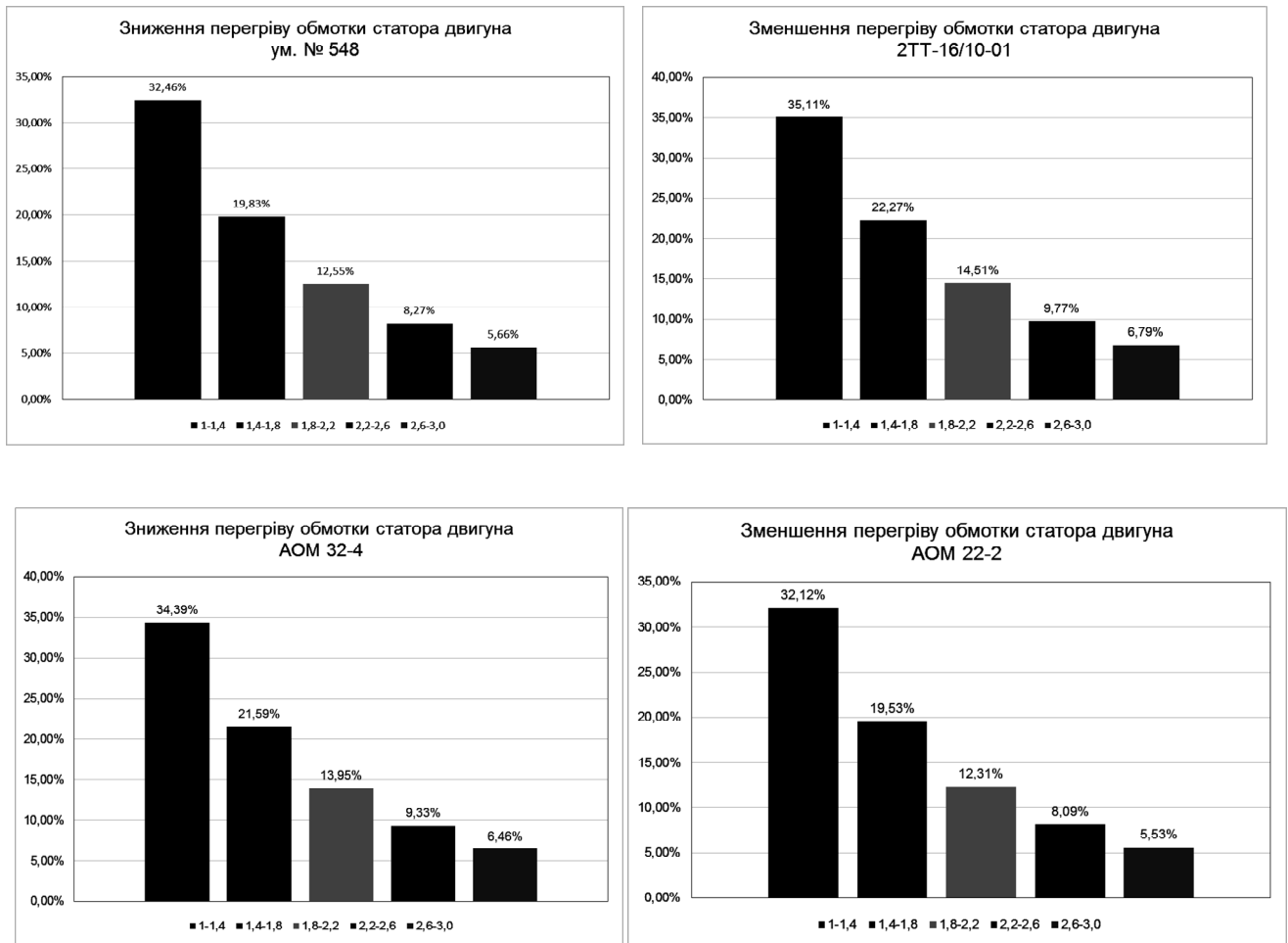


Рис. 3.7. Зниження перегріву обмоток статора допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при зміні коефіцієнта запасу за потужністю

3.4. Математична теплова модель статорних обмоток допоміжних машин електропоїзду змінного струму серії ЕР9М

Як було зазначено в розділі 2, процес нагрівання статорної обмотки асинхронної допоміжної машини можна розглядати як сукупність процесів нагрівання від навантаження та додаткових нагрівів від низької якості живлячої електроенергії – несиметрії трифазної напруги та відхилення напруги від номінального значення.

Перевищення температури обмотки статора асинхронної допоміжної машини, що працює із певним коефіцієнтом навантаження можна визначати, використовуючи метод узагальненої теплової моделі у вигляді виразу (3.10):

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

Підставимо у вираз (3.10) вирази (3.11) і (3.12), отримаємо:

$$\theta_{\text{лст}} = \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \Delta P_1 + 0,6 \cdot \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \Delta P_2 + 0,6 \cdot \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \Delta P_3. \quad (3.15)$$

Раніше було зазначено, що $\Delta P_1 = 0,5 \cdot \sum p$, $\Delta P_2 = 0,25 \cdot \sum p$, $\Delta P_3 = 0,2 \cdot \sum p$.

Підставимо ці вирази у вираз (3.1), тоді

$$\theta_{\text{лст}} = 0,5 \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \sum p + 0,15 \cdot \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \sum p + 0,12 \cdot \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \sum p. \quad (3.16)$$

У виразі (3.16) виконаємо додавання членів в правій частині

$$\theta_{\text{лст}} = 0,77 \cdot \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \sum p. \quad (3.17)$$

Підставимо $P_1 \cdot (1 - \eta)$ замість $\sum p$ у вираз (3.17), тоді

$$\theta_{\text{лст}} = 0,77 \cdot \frac{K}{D_{\text{ал}} l_1} \cdot [P_1 \cdot (1 - \eta)]. \quad (3.18)$$

Оскільки потужність двигунів, що розглядається в даній роботі не перевищує 10 кВт, то коефіцієнт $K = 27 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}}$. Підставимо це значення у вигляді постійної до виразу (3.18), отримаємо:

$$\theta_{\text{лст}} = 0,77 \cdot \frac{27}{D_{\text{ал}} l_1} \cdot [P_1 \cdot (1 - \eta)]. \quad (3.18 \text{ а})$$

Реальне навантаження на валу допоміжної машини спричинить зміну коефіцієнта корисної дії двигуна за виразом (3.14). Тому цим можна врахувати зміну ККД допоміжної машини при виборі коефіцієнту запасу за потужністю. Підставимо його замість η у вираз (3.18 а), отримаємо:

$$\theta_{\text{лст}} = 0,77 \cdot \frac{27}{D_{\text{ал}} l_1} \cdot \left[P_1 \cdot \left(1 - \frac{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}}}{\frac{1}{k_3} \cdot P_{\text{ном}} + P_{\text{в}} + \left(\frac{1}{k_3} \right)^2 \cdot P_{\text{ном}}} \right) \right] \quad (3.19)$$

Вираз (3.19) показує, як залежить перегрів обмотки статора асинхронної допоміжної машини від коефіцієнту запасу за потужністю.

Додатковий нагрів обмотки статора асинхронного двигуна знаходиться в квадратичній залежності від коефіцієнта несиметрії живлячої напруги [1, 9, 15 39].

$$\theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}. \quad (3.20)$$

Відомо, що коефіцієнт несиметрії напруги в системі допоміжних машин K_{2U} змінюється в залежності від електричного навантаження на фазорозщеплювач. І залежність ця різна при різних значеннях однофазної напруги на затискачах фазорозщеплювача, про що було сказано в розділі 2.

Для перерахованих значень характерної напруги на вході фазорозщеплювача: 160 В, 205 В, 220 В, 225 В, 257 В, як показано в розділі 2, запишемо рівняння для визначення коефіцієнта несиметрії у функції електричного навантаження на фазорозщеплювач. Об'єднаємо їх із виразом для визначення додаткового перегріву від несиметрії живлення і отримаємо п'ять підсистем рівнянь для визначення додаткового перегріву обмоток статора при різних сумарних потужностях електричного навантаження на фазорозщеплювач і різних значеннях однофазної напруги живлення АРФ. Нижче наведемо ці системи. Для напруги 160 В:

$$\begin{cases} \theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}; \\ K_{2U} = 5,43282 - 0,80747 \cdot P - 0,08275 \cdot P^2 + 0,06338 \cdot P^3 - \\ - 0,00672 \cdot P^4 + 2,10587 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \end{cases} \quad (3.21)$$

При напрузі 205 В:

$$\begin{cases} \theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}; \\ K_{2U} = 5,35838 - 0,69581 \cdot P - 0,13586 \cdot P^2 + 0,05849 \cdot P^3 - \\ - 0,00548 \cdot P^4 + 1,61093 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \end{cases} \quad (3.22)$$

При напрузі 220 В:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}; \\ K_{2U} = 5,36449 - 0,70606 \cdot P - 0,13127 \cdot P^2 + 0,05882 \cdot P^3 - \\ - 0,00558 \cdot P^4 + 1,64905 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \end{array} \right. \quad (3.23)$$

При напрузі 225 В:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}; \\ K_{2U} = 5,32827 - 0,45606 \cdot P - 0,33919 \cdot P^2 + 0,12041 \cdot P^3 - \\ - 0,014 \cdot P^4 + 7,01625 \cdot 10^{-4} \cdot P^5. \end{array} \right. \quad (3.24)$$

При напрузі 257 В:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}; \\ K_{2U} = 5,27036 - 0,27878 \cdot P - 0,44687 \cdot P^2 + 0,1324 \cdot P^3 - 0,01244 \cdot P^4 + \\ + 8,52646 \cdot 10^{-5} \cdot P^5 + 5,93351 \cdot 10^{-5} \cdot P^6 - 3,7117 \cdot 10^{-6} \cdot P^7 + 7,05952 \cdot 10^{-8} \cdot P^8. \end{array} \right. \quad (3.25)$$

Система рівнянь для визначення температури додаткового перегріву обмоток статора допоміжних машин від несиметрії живлячої напруги з урахуванням реального навантаження на фазорозщеплювач електропоїзда ЕР9М в загальному вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{K_{2U}} = \frac{2 \cdot K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_{\text{лст}}; \\ K_{2U} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 + a_3 \cdot P^3 + a_4 \cdot P^4 + a_5 \cdot P^5 + a_6 \cdot P^6 + a_7 \cdot P^7 + a_8 \cdot P^8. \end{array} \right. \quad (3.26)$$

де $a_0 \dots a_8$ - фіксовані коефіцієнти при змінних потужностях, значення яких подано в табл. 3.4.

В якості електричного навантаження на фазорозщеплювач виступають чотири типи асинхронних двигунів: ум. № 548, 2ТТ-16-10/01, АОМ 32-4, АОМ 22-2. Для цих двигунів в табл. 3.5 наведено ККД, споживана потужність, змінні і постійні втрати в номінальному режимі, коефіцієнт запасу за потужністю, з яким названі двигуни працюють в складі допоміжних агрегатів, а також ККД і споживана потужність, що відповідає режиму реального навантаження.

Коефіцієнти $a_0 \dots a_8$ рівнянь $K_{2U} = f(P)$ 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	$8,53 \cdot 10^{-5}$	$5,93 \cdot 10^{-5}$	$-3,7 \cdot 10^{-6}$	$7,06 \cdot 10^{-8}$

Таблиця 3.5

Енергетичні характеристики допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

Тип двигуна	Номінальна потужність, Вт	Номінальний ККД	Коефіцієнт запасу k_3	ККД при k_3	Споживана номінальна потужність, Вт	Сумарні втрати, Вт	Змінні втрати в номінальному режимі, Вт	Постійні втрати, Вт	Споживана потужність при k_3 , Вт
ум. № 548	5000	0,8	1,6	0,82	6250,00	1250,00	937,50	312,50	6085,94
2ТТ16-10/01	820	0,73	1,58	0,76	1123,29	303,29	227,47	75,82	1083,76
АОМ 32-4	1500	0,7	1,5	0,73	2142,86	642,86	482,14	160,71	2062,50
АОМ22-2	1000	0,81	1,5	0,83	1234,57	234,57	175,93	58,64	1205,25

Кожен із перелічених двигунів може працювати або окремо, або в парі з іншими двигунами [27]. Від їх стану (увімкнено “+”-вимкнено “-”) буде залежати сумарне навантаження на фазорозщеплювач і, як наслідок, коефіцієнт несиметрії живлячої напруги. Нижче, в табл. 3.6, приведено повний перелік можливих унікальних комбінацій стану допоміжних машин електропоїзду ЕР9М.

Як впливає з табл. 3.5, кожна із можливих комбінацій одночасної роботи допоміжних машин створить певне за величиною електричне навантаження на фазорозщеплювач. Вихідна трифазна система напруг при цьому буде по різному не симетричною. Використавши систему рівнянь (3.26), оцінимо можливі

значення коефіцієнта несиметрії K_{2U} при всіх значеннях сумарної потужності електричного навантаження фазорозщеплювача при характерних значеннях напруги (наведено вище) на виході допоміжної обмотки головного трансформатора.

Таблиця 3.6

Можливі комбінації стану допоміжних машин та сумарне електричне навантаження на фазорозщеплювач при цьому

№ комбінації за порядком	ум. № 548		2ТТ16-10/01		АОМ 32-4		АОМ 22-2		Сумарне навантаження, Вт	Примітки
	Кількість	Стан	Кількість	Стан	Кількість	Стан	Кількість	Стан		
1	1	-	1	-	4	-	1	-	0	
2	1	-	1	+	4	-	1	-	1083,76	
3	1	-	1	-	4	-	1	+	1205,25	
4	1	-	1	+	4	-	1	+	2289,01	
5	1	-	1	+	4	-	1	+	2289,01	
6	1	+	1	-	4	-	1	-	6085,94	
7	1	+	1	+	4	-	1	-	7169,70	
8	1	+	1	-	4	-	1	+	7291,18	
9	1	-	1	-	4	+	1	-	8250,00	
10	1	+	1	+	4	-	1	+	8374,95	
11	1	-	1	+	4	+	1	-	9333,76	
12	1	-	1	-	4	+	1	+	9455,25	
13	1	-	1	+	4	+	1	+	10539,01	
14	1	+	1	-	4	+	1	-	14335,94	
15	1	+	1	+	4	+	1	-	15419,70	
16	1	+	1	+	4	+	1	+	16624,95	

В табл. 3.7 наведено значення коефіцієнтів несиметрії живлячої напруги на виході фазорозщеплювача 1РФ-Д5 електропоїзда ЕР9М при характерних значеннях величини однофазної напруги допоміжної обмотки головного трансформатора.

Коефіцієнт несиметрії трифазної напруги на виході фазорозщеплювача

Номер з/п	Сумарне на- вантаження, кВт	Коефіцієнт несиметрії вихідної напруги ФР при однофазній напрузі на вході				
		160 В	205 В	220 В	225 В	257 В
1	0,00	5,43	5,37	5,33	5,31	5,27
2	1,08	4,53	4,51	4,57	4,58	4,59
3	1,21	4,44	4,42	4,47	4,48	4,49
4	2,29	3,74	3,64	3,61	3,59	3,55
5	2,29	3,74	3,64	3,61	3,59	3,55
6	6,09	4,28	3,37	3,21	2,95	2,51
7	7,17	4,98	3,85	3,67	3,32	2,78
8	7,29	5,06	3,91	3,73	3,36	2,81
9	8,25	5,65	4,37	4,19	3,72	3,10
10	8,37	5,71	4,43	4,25	3,76	3,14
11	9,33	6,14	4,81	4,68	4,07	3,41
12	9,46	6,18	4,85	4,74	4,10	3,45
13	10,54	6,40	5,13	5,20	4,36	3,75
14	14,34	7,26	6,21	7,83	5,23	4,82
15	15,42	9,35	7,87	9,61	5,57	5,07
16	16,62	14,46	11,81	12,70	5,67	5,37

Користуючись математичною моделлю теплового стану обмоток статора допоміжних машин для кожного двигуна, визначимо повний перелік можливих коефіцієнтів несиметрії живлячої трифазної напруги. Результати представимо у вигляді табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Вихідні дані по можливим комбінаціям роботи допоміжних машин та відповідні їм коефіцієнти несиметрії напруги

Тип двигуна	Сумарне на- вантаження, Вт	Коефіцієнт несиметрії вихідної напруги ФР при однофазній напрузі на вході				
		160 В	205 В	220 В	225 В	257 В
ум. № 548	6085,94	4,28	3,37	3,21	2,95	2,51
	7169,70	4,98	3,85	3,67	3,32	2,78
	7291,18	5,06	3,91	3,73	3,36	2,81
	8374,95	5,71	4,43	4,25	3,76	3,14
	14335,94	7,26	6,21	7,83	5,23	4,82
	15419,70	9,35	7,87	9,61	5,57	5,07
	16624,95	14,46	11,81	12,70	5,67	5,37
2 ТТ-16/10-01	1083,76	4,53	4,51	4,57	4,58	4,59
	2289,01	3,74	3,64	3,61	3,59	3,55
	2289,01	3,74	3,64	3,61	3,59	3,55
	7169,70	4,98	3,85	3,67	3,32	2,78
	8374,95	5,71	4,43	4,25	3,76	3,14

2 ТТ-16/10-01	9333,76	6,14	4,81	4,68	4,07	3,41
	10539,01	6,40	5,13	5,20	4,36	3,75
	15419,70	9,35	7,87	9,61	5,57	5,07
	16624,95	14,46	11,81	12,70	5,67	5,37
АОМ 32-4	8250,00	5,65	4,37	4,19	3,72	3,10
	9333,76	6,14	4,81	4,68	4,07	3,41
	9455,25	6,18	4,85	4,74	4,10	3,45
	10539,01	6,40	5,13	5,20	4,36	3,75
	14335,94	7,26	6,21	7,83	5,23	4,82
	15419,70	9,35	7,87	9,61	5,57	5,07
	16624,95	14,46	11,81	12,70	5,67	5,37
АОМ 22-2	1205,25	4,44	4,42	4,47	4,48	4,49
	2289,01	3,74	3,64	3,61	3,59	3,55
	2289,01	3,74	3,64	3,61	3,59	3,55
	7291,18	5,06	3,91	3,73	3,36	2,81
	8374,95	5,71	4,43	4,25	3,76	3,14
	9455,25	6,18	4,85	4,74	4,10	3,45
	10539,01	6,40	5,13	5,20	4,36	3,75
	16624,95	14,46	11,81	12,70	5,67	5,37

Представлена система рівнянь являє собою теплову модель допоміжних машин електропоїзда змінного струму.

Початковими умовами для моделі є:

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

3.5. Визначення перегріву обмоток статора допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при реальній експлуатації за допомогою математичної моделі

При аналізі літературних джерел за тематикою дослідження, зокрема робіт [6, 26] було встановлено, що значення величини несиметрії напруги живлення допоміжних машин електропоїздів серії ЕР9М залежить від двох факторів: значення напруги обмотки додаткових кіл головного тягового трансформатора та значення електричного навантаження на фазорозщеплювач. Дослідженню кількісного впливу на значення коефіцієнта несиметрії напруги K_{2U} названих факторів присвячено відповідні пункти розділу 2 роботи (п.2.2). Вищесказане дає

змогу говорити, що коефіцієнт несиметрії напруги на виході фазорозщеплювача – функціональна залежність двох змінних (напруги U та навантаження фазорозщеплювача P_1). А, якщо $K_{2U} = f(U, P_1)$, то для оцінки теплового стану обмотки статора допоміжних машин пропонується ввести поняття режиму роботи. Під поняттям «режиму» в даному контексті розуміємо сукупність таких факторів, як напруга живлення допоміжної машини, сумарне електричне навантаження на фазорозщеплювач від роботи конкретної та інших допоміжних машин в системі та значення коефіцієнта несиметрії, що відповідає цій величині навантаження, як результат функції $K_{2U} = f(U, P_1)$. 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.

Промодельюємо роботу двигуна компресора електропоїзда ЕР9М ум. № 548 при всіх можливих значеннях несиметрії живлячої напруги, найбільш характерних значеннях напруги живлення допоміжних машин та запасі за потужністю двигуна

Двигун компресора ум. № 548 має паспортні характеристики, наведені в табл. 2.1 та енергетичні характеристики, представлені в табл. 3.4. Автором проведено евристичний аналіз можливих режимів роботи двигуна компресора в системі допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, який показав, що найбільш вірогідними режимами є такі, що наведено в табл. 3.8.

За табл. 3.8 для двигуна ум. № 548 при напрузі 160 В вибираємо всі можливі значення навантажень фазорозщеплювача і відповідні ним значення несиметрії і передаємо до математичної моделі. В результаті досліджень отримаємо графічну залежність перегріву обмотки статора двигуна компресора в реальних умовах експлуатації на МВРС, тобто $\theta_1 = f(k_3, K_{2U}, \Delta U)$. На рис. 3.8. зображено залежність $\theta_1 = f(k_3, K_{2U})$ при напрузі 160 В.

Представлена на рис. 3.8. залежність дозволяє визначити сполучення граничних значень коефіцієнту запасу за потужністю та коефіцієнта несиметрії живлячої напруги з точки зору максимального наближення температури обмотки

статора до гранично допустимого значення для свого класу ізоляції. При розрахунках в роботі обрано клас ізоляції обмоток статора допоміжних машин В у відповідності до конструкторської документації на дані двигуни.

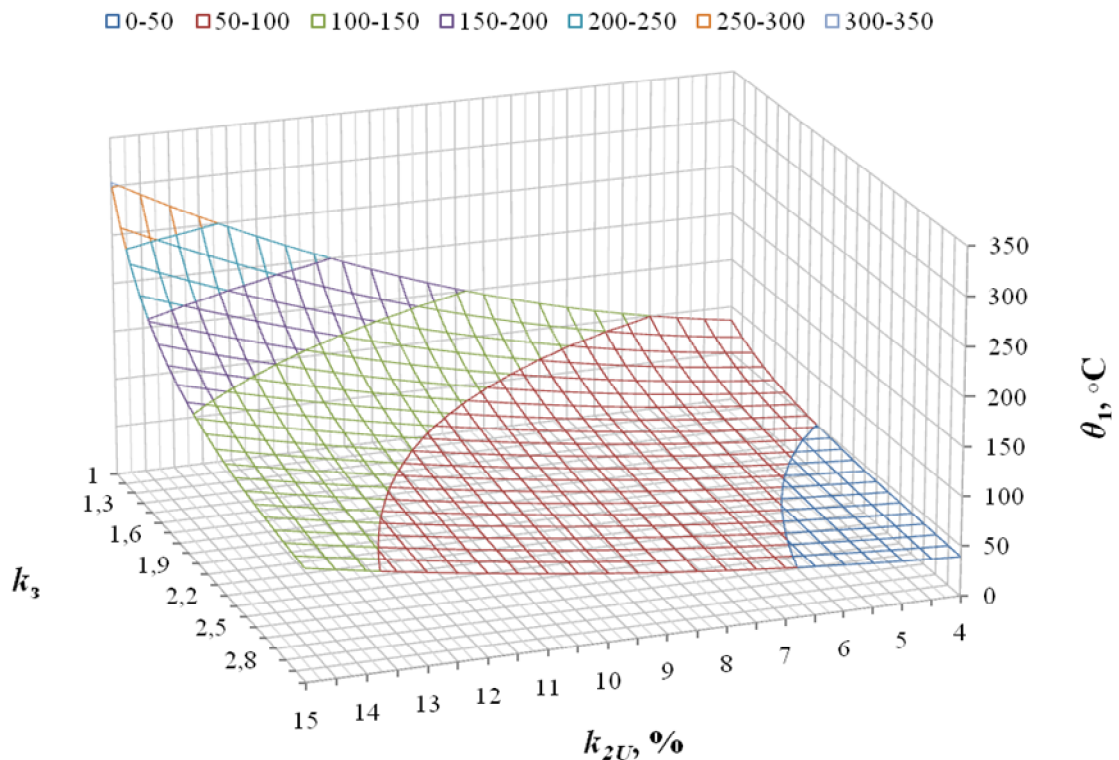


Рис. 3.8. Перегрів обмотки статора двигуна ум. № 548 при напрузі 160 В

На рис. 3.8 на поверхні, що розміщена в просторі, утвореному координатними осями, умовно кольором позначено зони за значеннями температури перегріву обмотки статора. Прийнято наступний алгоритм позначення названих зон. При температурі обмотки в межах 0...100°C зона на графіку позначена блакитним кольором; при температурі в межах 100...150°C – помаранчевим кольором; при температурі понад 150°C – червоним кольором. Робота в тривалому режимі для всіх допоміжних машин дозволяється лише в блакитній зоні.

Аналогічно отримано графіки перегріву обмоток статора для двигуна компресора при інших характерних значеннях напруги живлення та коефіцієнта несиметрії, які приведено на рис. 3.9 – 3.12. Аналіз результатів, отриманих за допомогою математичної моделі, дозволяє визначити функціональну залежність між K_{2U} та k_3 для граничних значень запасу за потужністю і коефіцієнта несиметрії живлячої напруги, при яких обмотки статора не перегріваються понад

гранично допустимі нормовані значення температури. Для двигуна компресора ум. № 548 отримано сімейство кривих для найбільш характерних значень напруги в системі допоміжних машин.

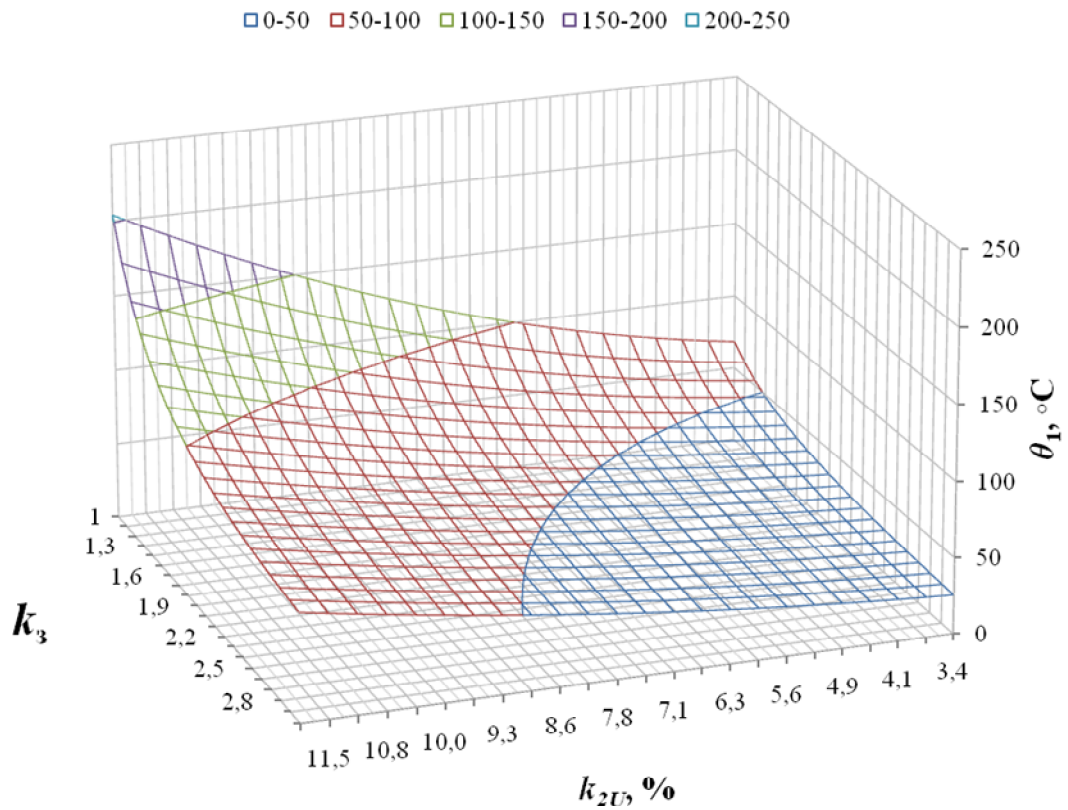


Рис. 3.9. Перегрів обмотки статора двигуна ум. 548 при напрузі 205 В

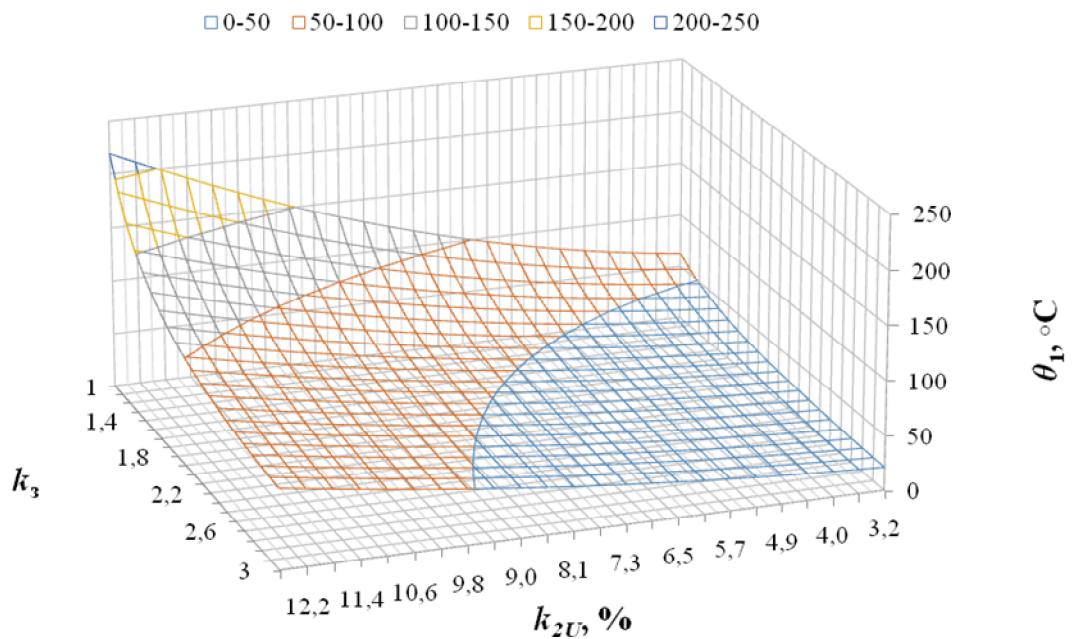


Рис. 3.10. Перегрів обмотки статора двигуна ум. 548 при напрузі 220 В

При виборі ємності конденсаторів симетруючих пристроїв для живлення двигуна компресора ум. № 548 від фазорозщеплювача РФ-1Д.5 можна користуватися графіками, представленими на рис. 3.13. При цьому ємність обирається в залежності від величини гранично значення несиметрії живлячої напруги, яку необхідно знизити. При живленні двигуна ум. № 548 через фазорозщеплювач РФ - 1Д.5 напругою, значення якої становить 225 В та 257 В, як показують проведені дослідження, коефіцієнт несиметрії напруги живлення не перевищує 5,67% (див. табл. 3.7) і перегрів обмотки статора при цьому становить не більше 87,7 °С. В такому режимі роботи допоміжної машини температурний стан обмоток статора не вимагає виконувати додаткове симетрування напруги живлення, а тому графік для визначення граничних сполучень K_{2U} та k_3 побудовано тільки для напруг ряду 160 В, 205 В та 220 В, де робота двигуна компресора із несиметричною живлячою напругою неможлива.

Ідея побудови захисного симетруючого пристрою для захисту допоміжних машин передбачає застосування індивідуальних пристроїв захисту із індивідуально обраними параметрами симетруючих елементів для кожного окремого допоміжного двигуна електропоїзда ЕР9М.

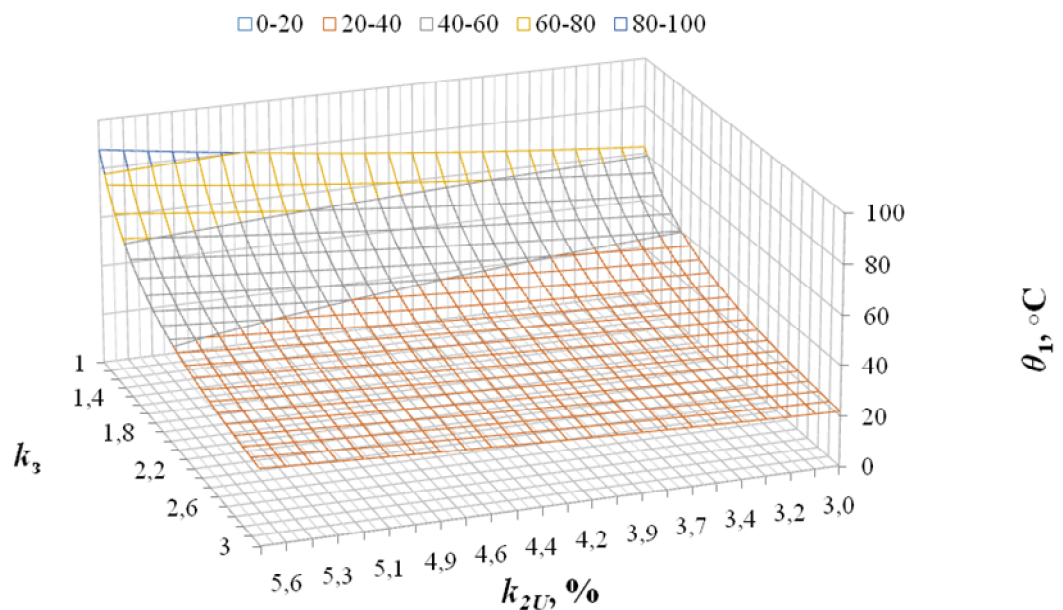


Рис. 3.11. Перегрів обмотки статора двигуна ум. 548 при напрузі 225 В

З цією метою проведено аналогічні дослідження для інших допоміжних машин електропоїзда ЕР9М. Проміжні результати цих досліджень наведено в додатках. Отримано функціональні залежності між граничними значеннями коефіцієнта несиметрії живлячої напруги та запасу за потужністю. Ці графічні залежності представимо на рисунках нижче.

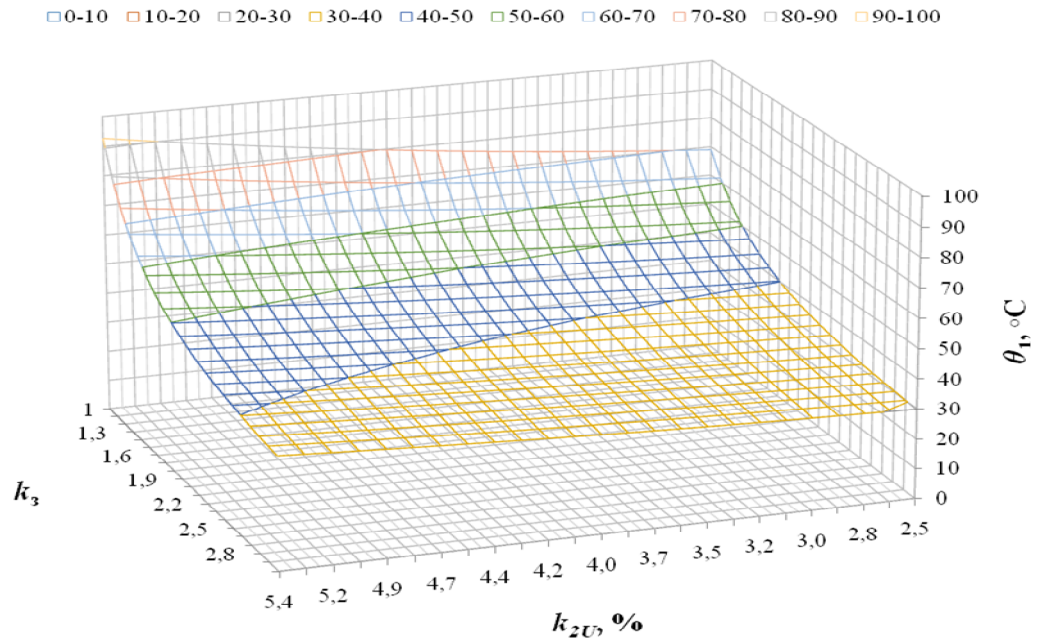


Рис. 3.12. Перегрів обмотки статора двигуна ум. 548 при напрузі 257 В

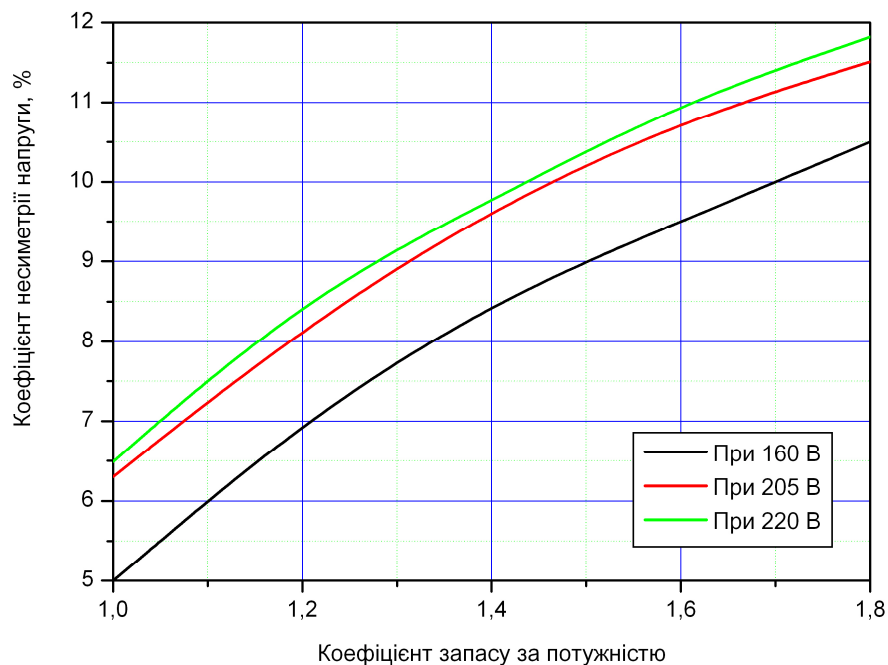


Рис. 3.13. Залежність $K_{2U} = f(k_3)$ для двигуна компресора ум. № 548 при найбільш характерних значеннях напруги живлення

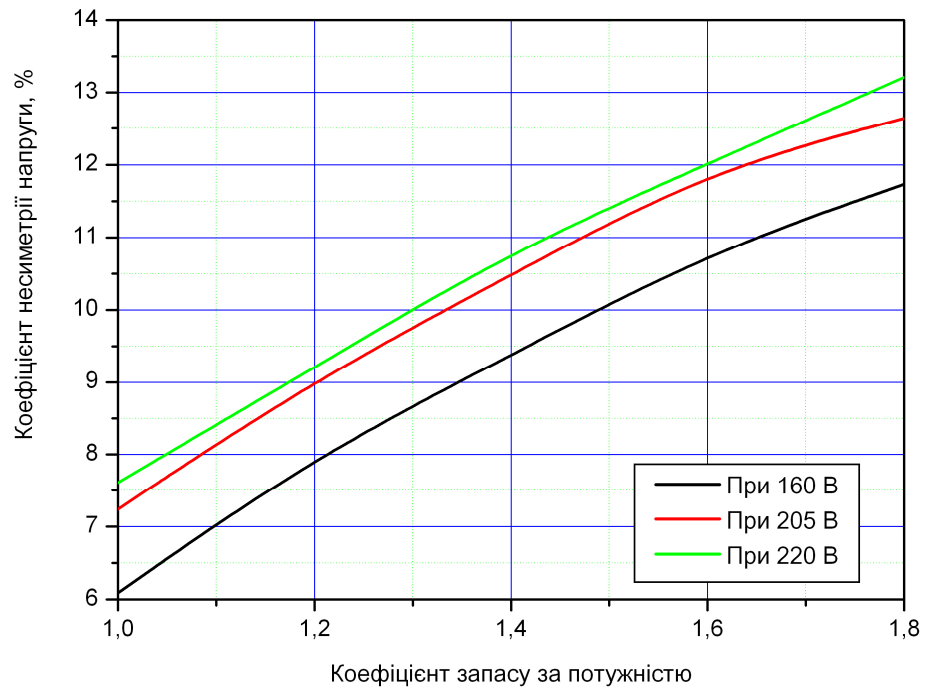


Рис. 3.14. Залежність $K_{2U} = f(k_3)$ для двигуна насоса трансформатора 2 ТТ-16/10-01 при найбільш характерних значеннях напруги живлення

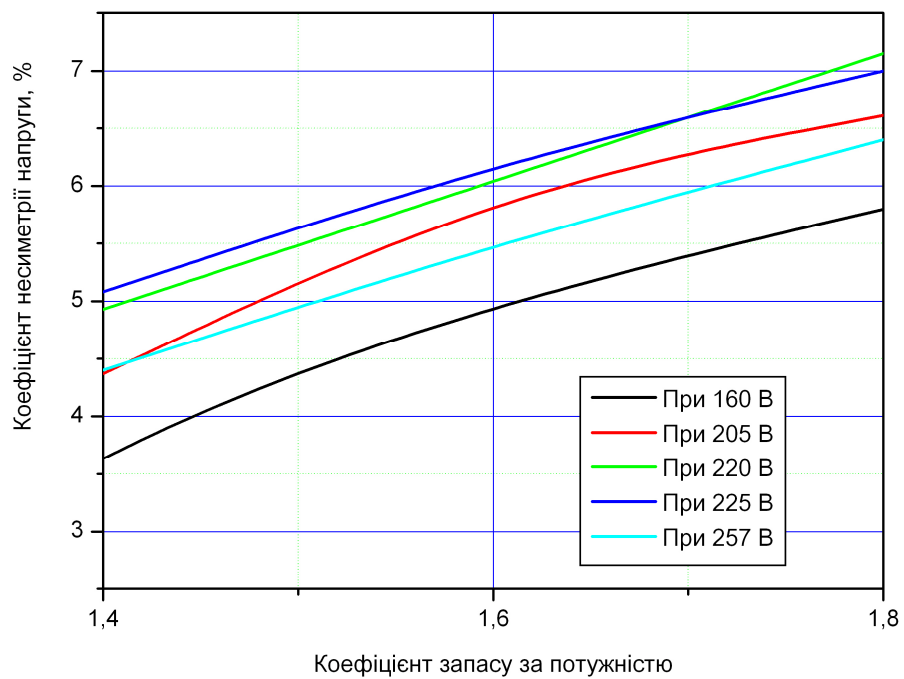


Рис. 3.15. Залежність $K_{2U} = f(k_3)$ для двигуна вентилятора АОМ 32-4 при найбільш характерних значеннях напруги живлення

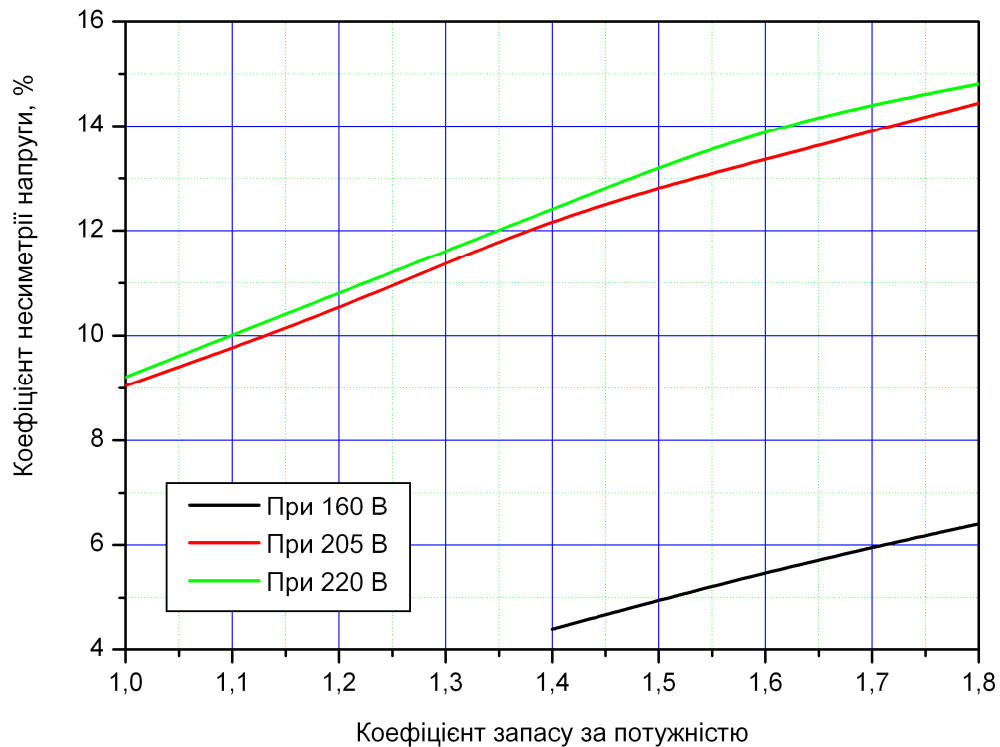


Рис. 3.16. Залежність $K_{2U} = f(k_3)$ для двигуна вентилятора АОМ 22-2 при найбільш характерних значеннях напруги живлення

Вибір граничних значень K_{2U} та k_3 виконується аналогічно до описаного раніше алгоритму вибору граничних значень для двигуна компресора ум. № 548.

3.6. Висновки до третього розділу

1. Встановлено, що всі відомі методики є громіздкими і для виконання аналітичного дослідження вимагають великої кількості додаткової інформації, яка, як правило, є недоступною в експлуатації. Запропоновано застосовувати для визначення середнього перевищення температури допоміжних машин узагальнену теплову модель асинхронного двигуна, яка є більш простою і при цьому дає результати із тією ж самою точністю, що і класичні методи при меншій кількості вихідних даних. Для допоміжних машин електропоїзда ЕР9М розбіжність у величині середнього перевищення температури обмотки статора визначеного за допомогою узагальненої теплової моделі не перевищує 0,5% в порівнянні із класичним методом, рекомендованим І.П. Копиловим.

2. 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 пе-

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 $k_3 = 1,4$.

3. Створена математична теплова модель допоміжних машин електропоїзда змінного струму, яка дозволяє визначити найбільш раціональне сполучення факторів, що впливають на нагрівання їх статорних обмоток - коефіцієнта запасу за потужністю, відхилення напруги та несиметрії живлячої напруги з метою досягнення таких їх значень при реальній експлуатації, при яких статорні обмотки допоміжних машин не будуть перегріватися понад гранично допустимі значення температури для відповідних класів ізоляції.

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

РОЗДІЛ 4

ПРИСТРОЇ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ ДОПОМІЖНИХ МАШИН

4.1 Теоретичні передумови симетрування живлячої напруги та обґрунтування структури симетруючого пристрою для живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

Із практики експлуатації мереж загального користування, енергозабезпечення промислових підприємств [33, 47] відомо, що несиметрію напруг можна обмежити до значення $k_{2U} \leq k_{2U_{\text{доп}}}$ застосовуючи як різні схемні рішення, так і спеціальні симетруючі пристрої [33, 47]. Аналогічні за суттю заходи є прийнятними для застосування на рухомому складі, зокрема на електропоїздах змінного струму ЕР9М. Якщо допустимих значень коефіцієнта несиметрії застосуванням схемних рішень досягти не вдається, необхідний рівень несиметрії забезпечують за допомогою симетруючих пристроїв (СП) [33, 47].

Процес симетрування напруги за допомогою СП полягає в компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності, що обумовлений напругою зворотної послідовності.

В залежності від місця встановлення СП розрізняють індивідуальний, груповий, централізований і комбінований способи симетрування [33, 47]. При цьому індивідуальний спосіб полягає у встановленні СП безпосередньо біля допоміжної машини, при груповому симетруванні в системі допоміжних машин в різних точках приєднання встановлюють декілька СП, кожен із яких симетрує напругу лише частини системи допоміжних машин. При централізованому симетруванні встановлюється лише один СП. Комбінований спосіб поєднує в собі способи симетрування живлячої напруги, описані раніше.

Індивідуальний спосіб симетрування дозволяє знизити несиметрію напруги і струмів безпосередньо на допоміжній машині, але при цьому встановлена по-

тужність СП використовується нераціонально [33, 47]. При централізованому способі симетрування потрібна менша встановлена потужність елементів СП.

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 СП.

Керовані СП можуть мати як неперервне (аналогове) так і ступеневе (дискретне) керування.

Для симетрування системи лінійних напруг широкого застосування набули батареї конденсаторів із неоднаковими потужностями фаз. Так, зображені на рис. 4.1 конденсатори мають неоднакову реактивну потужність, тобто $Q_{C_{AB}} \neq Q_{C_{BC}} \neq Q_{C_{AC}}$.

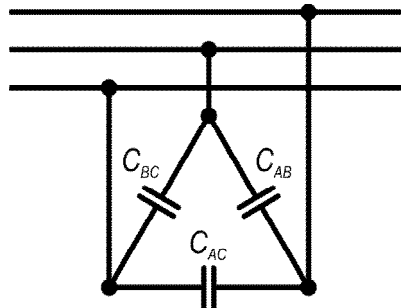


Рис. 4.1. Схема симетрування системи напруги із застосуванням батарей конденсаторів

В керованих дискретних СП батареї конденсаторів (БК) утворюються із декількох груп, з яких одна підключена постійно, а інші під'єднуються по мірі необхідності. Комутація груп БК здійснюється контакторами, або тиристорними ключами.

На рис. 4.2. наведено загальний вигляд принципової схеми пропонованого автором пристрою для симетрування системи лінійних напруг в колах живлення допоміжних машин електропоїзда серії EP9M [63].

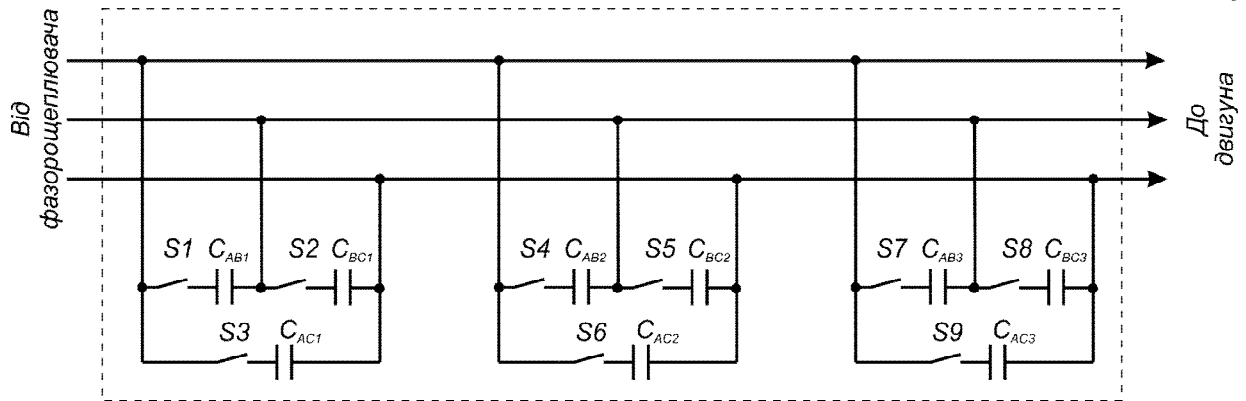


Рис. 4.2. Принципова схема силової частини пристрою для симетрування напруги живлення допоміжних машин електропоїзда EP9M

Симетрування напруги в даному пристрої виконується за допомогою під'єднання батарей 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.

4.2. Вибір потужності ємнісного СП для симетрування живлячої напруги допоміжних машин електропоїзда EP9M

Сумарна потужність ємнісного СП обирається за умови компенсації реактивної потужності. Вона перерозподіляється по фазам СП (див. рис. 4.1) таким чи-

ном, щоб струм зворотної послідовності несиметричної БК компенсував струм зворотної послідовності симетричного навантаження, який обумовлено дією несиметричної вихідної системи напруг асинхронного розщеплювача фаз.

Потужність БК визначається в залежності від аргумента φ_2 вектора струму зворотної послідовності I_2 [33, 34, 47].

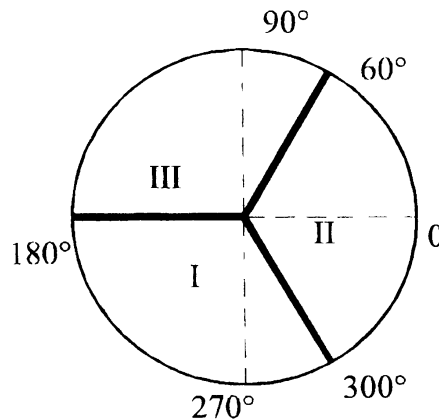


Рис. 4.3. Діаграма розподілу аргумента φ_2 струму зворотної послідовності $I_{2\Sigma}$

На рис. 4.3. пронумеровано зони в яких аргумент φ_2 набуває певного значення. Таким чином:

Зона I: $180^\circ \leq \varphi_2 \leq 300^\circ$.

Зона II: $300^\circ \leq \varphi_2 \leq 60^\circ$.

Зона III: $60^\circ \leq \varphi_2 \leq 180^\circ$.

В загальному випадку для визначення реактивної потужності БК використаємо наступну систему рівнянь [34]:

$$\begin{cases} Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_2 \cdot (\sqrt{3} \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2), & \text{при } \varphi_2 \in I; \\ Q = 2\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, & \text{при } \varphi_2 \in II; \\ Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_2 \cdot (\sqrt{3} \cdot \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2), & \text{при } \varphi_2 \in III. \end{cases}$$

При цьому струм зворотної послідовності для асинхронної допоміжної машини [58]:

$$I_2 = k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}}, \quad (4.1)$$

де k_I - кратність початкового пускового струму – відношення сталого струму в обмотці електродвигуна при нерухомому роторі, номінальній підведеній напрузі і номінальній його частоті;

$I_{\text{ном}}$ - номінальний струм статорної обмотки асинхронного двигуна.

Асинхронна допоміжна машина являє собою активно-індуктивне навантаження, при цьому $\cos \varphi_2 = 0,7 \dots 0,9$, що відповідає II зоні, тому сумарна потужність БК при умові повної компенсації реактивної потужності пропонується визначати за виразом:

$$Q = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2. \quad (4.2)$$

Замість I_2 у вираз (4.2) підставимо вираз (4.1), отримаємо

$$Q = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2. \quad (4.3)$$

Реактивна потужність конденсатора пропорційна його ємності і номінальній напрузі на його обкладках, тобто:

$$Q = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2. \quad (4.4)$$

Ліві частини виразів (4.3) та (4.4) рівні, прирівняємо праві частини виразів отримаємо:

$$2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2. \quad (4.5)$$

Із виразу (4.5) знайдемо ємність БК для повного симетрування напруги живлення допоміжних машин. Після всіх необхідних перетворень і спрощень отримаємо:

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot f \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (4.6)$$

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.

Для асинхронних двигунів справедливий вираз [22]

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (4.7)$$

де m_1 - кількість фаз обмотки статора, для трифазних двигунів $m_1 = 3$. Тому запишемо

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (4.8)$$

В номінальному режимі роботи вираз (4.8) набуде вигляду:

$$P_{\text{ном}} = 3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}. \quad (4.9)$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна [22]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.10)$$

В номінальному режимі споживана двигуном потужність становить

$$P_{\text{ном}} = \frac{P_2}{\eta_{\text{ном}}}. \quad (4.11)$$

Підставимо праву частину виразу (4.11) замість лівої частини виразу (4.9), отримаємо:

$$\frac{P_2}{\eta_{\text{ном}}} = 3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}. \quad (4.12)$$

Із рівняння (4.12) виразимо номінальний струм статора $I_{\text{ном}}$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_2}{3 \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ном}}}{3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (4.13)$$

Підставимо вираз (4.13) замість $I_{\text{ном}}$ до виразу (4.6), отримаємо:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\sqrt{3} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot \frac{P_2}{3 \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot f \cdot U_{\text{ном}}} = \\ &= \frac{k_{2U} \cdot k_I \cdot P_2 \cdot \cos \varphi_2}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot f \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}}^2 \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Якщо прийняти в першому наближенні у виразі (4.14) $\eta_{\text{ном}} = 0,75$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ і частоту живлячої мережі $f = 50$ Гц. При прямому пуску асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором кратність пускового струму $k_I = 4 \dots 7$ [22] в залежності від умов пуску. Приймаємо важкі умови пуску для допоміжних машин, відповідно $k_I = 7$.

З урахуванням вищенаведеного після відповідних перетворень і спрощень вирази (4.14), (4.14а) і (4.14б) матимуть вигляд:

$$C = 0,043 \cdot \frac{k_{2U} \cdot P_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (4.15)$$

Рівняння (4.15) являє собою наближені залежності $C = f(k_{2U}, P_2)$ для симетрування системи лінійних напруг живлення допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії ЕР9М.

Використовуючи вираз (4.15), побудуємо графік орієнтовної залежності величини ємності батареї симетруючих конденсаторів при змінній потужності допоміжної машини і коефіцієнті несиметрії живлячої напруги. Для цього приймаємо, що потужність P_2 змінюється в межах $P_2 = 0 \dots 6$ кВт, а коефіцієнт несиметрії $0 \leq k_{2U} \leq 0,2$. Отримані результати представлено у вигляді графіка на рис. 4.3.

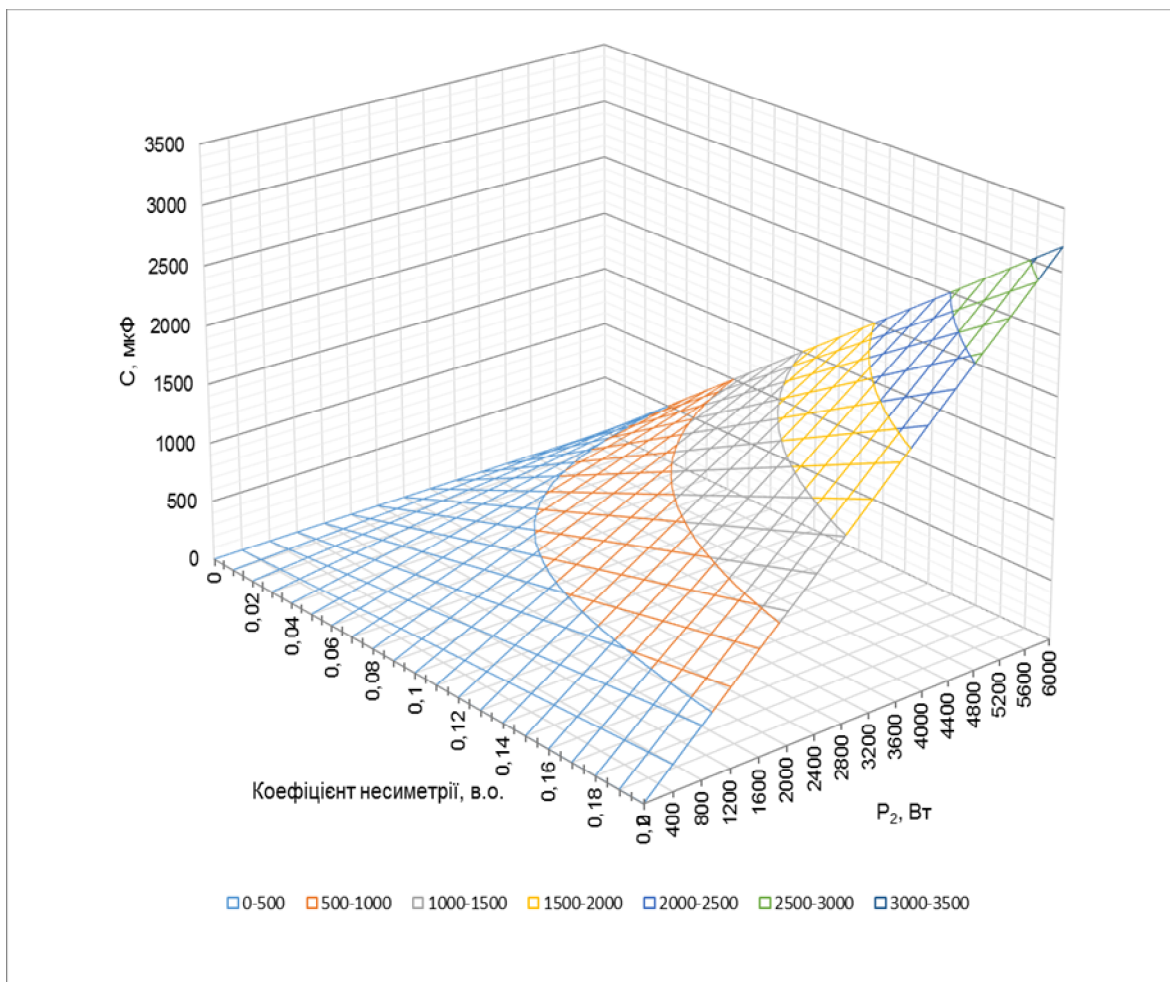


Рис. 4.3. Орієнтовна залежність $C = f(k_{2U}, P_2)$ БК СП в системі живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

За допомогою графіка на рис. 4.3 можна визначити орієнтовне значення сумарної ємності БК в СП для кожної допоміжної машини. Значення необхідної ємності лежить на поверхні графіка в точці, координати якої відповідають номінальній потужності допоміжної машини і гранично допустимому значенню несиметрії живлячої напруги за умов нормальної температури обмотки статора.

Для точного визначення ємності БК для симетрування лінійних напруг допоміжних машин необхідно враховувати реальний ккд та коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ допоміжної машини, тому для цього потрібно використовувати вираз (4.14).

Підставивши до виразу необхідні значення для кожного двигуна, отримаємо сукупність значень ємності БК СП для виконання повного симетрування системи лінійних напруг при зміні величини несиметрії від 2 до 16 %.

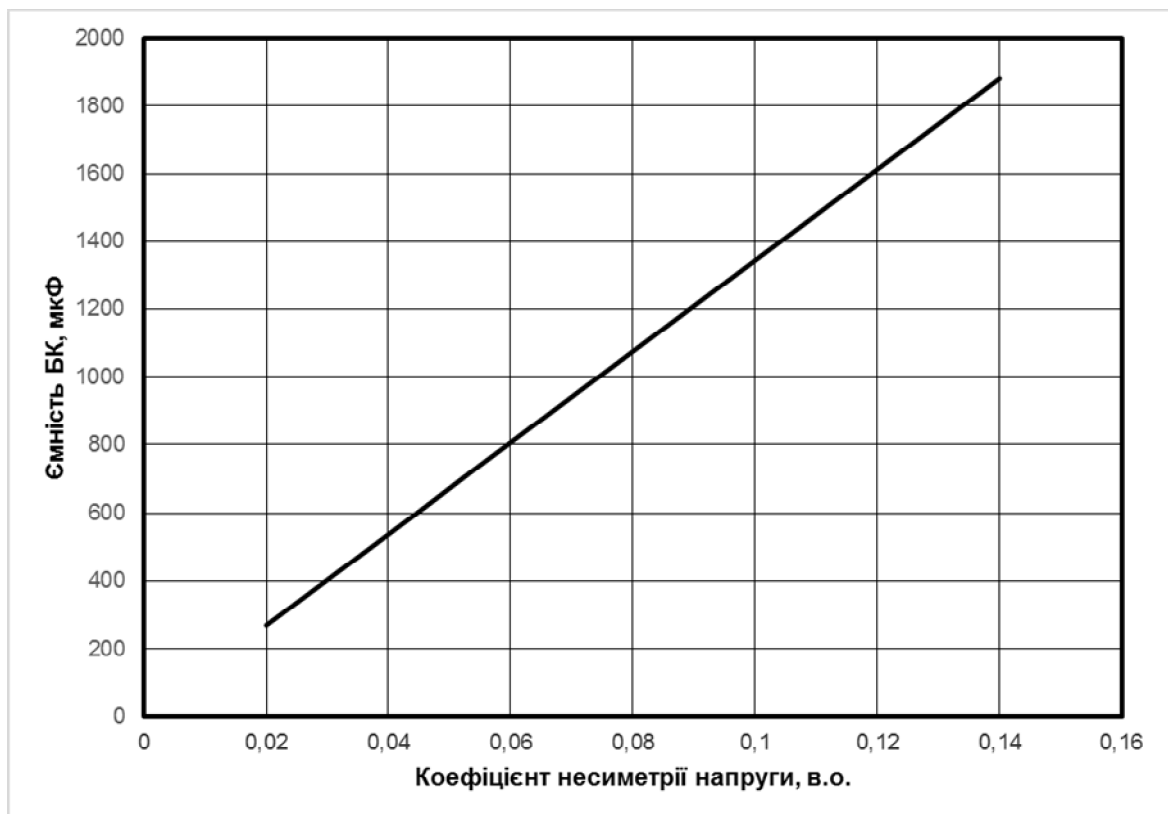


Рис. 4.4. Графік залежності ємності БК СП для двигуна ум. № 548 при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги

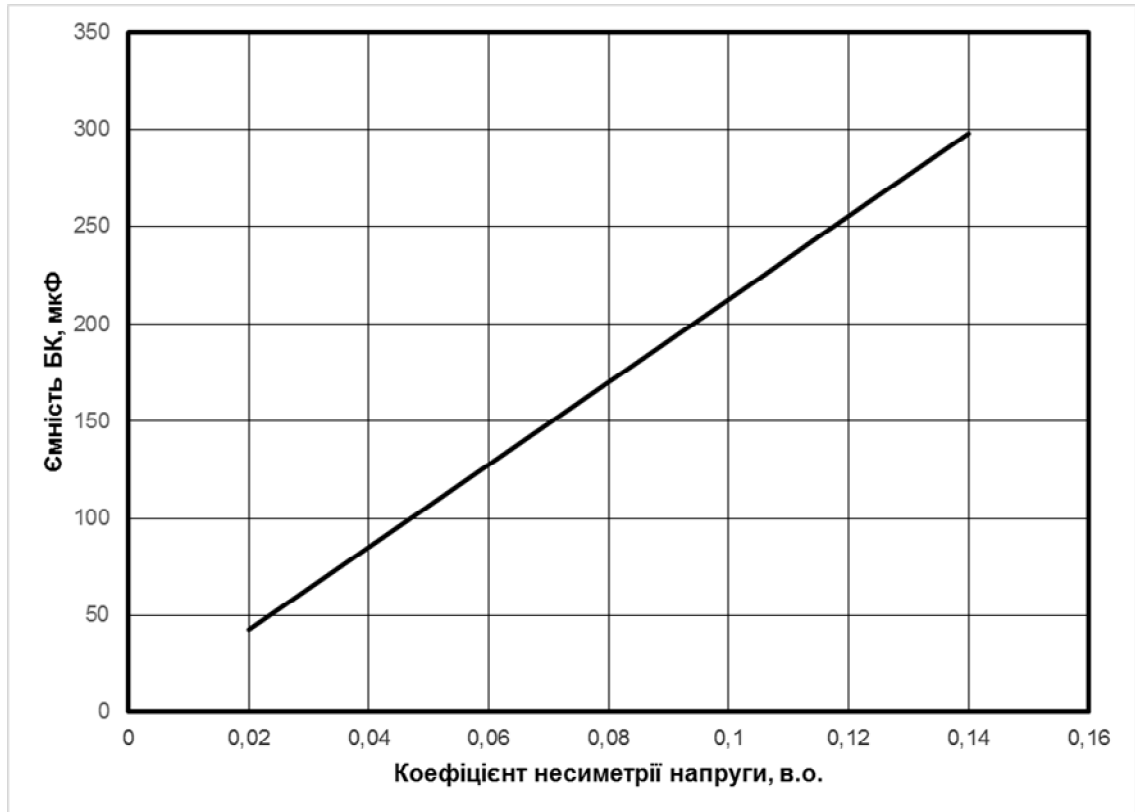


Рис. 4.5. Графік залежності ємності БК СП для двигуна насоса трансформатора 2ТТ-16-10/01 при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги

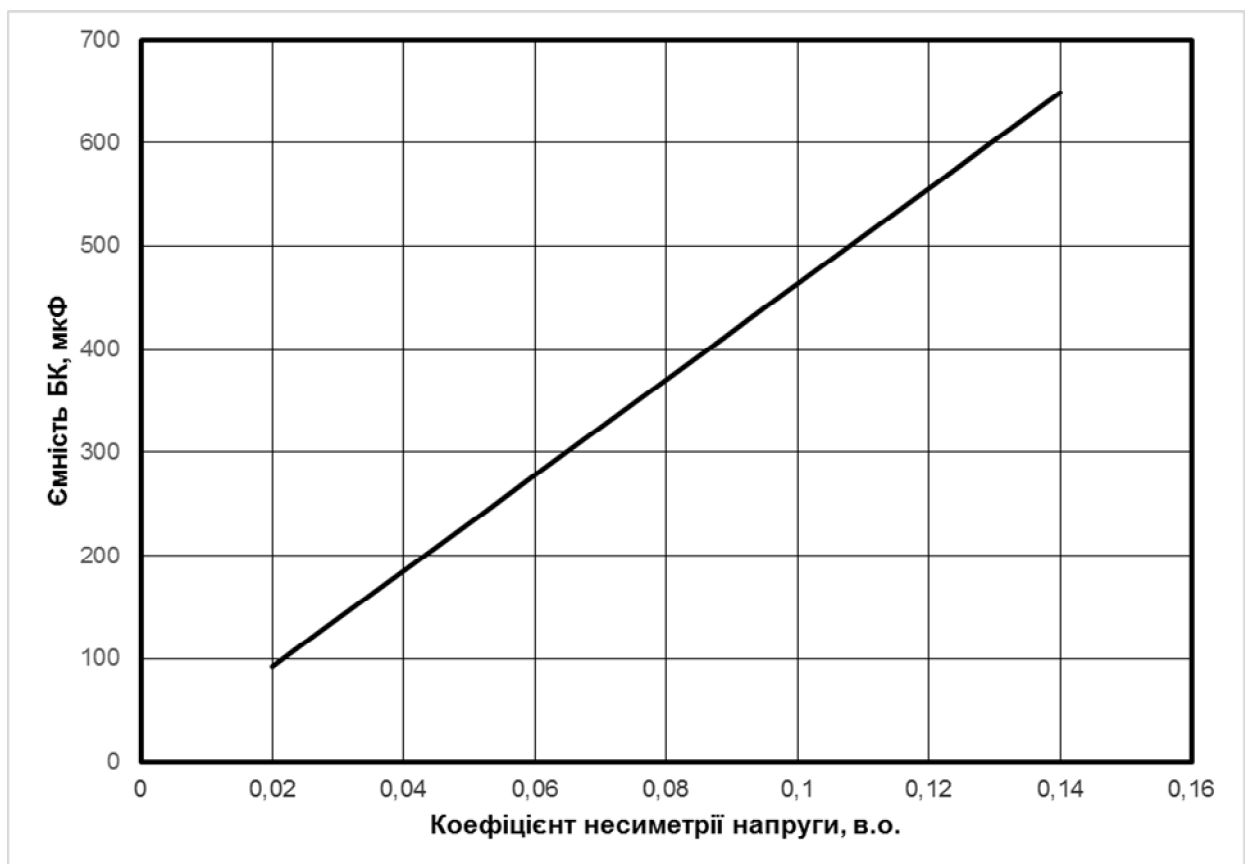


Рис. 4.6. Графік залежності ємності БК СП для двигуна вентилятора АОМ 32-4 при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги

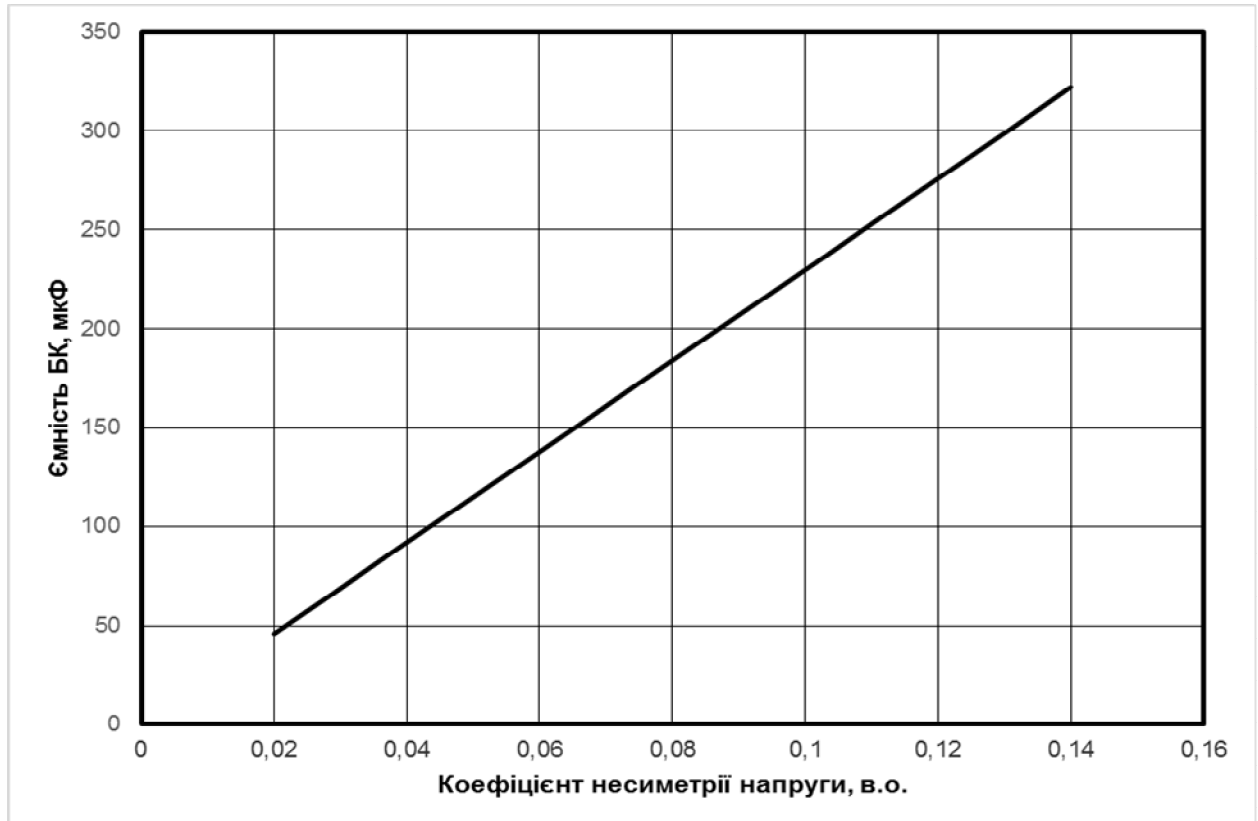


Рис. 4.7. Графік залежності ємності БК СП для двигуна вентилятора АОМ 32-4 при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги

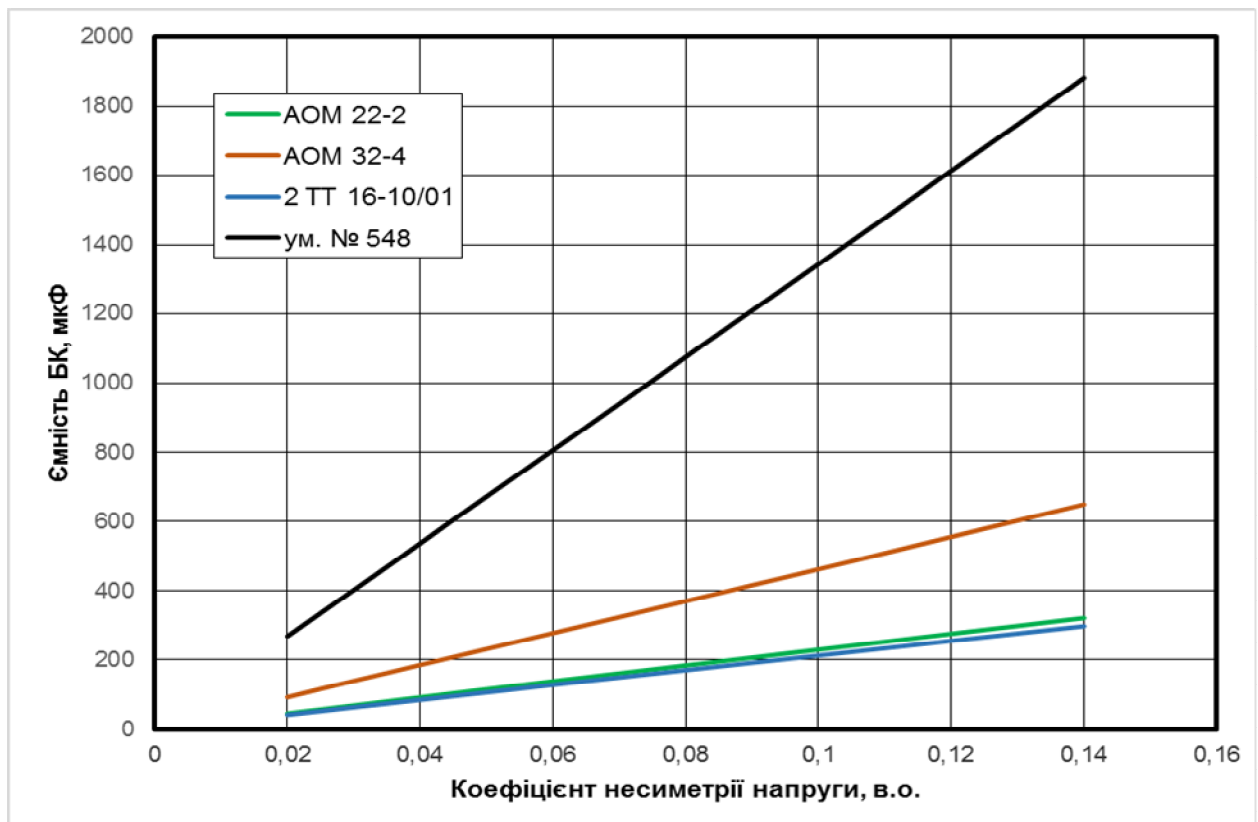


Рис. 4.8. Графік залежності ємності БК СП для основних допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при зміні коефіцієнта несиметрії живлячої напруги

При неможливості повного симетрування системи лінійних напруг через її недоцільність, викликану великою ємністю БК, а відповідно і значними габаритами СП можна вжити заходів щодо часткового симетрування. При цьому реактивна потужність ємнісної БК, необхідної для часткового симетрування дорівнює [34]

$$Q_{\text{частк}} = Q \left(1 - \frac{k_{2U_{\text{доп}}}}{k_{2U_{\text{ф}}}} \right), \quad (4.16)$$

де $k_{2U_{\text{доп}}}$ - гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги для допоміжної машини за умовами нагрівання її обмотки статора;

$k_{2U_{\text{ф}}}$ - фактичне значення коефіцієнта несиметрії напруги на затискачах допоміжної машини.

4.3. Синтез структури та принцип дії пристрою теплового захисту асинхронних допоміжних машин електропоїздів серії EP9M

Тепловий захист від перевантаження захищає двигун від недопустимого перегріву, зокрема при порівняно невеликих за величиною але значних за тривалістю теплових перевантаженнях [37]. Апарати захисту від перевантаження, якими в колах живлення допоміжних машин електропоїздів серії EP9M виступають теплові реле типу ТРТП, при виникненні перевантаження відключають двигун із певною витримкою часу, тим більшою, чим менше перевантаження, а в ряді випадків миттєво – якщо перевантаження значне за величиною.

Однією із основних гіпотез стосовно причин передчасного виходу із ладу допоміжних машин електропоїздів по причині теплового пробою ізоляції є невідповідність параметрів захисних пристроїв умовам реальної експлуатації.

4.3.1. Теоретичні передумови роботи запропонованого пристрою теплового захисту асинхронних допоміжних машин

Для узгодження характеристик об'єкта, що захищається, і теплового реле будується часострумова характеристика об'єкта і аналогічна характеристика

біметалічного елементу. При правильному виборі реле його характеристика в ненагрітому стані повинна проходити поруч із характеристикою об'єкта захисту [79].

На рис. 4.9 зображено захисну характеристику об'єкта, як криву допустимої тривалості перевантаження за умовами нормального нагріву 1; часострумову характеристику біметалічного елементу в нагрітому 2 та холодному стані 3.

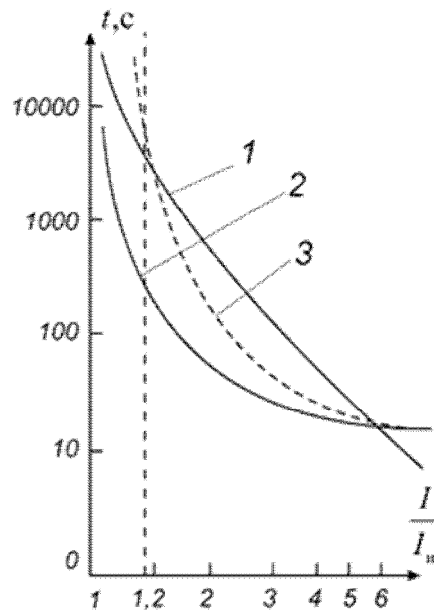


Рис. 4.9. Часострумові характеристики біметалічного елемента та об'єкту захисту [79]

Для досконалого захисту потрібно, щоб постійна часу нагрівання теплового реле була такою ж як постійна часу двигуна. Це можна отримати лише в разі, коли для кожного конкретного двигуна буде створено своє теплове реле. Так як одне й те саме теплове реле застосовується для двигунів різної потужності не залежно від класу ізоляції, то у зоні малих перевантажень неможливо отримати надійний захист [79].

Для оцінки здатності теплового реле захистити двигун під час перевантаження при пуску визначено часострумову характеристику допоміжної машини електропоїзда ЕР9М. За основу аналітичного виразу взято відоме рівняння нагрівання обмотки електричної машини [12, 22, 73].

$$\Delta P dt = \alpha F \tau dt + c G d\tau, \quad (4.17)$$

де ΔP - втрати, що виділяються в обмотці, Вт;

α - коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{град}}$;

c - питома теплоємність тіла, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$;

G - вага обмотки двигуна, кг;

F - поверхня тіла, см^2 ;

$\Delta P dt$ - енергія електричних втрат, що виділяється за термін часу dt ;

$\alpha F \tau dt$ - теплова енергія, відведена через поверхню тіла;

$c G d\tau$ - теплова енергія, яка витрачається на перевищення температури тіла, що має відповідну вагу.

ΔP , α , c вважаємо такими, що не залежать від температури обмотки і її перевищення τ над температурою навколишнього середовища θ_0 [73].

При короткочасних перевантаженнях можна знехтувати тепловіддачею, якщо час навантаження $t \ll T$, де T - стала часу нагрівання обмотки статора. Припустимо, що двигун до перевантаження працював з навантаженням $P_{\text{поч}}$ при втратах в обмотках $\Delta P_{\text{поч}}$. При усталеному режимі перевищення температури обмотки, яке відповідає втратам $\Delta P_{\text{поч}}$, дорівнює $\tau_{\text{поч}}$. Усе тепло, зумовлене втратами в обмотці $\Delta P_{\text{поч}}$, відводиться у навколишнє середовище. У момент часу, коли збільшується навантаження на двигун, струм в обмотці збільшується і в результаті втрати потужності в обмотці зростають до значення ΔP . При цьому додаткове підвищення температури буде визначатися не усіма втратами ΔP , а різницею втрат $\Delta P - \Delta P_{\text{поч}}$. Ця різниця втрат потужності викличе збільшення температури за час t на величину

$$\Delta \tau = \tau - \tau_{\text{поч}} = \frac{(\Delta P - \Delta P_{\text{поч}})t}{cG}. \quad (4.18)$$

Звідки перевищення температури обмоток для часу t (від початку перевантаження)

$$\tau = \tau_{\text{поч}} + \frac{(\Delta P - \Delta P_{\text{поч}})t}{cG}. \quad (4.19)$$

Для номінального навантаження [79] маємо:

$$cG = T \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{\tau_{\text{ном}}}. \quad (4.20)$$

Підставивши (4.20) у (4.19) і приймаючи втрати в обмотках та перевищення температури обмоток пропорційними квадрату струму, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{поч}} &= \Delta P_{\text{ном}} \frac{I_{\text{поч}}^2}{I_{\text{ном}}^2} = \Delta P_{\text{ном}} k_{\text{поч}}^2; \\ \Delta P &= \Delta P_{\text{ном}} \frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2} = \Delta P_{\text{ном}} k^2; \\ \tau_{\text{поч}} &= \tau_{\text{ном}} \frac{I_{\text{поч}}^2}{I_{\text{ном}}^2} = \tau_{\text{ном}} k_{\text{поч}}^2. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Так як до перевантаження прийнято усталений тепловий режим, із (4.19) отримаємо відносно перевищення температури за термін часу t :

$$\frac{\tau}{\tau_{\text{поч}}} = k_{\text{поч}}^2 + \frac{t}{T} (k^2 - k_{\text{поч}}^2) \quad (4.22)$$

і за термін часу дії перевантаження $t_{\text{пер}}$

$$\frac{\tau_{\text{пер}}}{\tau_{\text{ном}}} = k_{\text{поч}}^2 + \frac{t_{\text{пер}}}{T} (k^2 - k_{\text{поч}}^2). \quad (4.23)$$

А для випадку попередньої роботи з номінальним струмом ($k_{\text{поч}} = 1$)

$$\frac{\tau_{\text{пер}}}{\tau_{\text{ном}}} = 1 + \frac{t_{\text{пер}}}{T} (k^2 - 1), \quad (4.24)$$

Або

$$\tau_{\text{пер}} - \tau_{\text{ном}} = \Delta \tau_{\text{пер}} = \frac{\tau_{\text{ном}} (k^2 - 1) t_{\text{пер}}}{T}. \quad (4.25)$$

Стала часу для мідної обмотки дорівнює [79]:

$$T = \frac{150}{k_R} \cdot \frac{\tau_{\text{ном}}}{j_{\text{S ном}}^2}, \quad (4.26)$$

де k_R - коефіцієнт, який враховує явище витіснення струму в обмотці;

$j_{\text{S ном}}$ - номінальна густина струму, $\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$.

Пази обмотки статора допоміжних двигунів електропоїздів змінного струму не є глибокими. Тому явищем витіснення струму можна знехтувати, тобто прийняти $k_R = 1$. Тому,

$$T = 150 \frac{\tau_{\text{ном}}}{j_{S \text{ ном}}^2}, \quad (4.27)$$

де відповідно до [46],

$$j_{S \text{ ном}} = \frac{I_{\text{ном}} \phi}{a \cdot q}, \quad (4.28)$$

де q - переріз проводу обмотки, мм^2 ;

a - кількість паралельних гілок обмотки статора, для допоміжних машин електропоїзда ЕР9М $a = 1$.

Із (4.22) допустима тривалість перевантаження $t_{\text{доп}}$ при заданному значенні допустимого перевищення температури $\tau_{\text{доп}}$ дорівнює

$$t_{\text{доп}} = T \frac{\frac{\tau_{\text{доп}}}{k^2} - k_{\text{поч}}^2}{k^2 - k_{\text{поч}}^2}. \quad (4.29)$$

І при $k_{\text{поч}} = 1$

$$t_{\text{доп}} = T \frac{\frac{\tau_{\text{доп}}}{k^2} - 1}{k^2 - 1} = T \frac{\Delta \tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{ном}} (k^2 - 1)}, \quad (4.30)$$

де $\tau_{\text{доп}} - \tau_{\text{ном}} = \Delta \tau_{\text{доп}}$ - допустиме додаткове перевищення температури при перевантаженні. Підставивши у рівняння (4.23) та (4.29) значення для сталої часу із (4.30), отримаємо:

$$\frac{\tau_{\text{пер}}}{\tau_{\text{ном}}} = k_{\text{поч}}^2 + \frac{j_{S \text{ ном}}^2}{150 \tau_{\text{ном}}} (k^2 - k_{\text{поч}}^2) t_{\text{пер}}, \quad (4.31)$$

$$t_{\text{доп}} = \frac{150 \tau_{\text{ном}}}{j_{S \text{ ном}}^2} \cdot \frac{\frac{\tau_{\text{доп}}}{k^2} - k_{\text{поч}}^2}{k^2 - k_{\text{поч}}^2}. \quad (4.32)$$

Якщо двигун до перевантаження працював з номінальним навантаженням, то $k_{\text{поч}} = 1$ і для цього випадку перевищення температури (при заданих k та $t_{\text{пер}}$)

$$\tau_{\text{пер}} = \tau_{\text{ном}} + \frac{j_{\text{S ном}}^2 (k^2 - 1) t_{\text{пер}}}{150}, \quad (4.33)$$

і допустима тривалість перевантаження (при заданому $\tau_{\text{пер}}$)

$$t_{\text{пер}} = \frac{150(\tau_{\text{пер}} - \tau_{\text{ном}})}{j_{\text{S ном}}^2 (k^2 - 1)} = \frac{150\Delta\tau_{\text{пер}}}{j_{\text{S ном}}^2 (k^2 - 1)}. \quad (4.34)$$

Формула (4.32) дає змогу знайти $t_{\text{доп}} = f(k)$ при заданому $\Delta\tau_{\text{доп}}$ у загальному випадку, а формула (4.34) дає змогу знайти $t_{\text{доп}} = f(k)$ при заданому $\Delta\tau_{\text{доп}}$, якщо двигун до перевантаження працював з номінальним навантаженням.

Захист допоміжних машин з допомогою теплових реле, що наразі використовується на електропоїздах серії ЕР9М 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 (4.32) знайти залежність $t_{\text{доп}} = f(k)$ при різних значеннях $\Delta\tau_{\text{доп}}$ під час пуску ($k_{\text{поч}} = 0$), та при роботі двигуна із певним навантаженням ($k_{\text{поч}} \neq 0$). Тоді:

$$t_{\text{доп}} = \frac{150\tau_{\text{ном}}}{j_{\text{S ном}}^2} \cdot \frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{ном}} \cdot k^2} = \frac{150\tau_{\text{доп}}}{j_{\text{S ном}}^2 k^2}. \quad (4.35)$$

Використовуючи вираз (4.35), побудовано характеристику $t_{\text{доп}} = f(k)$ при пуску для двигуна АИР-80В4 ця характеристика наведена на рис. 4.17.

На рис. 4.11 порівняно реальну характеристику теплового реле ТРТ-115 із захисною характеристикою двигуна. Зазначену реальну характеристику було

отримано автором експериментальним шляхом в лабораторних умовах на п'яти зразках теплового реле ТРТ-115.

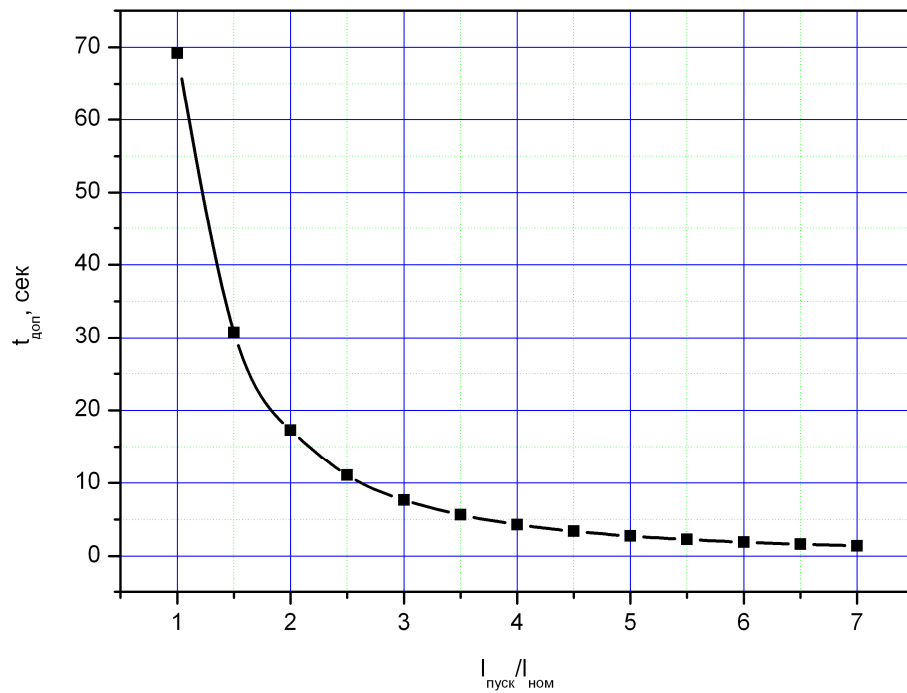


Рис. 4.10. Характеристика $t_{\text{доп}} = f(k)$ при пуску для двигуна АІР-80В4

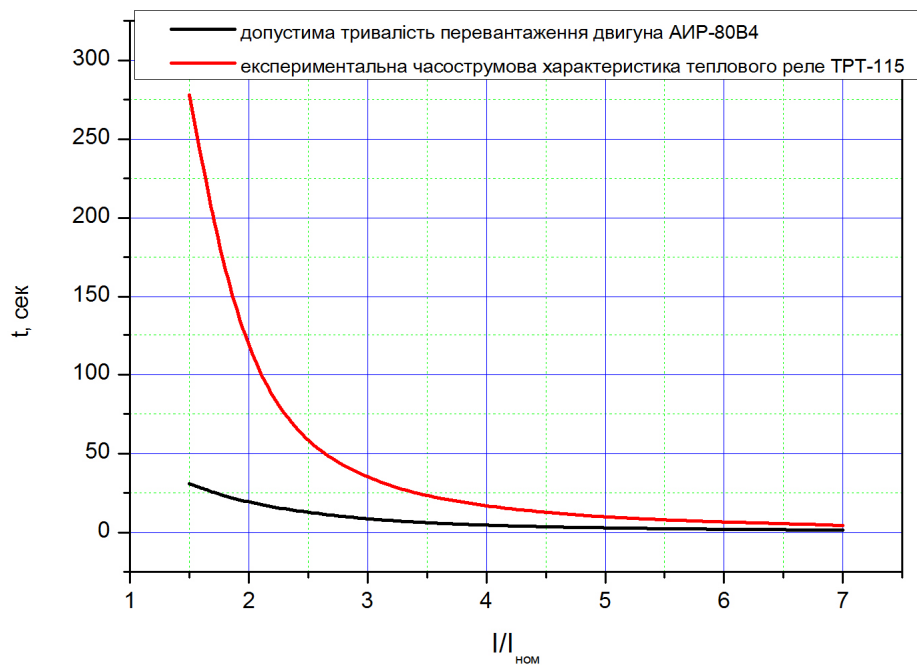


Рис. 4.11. Порівняння часострумових характеристик двигуна АІР-80В4 і теплового реле ТРТ-115

Як впливає з рис. 4.11, похибки спрацювання теплового реле ТРТ-115 при реальних кратностях пускових струмів можуть досягати до 74,3%, що говорить про недостатньо надійний захист обмоток статора від перегрівання.

Тому розробка більш вдосконаленого пристрою захисту замість теплових реле є однією із задач даної роботи.

Як вже було зазначено раніше, для надійного теплового захисту асинхронних допоміжних машин потрібно, щоб часострумова характеристика двигуна та захисного пристрою співпадали. В основі створення нового більш надійного пристрою теплового захисту асинхронних допоміжних машин лежить відпрацювання ним часострумової характеристики того двигуна, який він захищає.

Для цього за наведеною вище методикою на основі вихідних даних, що наведено в табл. 4.1, отримаємо часострумові характеристики для всіх допоміжних машин електропоїзда ЕР9М.

Таблиця 4.1

Вихідні дані на допоміжні машини електропоїзда змінного струму
серії ЕР9М

№	Тип двигуна	Номінальний фазний струм двигуна, А	Допустиме перевищення температури обмотки статора для класу ізоляції, °С		Діаметр обмоткового дроту, мм
			В	F	
1	усл. № 548	28	130	150	1,18
2	2ТТ-16/10-01	3,5	130	150	0,63
3	АОМ 32-4	7,62	130	150	0,9
4	АОМ 22-2	3,78	130	150	0,71

Подібно до наведеного вище прикладу, за виразом (4.38) визначаємо часострумову характеристику асинхронних допоміжних машин електропоїзда ЕР9М при кратності перевантаження $k = 1 \dots 7$.

На рис. 4.12 – 4.15 наведено такі характеристики із припущенням, що в двигуні до капітального ремонту укладається ізоляція класу В за нагрівостійкістю, а після капітального ремонту – класу F.

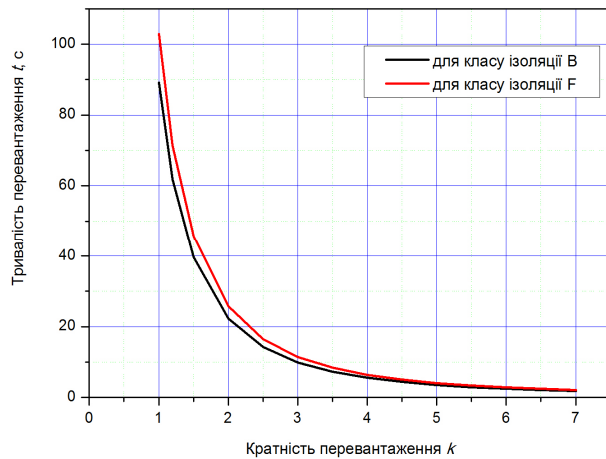


Рис. 4.12. Гранично допустима тривалість перевантаження двигуна
ум. № 548

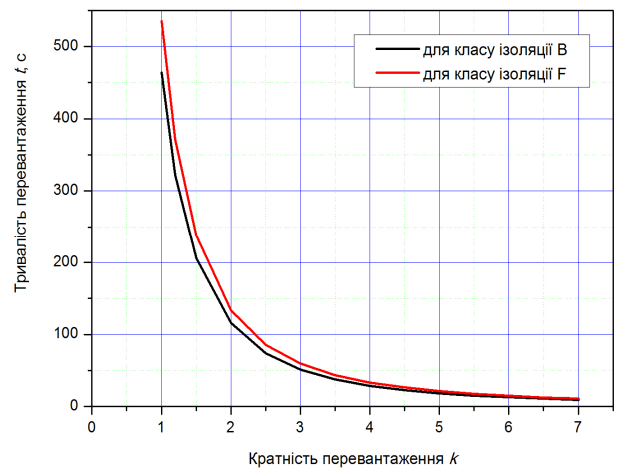


Рис. 4.13. Гранично допустима тривалість перевантаження двигуна
2ТТ-16/10-01

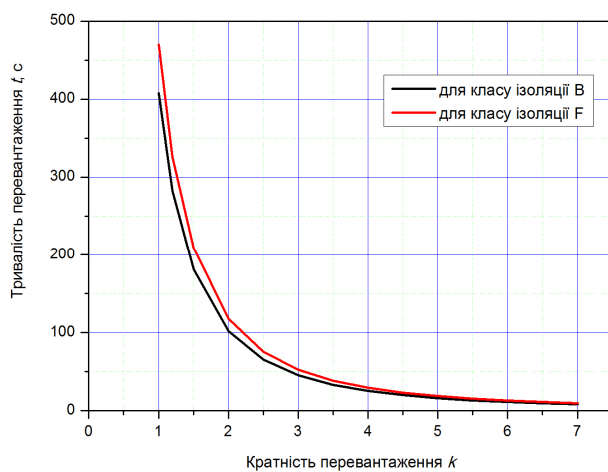


Рис. 4.14. Гранично допустима тривалість перевантаження двигуна
АОМ 32-4

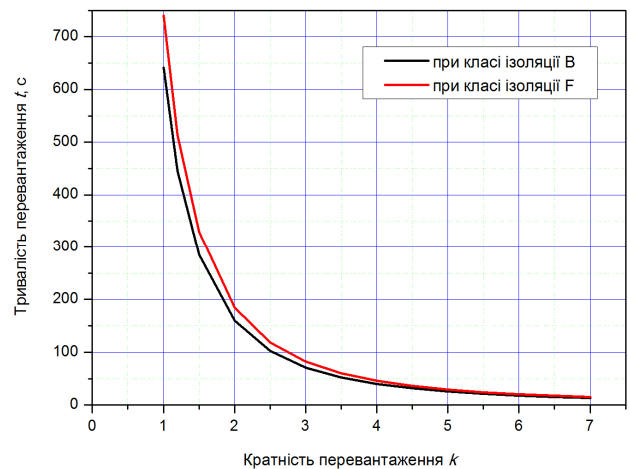


Рис. 4.15. Гранично допустима тривалість перевантаження двигуна
АОМ 22-2

Наведені вище рисунки, а також таблична форма представлення характеристики гранично допустимої тривалості перевантаження для асинхронних допоміжних машин, що її наведено в додатках виступає основою алгоритму нового пристрою теплового захисту на сучасній мікропроцесорній елементній базі. Впровадження названого пристрою автор пропонує як один із шляхів покра-

щення існуючої типової схеми захисту допоміжних машин на електропоїздах серії EP9M.

4.3.2. Схема та принцип дії запропонованого пристрою теплового захисту допоміжних машин

Особливістю, що істотно відрізняє новий захисний пристрій від існуючих теплових реле є застосування в якості вимірювального органу мікроконтролера, в який «зашивається» характеристика гранично допустимої тривалості перевантаження двигуна, який захищено даним пристроєм.

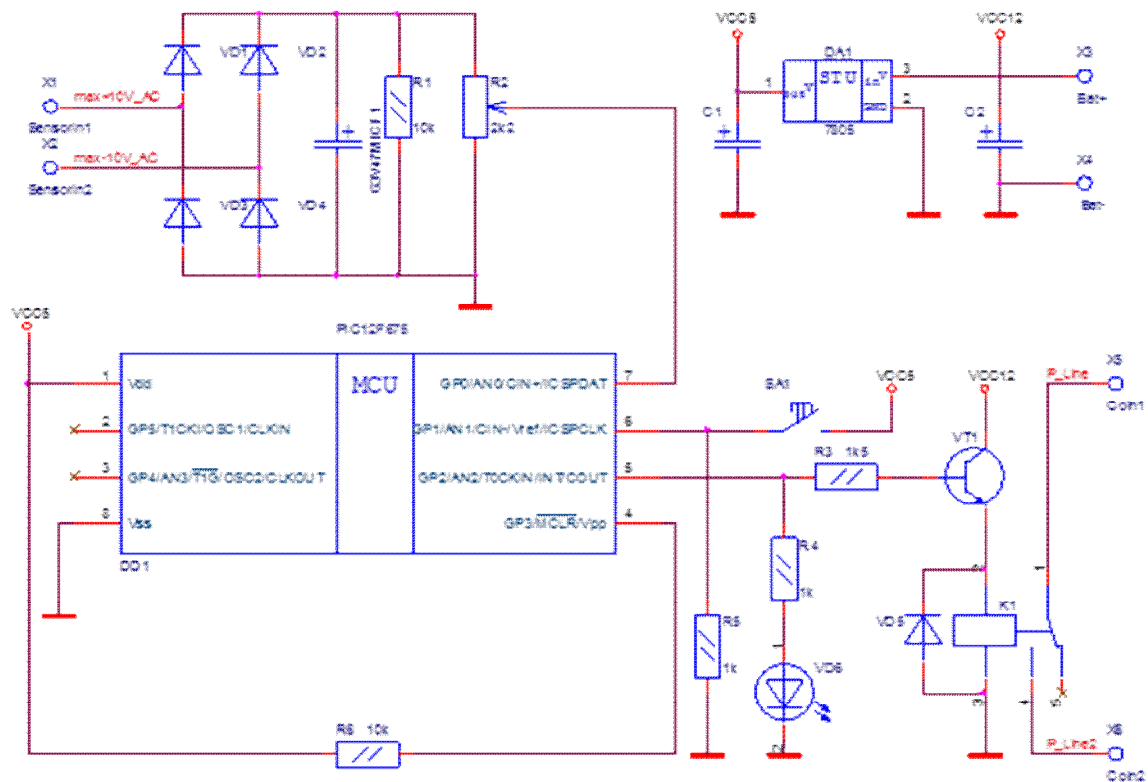


Рис. 4.16. Принципова схема пристрою теплового захисту для допоміжних машин електропоїздів серії EP9M

На рис. 4.16 показано принципову схему пристрою теплового захисту для допоміжних машин електропоїздів серії EP9M. 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, 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 запус-

кає 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 i , 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.

4.4. Експериментальне дослідження впливу коефіцієнта несиметрії та відхилення напруги живлення від номінального значення на температуру нагріву обмоток статора асинхронних допоміжних машин

Аналітичні дослідження, а також аналіз відповідних літературних джерел, що були проведені автором в попередніх розділах, однозначно довели, що зниження якості живлячої електродвигуни енергії, зокрема несиметрія живлячої напруги та відхилення її від номінального значення, викликають додаткові перегріву обмоток статора допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії EP9M і можуть стати причиною їх передчасного виходу із ладу.

Для доведення адекватності аналітичного дослідження та якісної оцінки такого впливу в практичних умовах створено випробувальний стенд, на якому можна змодельовати реальні умови експлуатації допоміжної машини на електропоїзді.

На рис. 4.17 наведено принципову схему лабораторного стенду для випробування асинхронних двигунів на нагрів в реальних умовах експлуатації, який зібрано в лабораторії електричних машин, апаратів та електроприводу Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна.

Схема випробувального стенду містить в собі:

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

M2 – трифазний асинхронний двигун типу А51-4;

G – генератор постійного струму типу П-42;

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

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

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

Q1 – триполюсний рубильник;

Q2 – однополюсний рубильник пусковий;

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

PV4 – вольтметр постійного струму типу Е-59;

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

PA4 – амперметр постійного струму Е-59;

FU1, FU2, FU3 – плавкі запобіжники.

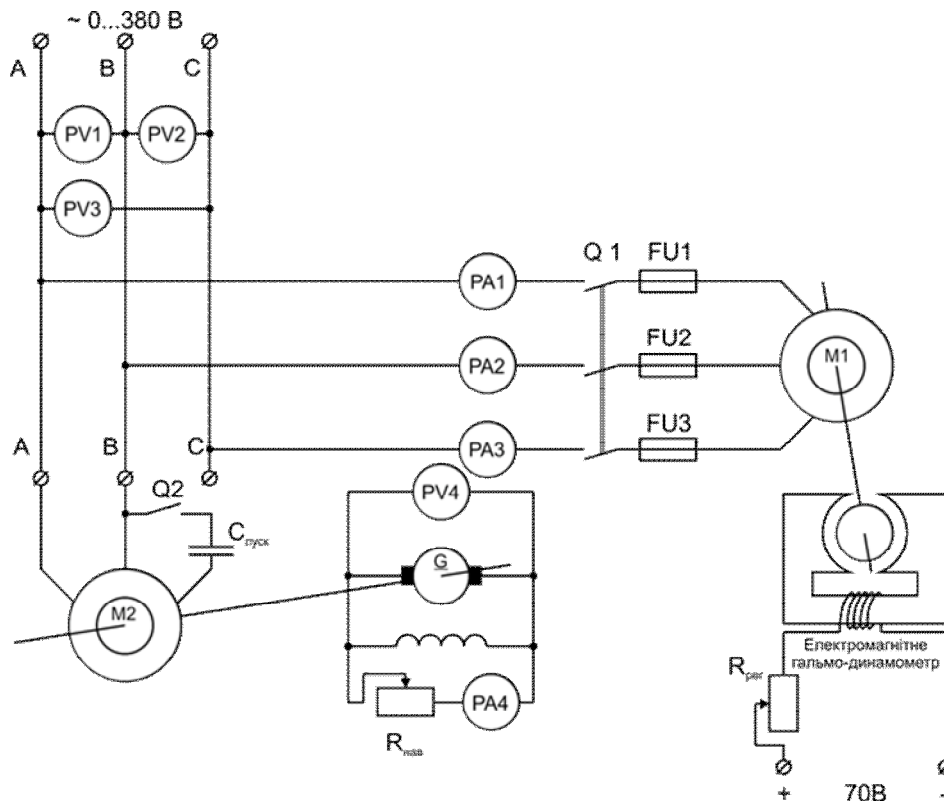


Рис. 4.17. Принципова схема лабораторного стенду для випробування асинхронних допоміжних машин на нагрів в реальних умовах

Живлення стенду здійснюється від індукційного регулятора (на рис. 4.17 не показано), за допомогою якого можна плавно змінювати напругу в мережі в межах 0...380 В.

Асинхронний двигун М2 працює в однофазному режимі. Для його пуску застосовується пусковий конденсатор $C_{\text{пуск}}$, який короткочасно підключається до двигуна через рубильник Q2. Робота двигуна М2 в однофазному режимі дозволяє створювати несиметричну систему лінійних напруг в стенді за рахунок різної завантаженості фаз. Контроль за поточним діючим значенням лінійних напруг системи здійснюється трьома вольтметрами змінного струму PV1...PV3. Поточне значення несиметрії живлячої напруги визначається відповідно до [81] за формулою:

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{л ном}}} \cdot 100 = \frac{0,62 \cdot (U_{\text{л max}} - U_{\text{л min}})}{U_{\text{л ном}}} \cdot 100, \quad (4.36)$$

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

$U_{\text{л ном}}$ - номінальна лінійна напруга.

Двигун М2 обертає генератор постійного струму паралельного збудження G, який навантажено водяним реостатом $R_{\text{нав}}$. Зміна опору реостату $R_{\text{нав}}$ призводить до зміни струму якоря генератора G, моменту на валу двигуна М2 і відповідно лінійних струмів у фазах А та В. Таке схемне рішення дозволяє отримувати несиметрію системи лінійних напруг стенда в межах $k_{2U} = 0...12\%$.

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

Паспортні дані асинхронного двигуна типу АОЛ 2 31-4 з короткозамкненим ротором [45, 72] наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Паспортні дані досліджуваного двигуна типу АОЛ 2 31-4

P, кВт	U, В	I, А	η	$\cos \varphi$	n, об/хв	D _{а1} , мм	l ₁ , мм
2,2	220/380	7,8/4,5	0,85	0,87	1380	191	100

Дослідження виконуються в тривалому режимі роботи. Поточне значення середньої температури обмотки статора визначаємо методом опору, вимірюючи та порівнюючи опір обмотки статора в практично холодному та нагрітому стані. Для визначення опору обмотки використовується метод амперметра-вольтметра [1, 25, 35, 51, 52, 53, 54].

При вимірюванні опору електричному струму обмоток статора асинхронних машин використовуємо відому із електротехніки схему, зображену на рис 4.18.

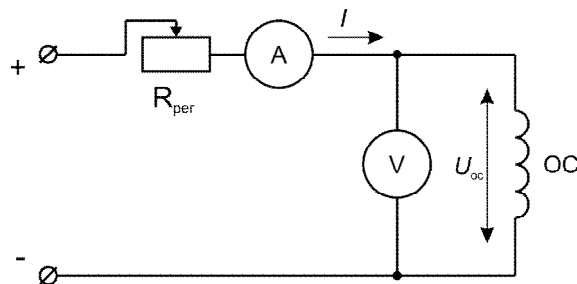


Рис. 4.18. Схема вимірювання опору обмотки статора асинхронного двигуна методом амперметра-вольтметра

Електричний опір постійному струмові обмотки статора асинхронного двигуна R_{oc} визначається із виразу [71]:

$$R_{oc} = \frac{U_{oc}}{I}. \quad (4.37)$$

Асинхронний двигун під час дослідження навантажено електромагнітним гальмом із гальмівним моментом, що дорівнює номінальному моменту двигуна

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

Проведено дослід по визначенню кривої нагрівання асинхронного двигуна типу АОЛ 2 31-4 при роботі із номінальним навантаженням від симетричної системи живлячої напруги. При цьому отримано криву нагрівання двигуна, яку наведено на рис. 4.19.

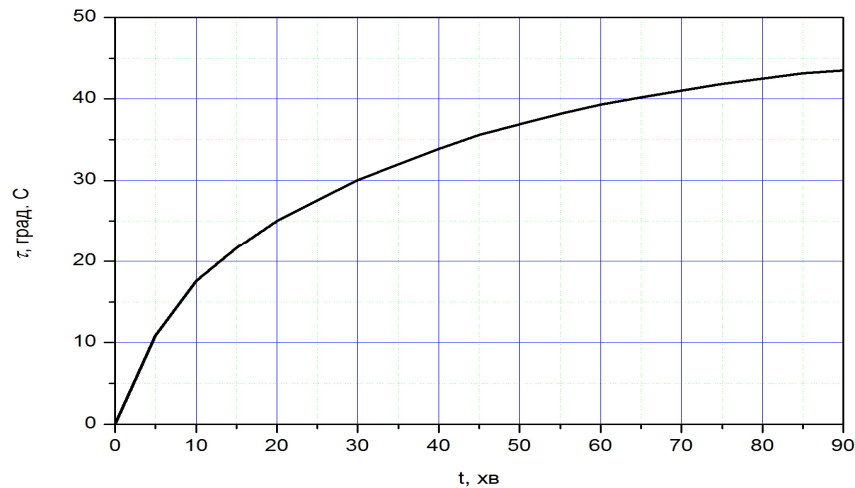


Рис. 4.19. Крива нагріву асинхронного двигуна типу АОЛ 2 31-4 в номінальних умовах

Із рис. 4.19 встановлено, що двигун типу АОЛ 2 31-4 досягає усталеного значення температури перегріву обмотки статора за 90...95 хв.

Для визначення значення температури перегріву при несиметрії живлячої напруги приймаємо час встановлення практично нагрітого стану 95 хв.

Перед початком експерименту визначаємо опір практично холодної обмотки статора, після чого запускаємо двигун в роботу із номінальним навантаженням і через 95 хв роботи вимірюємо опір обмотки статора в практично нагрітому стані. Проводимо дослідження на нагрівання обмотки статора асинхронного двигуна із номінальним навантаженням при несиметрії живлячої напруги $k_{2U} = 0\%$; $k_{2U} = 2,44\%$; $k_{2U} = 7,03\%$ та $k_{2U} = 9,12\%$.

Перегрів обмотки статора асинхронного двигуна визначаємо за формулою [17, 22, 42]:

$$\tau = \frac{r_{\text{пер}} - r_{\text{хол}}}{r_{\text{хол}}} (230 + \vartheta_{\text{хол}}) + \vartheta_{\text{хол}} - \vartheta_0, \quad (4.38)$$

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

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

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

ϑ_0 - температура охолоджуючого середовища.

В табл. 4.3 наведено результати випробування на нагрів в реальних умовах експлуатації електродвигуна типу АОЛ 2 31-4 у відповідності до [1, 25, 35, 51, 52, 53, 54]. Приклад розрахунку сталих температур і кривих нагрівання даного двигуна наведено в додатках.

Таблиця 4.3

Перегрів обмотки статора асинхронного двигуна типу АОЛ 2 31-4 в реальних умовах експлуатації

$k_{2U}, \%$	$r_{\text{хол}}, \text{Ом}$	$r_{\text{пер}}, \text{Ом}$	$\tau, ^\circ\text{C}$
0	1,84	2,16	43,47
2,44	1,8	2,14	45,52
7,03	1,84	2,44	82,13
9,12	1,8	2,59	110,97

Порівняємо результати експериментальних досліджень із аналітичним розрахунком. Для цього за наведеною раніше методикою визначимо перегрів обмотки статора з урахуванням дії несиметрії живлячої напруги.

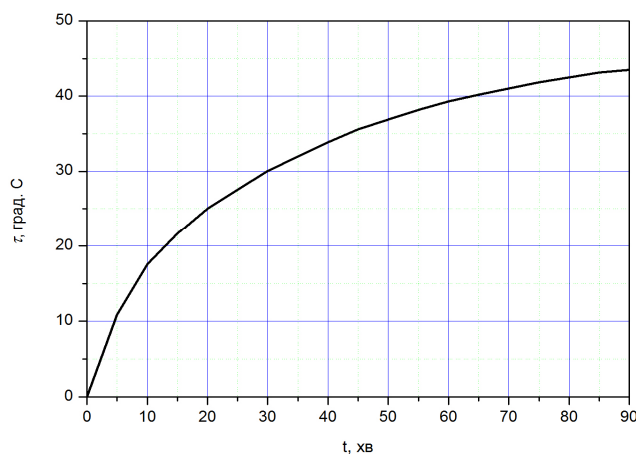


Рис. 4.20. Крива нагріву двигуна типу АОЛ 2 31-4 при $k_{2U} = 0\%$

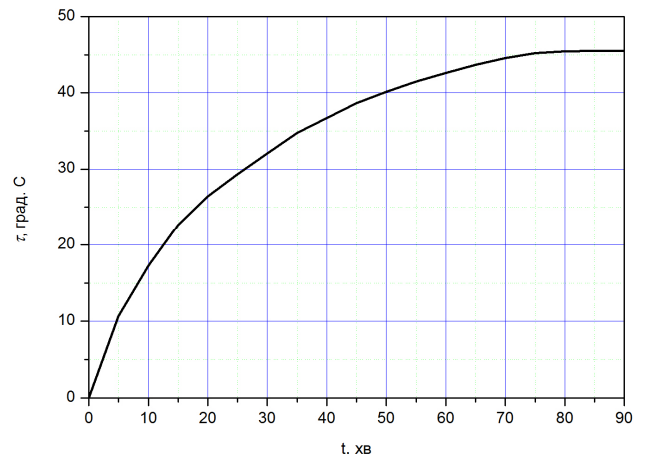


Рис. 4.21. Крива нагріву двигуна типу АОЛ 2 31-4 при $k_{2U} = 2,44\%$

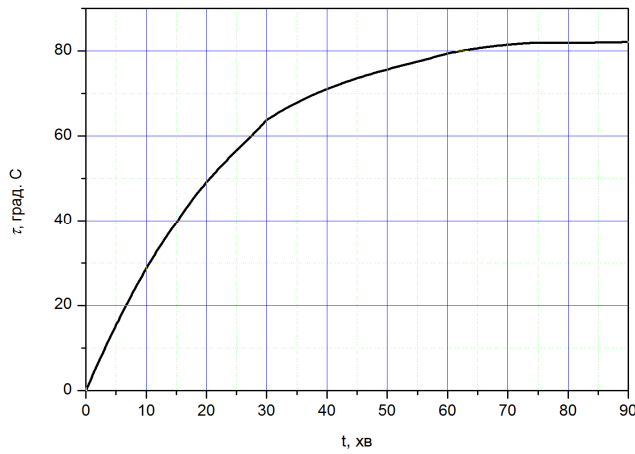


Рис. 4.22. Крива нагріву двигуна типу
АОЛ 2 31-4 при $k_{2U} = 7,03\%$

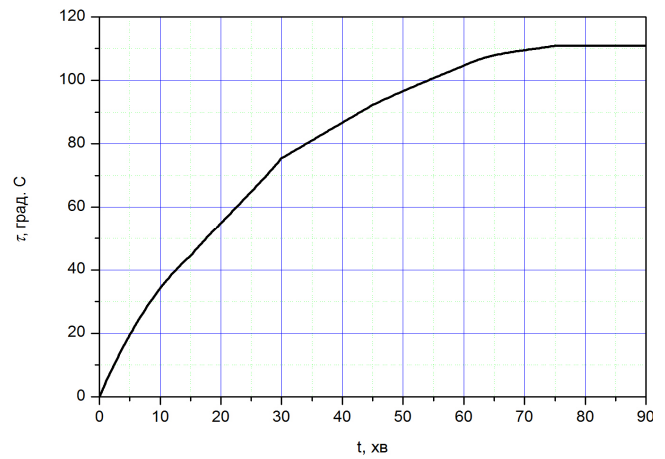


Рис. 4.23. Крива нагріву двигуна типу
АОЛ 2 31-4 при $k_{2U} = 9,12\%$

Двигун вказаного типу в номінальному режимі споживає із мережі потужність

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

При цьому сумарні втрати в ньому

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

За [65] прийmemo, що у відсотковому співвідношенні всі втрати в двигуні в номінальному режимі розподілені в такому порядку:

$$\text{електричні втрати в статорі } p_{\text{ел1}} = 0,5 \sum p = 0,5 \cdot 388,2 = 194,1 \text{ Вт};$$

$$\text{електричні втрати в роторі } p_{\text{ел2}} = 0,25 \sum p = 0,25 \cdot 388,2 = 97,05 \text{ Вт};$$

$$\text{втрати в магнітопроводі статора } p_{\text{ст}} = 0,2 \sum p = 0,2 \cdot 388,2 = 77,64 \text{ Вт};$$

$$\text{механічні втрати } p_{\text{мех}} = 0,05 \sum p = 0,05 \cdot 388,2 = 19,41 \text{ Вт}.$$

Відповідно до методики [39] позначимо електричні втрати в статорі $\Delta P_1 = p_{\text{ел1}}$, електричні втрати в роторі $\Delta P_2 = p_{\text{ел2}}$ і втрати в сталі $\Delta P_3 = p_{\text{ст}}$.

Із [45] для двигуна типу зовнішній діаметр осердя статора $D_{a1} = 191 \text{ мм}$, довжину пакета сталі осердя статора $l_1 = 100 \text{ мм}$

Еквівалентний тепловий опір двигуна

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

Відповідно до [39] теплові опори R_{12} і R_{13} приймаємо

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

Середнє перевищення температури обмотки двигуна в номінальному режимі становить

$$\theta_1 = R_{11}\Delta P_1 + R_{12}\Delta P_2 + R_{13}\Delta P_3 = 0,14 \cdot 194,1 + 0,084 \cdot 97,05 + 0,084 \cdot 77,64 = 41,8^{\circ}\text{C}.$$

Додатковий перегрів ізоляції обмотки статора АД при несиметрії живлячої напруги визначається відповідно до [1, 39] за формулою:

$$\Delta \tau_{(2)} = \frac{2K_{2U}^2}{100} \cdot \theta_1.$$

Приймаємо значення коефіцієнта несиметрії живлячої напруги $K_{2U1} = 0,6\%$, $K_{2U2} = 2,44\%$, $K_{2U3} = 7,03\%$, $K_{2U4} = 9,12\%$. Для вказаних значень K_{2U} визначимо значення додаткового перегріву ізоляції та сумарне середнє перевищення обмотки статора двигуна. Результати аналітичних досліджень для двигуна типу АОЛ 2 31-4 наведено в табл. 4.4.

Порівняємо результати експериментального визначення середнього перевищення температури найбільш перенавантаженої фази асинхронного двигуна типу АОЛ 2 31-4 із результатами аналітичного дослідження.

Таблиця.4.4

Результати аналітичного визначення сумарного середнього перевищення температури обмотки статора двигуна типу при різних K_{2U}

$\theta_1, ^{\circ}\text{C}$	$K_{2U}, \%$	$\Delta \tau_{(2)}, ^{\circ}\text{C}$	$\tau, ^{\circ}\text{C}$
41,8	0,6	0,3	42,1
	2,44	5,02	46,82
	7,03	41,3	83,1
	9,12	56,97	111,33

Як впливає із табл. 4.5, похибка між результатами експериментального та аналітичного дослідження не перевищує 5%, тому можна зробити висновок про адекватність запропонованої методики визначення впливу зниження показників якості живлячої електроенергії із використанням узагальненої теплової моделі та прийнятим процентним розподілом втрат в асинхронній машині.

Таблиця 4.5

Порівняння результатів експериментального та аналітичного дослідження впливу несиметрії живлячої напруги на середнє перевищення температури обмотки статора двигуна типу АОЛ 2 31-4

№ з/п	$k_{2U}, \%$	$\tau_{\text{екп}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{роз}}, ^\circ\text{C}$	Похибка, %
1	0	43,47	42,1	3,17
2	2,44	45,52	46,82	2,85
3	7,03	82,13	83,1	1,19
4	9,12	110,97	111,33	0,3

Раніше визначено (п. 2.4), що додатковий перегрів при відхиленні напруги живлення від номінального значення не залежить від параметрів і типу асинхронного двигуна, а пропорційний тільки величині відносного відхилення напруги від номінального значення. Відповідно до табл. 2.7 додатковий перегрів при відхиленні напруги до відповідних значень дорівнює: при 160 В – 16,36°C; при 205 В – 4,09°C; при 225 В – 1,35°C; при 260 В – 10,91°C.

На стенді, схему якого представлено на рис. 4.17, виконано теплові випробування асинхронного двигуна в тривалому режимі при різних значеннях напруги живлення, в ході яких визначено криві нагрівання досліджуваного двигуна. Графіки нагріву двигуна приведено на рис. 4.24.

Результати аналітичного визначення перегріву обмотки статора асинхронної машини при відхиленні напруги від номінального значення порівняно із результатами експерименту в табл. 4.6.

Як впливає із табл. 4.6, розбіжність між результатами аналітичного і експериментального дослідження впливу відхилення напруги від номінального значення на перегрів обмоток статора двигуна АОЛ 2 31-4 не перевищує 5%. Такі результати підтверджують достатню точність методики для кількісного визначення впливу відхилення напруги живлення від номінального значення на перегрів обмотки статора допоміжних машин.

Порівняння результатів дослідження впливу відхилення напруги на середнє перевищення температури обмотки статора двигуна типу АОЛ 2 31-4

№ з/п	U , В	$\tau_{\text{екп}}$, °С	$\tau_{\text{роз}}$, °С	Похибка, %
1	160	60,19	58,16	3,4
2	205	47,97	45,89	4,3
3	220	43,47	41,8	3,8
4	225	44,7	43,16	3,4
5	260	55,45	52,71	4,9

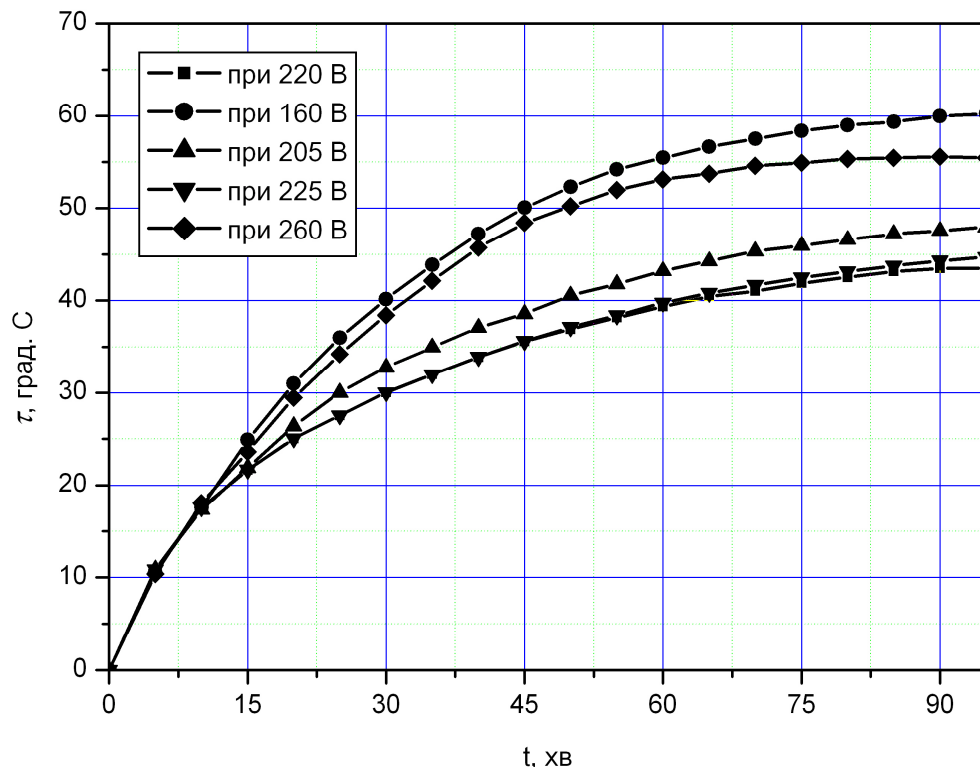


Рис. 4.24. Крива нагріву двигуна типу АОЛ 2 31-4 при відхиленні напруги від номінального значення

4.5. Вплив якості живлячої енергії на термін служби допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

Термін служби ізоляційного шару обмоток електричних машин є основним показником, що обумовлює термін служби допоміжної машини.

У разі перевищення допустимих температур термін служби ізоляції різко зменшується за складним логарифмічним законом. Незначне перевищення температури понад допустиме значення призводить до суттєвого скорочення терміну служби ізоляційних матеріалів [17, 22, 28, 36, 38].

Для класу ізоляції В відомим є емпіричний вираз для оцінки терміну служби ізоляційного шару [17]

$$T = 8 \cdot 10^5 e^{-0,09t}, \quad (4.39)$$

де t - абсолютна температура ізоляційного шару, $^{\circ}\text{C}$.

За результатами досліджень, що проведені в попередніх розділах (табл. 2.8), отримано значення перегрівів для допоміжних машин електропоїзда ЕР9М від зниження якості живлячої електроенергії. До отриманої величини перегріву із табл. 2.8 додаємо величину температури охолоджуючого середовища $\vartheta_{\text{ох}} = 25^{\circ}\text{C}$ і отримаємо абсолютну температуру ізоляційного шару обмотки статора машини. Використовуючи вираз (4.39) визначимо термін служби допоміжних машин при цьому. Результати дослідження наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Термін служби АД при роботі в мережі з високою несиметрією живлячої напруги та відхиленням напруги від номінального значення

Тип двигуна	Напруга, В	Коефіцієнт несиметрії живлячої напруги, %									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ум. № 548	160	233	214	164	105	57	26	10	3	1	0
	205	704	645	494	318	171	77	29	9	2	1
	220	1017	931	715	459	248	112	42	13	4	1
	225	900	824	632	406	219	99	37	12	3	1
	260	381	349	268	172	93	42	16	5	1	0
2ТТ-16/10-01	160	183	167	126	79	41	18	6	2	0	0
	205	799	728	551	345	180	78	28	8	2	0
	220	799	728	551	345	180	78	28	8	2	0
	225	707	644	487	306	159	69	25	7	2	0
	260	299	273	206	129	67	29	10	3	1	0
АОМ 32-4	160	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	205	6	5	3	1	0	0	0	0	0	0
	220	8	7	4	2	0	0	0	0	0	0
	225	7	6	4	1	0	0	0	0	0	0

АОМ 32-4	260	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0
АОМ 22-2	160	262	240	185	121	66	30	12	4	1	0
	205	789	724	559	364	199	92	36	12	3	1
	220	1141	1047	809	526	288	133	51	17	5	1
	225	1009	926	715	465	255	117	46	15	4	1
	260	1141	1047	809	526	288	133	51	17	5	1

Із табл. 4.7 випливає, що робота допоміжних машин електропоїзда ЕР9М із коефіцієнтом несиметрії живлячої напруги 8...9 % при відхиленні напруги від номінального значення призводить до скорочення терміну служби ізоляційного шару обмоток статора до 9...2 років, а в окремих випадках до 1 року, що складає скорочення терміну служби в 1,7 ... 7,5 разів у порівнянні із гарантованим виробником терміном служби допоміжної машини в 15 років. Робота машин при несиметрії живлячої напруги 10% скорочує термін служби допоміжної машини до менш ніж одного року, тобто в 15 разів. При цьому із табл. 4.6 видно, що зниження несиметрії до 6...7 % дозволить підвищити термін служби допоміжних машин до терміну, встановленого заводом-виробником, тобто збільшити його в 1,7...15 раз у порівнянні із реальним терміном служби.

4.6. Висновки до четвертого розділу

1. В ході аналізу розглянуто відомі способи симетрування системи лінійних напруг. Розглянуто можливість симетрування системи лінійних напруг допоміжних машин електропоїздів змінного струму за допомогою керованих індивідуальних ємнісних симетруючих пристроїв дискретної дії;
2. Запропоновано структуру та принципову схему пристрою для контролю якості електричної енергії, якою живляться допоміжні машини електропоїзда змінного струму серії ЕР9М, із системою керування на базі мікроконтролерів сімейства Microchip PIC16F676;
3. Розроблено методику визначення ємності батарей конденсаторів симетруючих пристроїв, за якою виконано розрахунок орієнтовних значень ємності симетруючих конденсаторів для всіх допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії ЕР9М при умові повного симетрування системи лінійних напруг

на затискачах машин. Дослідження показали, що для симетрування системи на-
пруг, 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 вен-
тилятора АОМ 32-4 – 100...650 мкФ; для двигуна вентилятора АОМ 22-2 –
50...325 мкФ;

4. В лабораторних умовах проведено дослідження із впливу несиметрії жив-
лячої напруги та її відхилення від номінального значення на нагрівання асинх-
ронної допоміжної машини, в ході яких встановлено, що асинхронний двигун
типу АОЛ2 31-4, який працює із номінальним навантаженням в годинному ре-
жимі 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 значен-
нями перегріву та його аналітично розрахованими значеннями при тих же зна-
ченнях коефіцієнта несиметрії напруги не перевищує 5%, чим доведено можли-
вість застосування узагальненої теплової моделі асинхронного двигуна для ви-
значення додаткового нагрівання допоміжних машин в умовах реальної експлу-
атації.

5. Розроблено методику із визначення гранично допустимої тривалості пе-
ревантаження допоміжної машини з урахуванням класу ізоляції і розроблено
принципову схему пристрою для захисту допоміжних машин електропоїздів
змінного струму від теплових перевантажень, проведено експериментальні ви-
пробування з метою встановлення працездатності запропонованого пристрою,
які повністю підтверджують працездатність експериментального зразка.

6. Визначено вплив зниження якості живлячої електроенергії на термін слу-
жби допоміжних машин електропоїздів змінного струму. Встановлено, що при
підвищенні несиметрії живлячої напруги до значення 8...9 % термін служби для
допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, 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.

ЗАГАЛЬНІ 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 EP9M 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% ... 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 $68...124,3^{\circ}\text{C}$ 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 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 .

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 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 зменшує перегрів на $20,8\%$ у порівнянні із аналогічним двигуном, що працює із .

7. 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 становлять ; для насоса трансформатора - ; для двигуна вентилятора АОМ 32-4 - ; для двигуна вентилятора АОМ 22 – 2 - .

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 - 43,5°C; при - 45,5°C; при - 82,3°C; при - 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 ро-

ками, 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.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IEEE 112 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators / approved 9 February 2004 / The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2004. – 79 p.
2. Skoda transportation. Inspired by move. The New Evolution Series Products. Двухъярусные электромотрисы и моторвагонные подвижные составы [Електронний ресурс] / Режим доступу/ <http://skoda.cz/ru/produkty/elektricke-jednotky/elektricka-jednotka-rady-471/Contents.3/0/A34EF0A6CC8C3A25ECE3C4F6D53C1964/resource.pdf>. - назва з екрану.
3. Алексеев А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. Л.: Энергия, 1977. - 445 е
4. Амели В. М., Озеров М. И. и др. Электropоезда. — М.: Транспорт, 2000. - 347 с.
5. Аппараты электрические тяговые. Общие технические требования: ГОСТ 9219-88 - ГОСТ 9219-88. — [введ. 01.01.1990]. — М.: Издательство стандартов, 1988. — 36 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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
11. Балійчук О.Ю. Нагрівання допоміжних машин електропоїздів змінного струму // Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2014» (Одесса – Днепропетровск, 23.10-26.10.2014): Материалы VII Междунар. научно-практ. конф. / ДНУЖТ. – Днепропетровск, 2014. – С. 65-66.
12. Балійчук О.Ю. Нагрівання і захист допоміжних машин електропоїздів змінного струму при короткочасних перевантаженнях / О.Ю. Балійчук // Электрификация транспорта. – 2014. № 8/2014. – С.79 – 85. Бібліогр.: с. 83.
13. Балійчук О.Ю. Підвищення надійності допоміжних машин електропоїздів змінного струму / О.Ю. Балійчук, Л.В. Дубинець, О.М. Духновський // Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2014» (Одесса – Днепропетровск, 23.10-26.10.2014): Материалы VII Междунар. научно-практ. конф. / ДНУЖТ. – Днепропетровск, 2014. – С. 66.
14. Балійчук О.Ю. Поліпшення якості електричної енергії, що живить допоміжні машини електропоїздів змінного струму / О.Ю. Балійчук // Энергозбереження на железнодорожном транспорте и в промышленности: междунар. наук. – практ. конф., 10 – 13 июня, 2015 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2015. – С. 10 – 11.

- 15.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.
16. Барский М.Р., Глушков М.Т., Гончаров К.Б. и др.Электropоезд ЭР-9. М.: Транспорт, 1964. - 240 с.
- 17.Безрученко, В.М. Электричні машини тягового рухомого складу / В.М. Безрученко, В.К. Варченко, В.В. Чумак. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
- 18.Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники [текст] / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1964. – 750 с.
- 19.Богданов, А.А. Визуализация данных в Microcal Origin / А.А. Богданов. – М.: Альтекс-А, 2003. – 104 с.
- 20.Вапник В Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука: 1979. 448 с.
- 21.Внокуров В. А, Попов Д. А. Электрические машины железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1986. - 512 с.
- 22.Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений [текст] / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
- 23.Вспомогательные машины электроподвижного состава [Электронный ресурс] / Режим доступа / <http://lokomotiv.ru/podvizhnoy-sostav/vspomogatelnye-mashiny-elektropodvizhnogo-sostava.html>. - назва з екрану.
- 24.Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин / Р.Г. Гемке. – Л.:Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.
25. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин / О.Д. Гольдберг. - М.: Высш. шк., 2000.-255 с.
- 26.Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин: учебник для вузов [текст] / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.

27. Горин Н.Н. Режимы работы вспомогательных асинхронных машин // Труды ВНИИЖТ, 1965. Вып. 286 С. 93-107.
28. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 480 с.
29. Гридин, В.М. Расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей. Методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Электротехника и электроника» [текст] / В.М. Гридин. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 23 с.
30. Грузовой электровоз 2ЭС10 [Электронный ресурс] / Режим доступа / <http://ulkm.ru/produkcija/gruzovoj-elektrovoz-2es10/#system>. — назва з екрану.
31. Грузовой электровоз 2ЭС7 [Электронный ресурс] / Режим доступа / <http://ulkm.ru/produkcija/gruzovoj-elektrovoz-2es7/#system>. — назва з екрану.
32. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник / З.М. Дубровский, В.И. Попов, Б.А. Тушканов. — М.: Транспорт, 1991. — 471 с.
33. Данцис, Я.Б. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий / Я.Б. Данцис, Т.М. Жилов. Л.: Энергия, 1980. — 176 с.
34. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 252 с.
35. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 407 с.
36. Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. М.: Транспорт, 1979.- 303 с.
37. Зимин, Е.Н. Защита асинхронных двигателей до 500 В / Е.Н. Зимин. Л.: Энергия, 1967. — 88 с.
38. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: Учебник для вузов [текст] / А.В. Иванов-Смоленский. — М.: Энергия, 1980. — 928 с.

39. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296с.
40. Каптелкин В.А. Анализ напряжения питания вспомогательных машин электроподвижного состава переменного тока // Труды ЦНИИ МПС, 1969. Вып. 395.-С. 15-20.
41. Капустин Л.Д. Электропоезда с электрическим торможением / М., Транспорт, 1971 — 216 с.
42. Кацман, М.М. Электрические машины: Учебник для студентов средних профессиональных учебных заведений [текст] / М.М. Кацман. – М.: Высшая школа, 2001. – 463 с.
43. Ключев В. И. Теория электропривода М. Энергоатомиздат, 1998 - 704 с.
44. Козырев Н.А. Изоляция электрических машин и методы ее испытания. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 264 с.
45. Кокорев, А.С. Справочник молодого обмотчика электрических машин / А.С. Кокорев. – М.: Высшая школа, 1985. – 207 с.
46. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин. / И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1980. – 495с.
47. Кузнецов, В.Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжения в электрических сетях / В.Г. Кузнецов, А.С. Григорьев, В.Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 239 с.
48. Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 536с.
49. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
50. Магистральные электровозы. Том 2 / В.И. Бочаров, П.А. Золотарев, М.Л. Козорезов, Ю.В. Куприанов, А.Л. Курочка, А.Л. Лозановский, Шапиро И.Л, В.П. Янов. – М.: Машиностроение, 1968. – 450 с.

- 51.Машины электрические вращающиеся тяговые: ГОСТ 2582-81 - ГОСТ 2582-81. – [введ. 01.01.1983]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 37 с.
- 52.Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний: ГОСТ 7217-87 - ГОСТ 7217-87. – [введ. 01.01.1988]. – М.:ИПК Издательство стандартов, 2003. — 38 с.
- 53.Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний: ГОСТ 11828-86 - ГОСТ 11828-86. – [введ. 01.07.1987]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 32 с.
- 54.Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования: ГОСТ 183-74 - ГОСТ 183-74. – [введ. 01.01.1976]. – М.:ИПК Издательство стандартов, 2001. – 27 с.
- 55.Москаленко, В.В. Электрический привод: учебник для студентов высших учебных заведений [текст] / В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
- 56.Мышкис, А.Д. Элементы теории математических моделей [текст] / А.Д. Мышкис. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
- 57.Некрасов, О.А. Вспомогательные машины электровозов переменного тока / О.А. Некрасов, А.М. Рутштейн. – М.: Транспорт, 1988. – 233 с.
- 58.Некрасов, О.А. Вспомогательные машины электроподвижного состава переменного тока / О.А. Некрасов. – М.: Транспорт, 1967. – 168с.
- 59.Новые разработки статических преобразователей для электровозов переменного и постоянного тока [Электронный ресурс] / Режим доступа / http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05_03/stat_158.htm. - назва з екрану.
- 60.О.Ю. Балійчук 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.
- 61.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.
62. Основы теории цепей: Учебник для вузов [текст] / Г.В. Зевеке, П.А. Июкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
63. 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.
64. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава / Ю.М. Иньков, Н.А. Ротанов, В.П. Феоктистов, О.Г. Чау-сов; под ред. Ю.М. Инькова.- М.: Транспорт, 1982 263 с.
65. Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Методические указания. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2007. – 20с.
66. Реле электротепловые токовые серии ТРТП. Каталог E01000250 [Електронний ресурс] / Режим доступу http://www.ielectro.ru/pp_fn_docclass=57261.html/pp_pageDoc=2/gelem101715.html. - назва з екрану.
67. Реле электротепловые токовые. Общие технические условия: ГОСТ 16308-84 - ГОСТ 16308-84. – [введ. 01.01.1985]. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 33 с.
68. Рубчинский З.М., Тастевен Е.Э., Лынюк Л.С., Эглон Е.А. Устройство и работа моторвагонного подвижного состава.- М.: Транспорт, 1969.-352 с.
69. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры [текст] / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2005. – 320 с.

70. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация: ГОСТ 8865-93 - ГОСТ 8865-93. – [введ. 01.01.1995]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. — 8 с.
71. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / М.Г. Зименков, Г.В. Розенберг, Е.М. Феськов. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 480 с.
72. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. /т.1 / под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
73. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей [текст] / И.А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
74. Технические особенности высокоскоростного поезда Velaro RUS / В.А. Гапанович, А.С. Назаров, А.Н. Яговкин, Е.Г. Янченко, С.В. Шулындин, О.Н. Назаров // Техника железных дорог - № 1 (5), 2009. – С. 37 – 49.
75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 - ГОСТ 6962-75. – [введ. 01.01.1977]. - М.: Издательство стандартов, 1976. – 7 с.
76. Худолій С.С. Підвищення ефективності роботи частотного електропривода шляхом керування за максимальною навантажувальною здатністю: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / С.С. Худолій. – Д., 2014. – 20 с.
77. Цукало, П.В., Просвирин, Б.К. Эксплуатация электропоездов: Справочник / П.В. Цукало, Б.К. Просвирин. – М.: Транспорт, 1994. – 383 с.
78. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576с.
79. Чунихин, А.А. Электрические аппараты (общий курс). Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов / А.А. Чунихин. – М.: Энергия, 1975. – 648с.

- 80.Шенфер, К.И. Асинхронные машины [текст] / К.И. Шенфер. – М.:Энергоиздат, 1934. – 420 с.
- 81.Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97 - ГОСТ 13109-97. – [введ. 01.01.1999]. – М.: Стандартиформ, 2006. – 35 с.
- 82.Электрические железные дороги. Под ред. А.В. Плакса, В.Н. Пупынина. - М.: Транспорт, 1993. 280 с.
- 83.Электровоз ВЛ80к. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1978. – 432с.
- 84.Электропоезд ЭР9М. Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1978. – 328с.
- 85.Электропоезда переменного тока: Учебное пособие для ПТУ / М.М. Авдеев, В.А. Гут, В.И. Томчук, В.А. Хряев. – М.: Транспорт, 1985. – 368с.
- 86.Электропоезда. Механическая часть, тяговые двигатели и вспомогательные машины. Системы обслуживания и ремонта / В.М. Амелин, Ю.М. Иньков, М.И. Озеров, В.Н. Ротанов, А.А. Рубцов, Е.К. Рыбников, Я.И. Шур. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2000. – 200 с.
- 87.Электропоезда. Учебник для техн. школ ж.-д. трансп. / З.М. Рубчинский, С.И. Соколов, Е.А. Эглон, Л.С. Лынюк. – М.: Транспорт, 1983. – 415с.

ДОДАТОК А

Акти впровадження результатів дослідження



ЗАТВЕРДЖУЮ:
Головний інженер
ПрАТ «КЕВРЗ»
С. В. Ковальчук

АКТ

**про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Балійчука Олексія Юрійовича «Підвищення працездатності допоміжних
машин електропоїздів змінного струму»**

м. Київ

«___» листопада 2015 р.

Цей акт складений про те, що на ПрАТ «Київський електровагоноремонтний завод ім. Січневого повстання 1918 року» прийняті до розгляду на предмет впровадження деякі матеріали, викладені у дисертації Балійчука О.Ю., щодо визначення ємності конденсаторних батарей симетруючих пристроїв для підвищення якості електричної енергії, якою живляться допоміжні машини електропоїздів змінного струму серії EP9M.

**Заступник головного технолога
з ремонту електричних машин**

В. М. Тарасюк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
ім. акад. В. Лазаряна

_____ Б.Є. Боднар

АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Балійчука Олексія Юрійовича «Підвищення працездатності допоміжних
машин електропоїздів змінного струму»

м. Дніпропетровськ

«___» _____ 2015 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені у дисертації Балійчука О.Ю.

1. Визначення впливу показників якості живлячої енергії (несиметрії системи лінійних напруг та відхилення напруги від номінального значення) на перегрів асинхронних двигунів (дисципліна «Електричні машини», для студентів 3-го курсу спеціальності 7.05070204)
2. Розробка дослідного зразку пристрою теплового захисту асинхронних двигунів на базі мікроконтролера (дисципліна «Електричні апарати» та «Мікропроцесорні пристрої» для студентів 3-го та 4-го курсів спеціальності 7.05070204)

Декан факультету
«Електрифікація залізниць»
докт. техн. наук, професор

А.М. Афанасов

ДОДАТОК Б

Довідка про капітальні ремонти допоміжних машин

ПрАТ «КЕВРЗ»

ПрАТ «КЕВРЗ»

ВГТ, ВТК

ДОВІДКА

03.11.2015 р

м. Київ

Дана в тому, що впродовж 2010 – 2012 р.р. виконано капітальний ремонт із повною заміною статорної обмотки допоміжних машин електропоїздів у кількості:

Тип електричної машини	2010	2011	2012
2ТТ-16/10-01	21	33	47
ум. № 548	28	23	14
АОМ 32-4	30	14	6
АОМ 22-2	7	2	7
Всього	86	72	74

Причини виходу з ладу допоміжних машин:

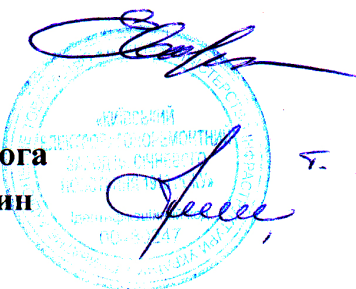
Тип ушкодження	2010	2011	2012
Міжвиткове замикання в обмотці статора	43	36	38
Замикання обмотки фази на землю	17	14	15
Коротке замикання між фазами	21	18	19
Інші	5	4	3

**Начальник відділу
технічного контролю**

Ю. В. Коробенко

**Заступник головного технолога
з ремонту електричних машин**

В. М. Тарасюк



ДОДАТОК В

Випробування електротеплових реле на точність спрацювання

Випробування електротеплових реле типу ТРТ-115 на точність спрацювання виконується відповідно до [ГОСТ 16308 Реле электротепловые токовые. Общие технические условия].

Відповідно до стандарту при перевірці та регулюванні електротеплових реле виконується зняття характеристики струму спрацювання в функції витримки часу в холодному стані та в попередньо нагрітому стані.

Перевірка електротеплових реле виконується за наступною методикою:

1. Виконують зовнішній огляд досліджуваного зразка теплового реле;
2. Збирають випробувальну схему, як показано на рис. В.1.
3. Замикають контактор *КМ*;
4. За допомогою автотрансформатору *Т* виставляють за показанням амперметра струм $I = 1,5I_{\text{ном}}$ і починають відлік часу спрацювання за допомогою секундоміру;
5. Фіксують час спрацювання по факту розмикання контактів контактора *КМ*;
6. Після охолодження нагрівального елемента повторюють п.п. 3, 4, 5 для інших значень струму спрацювання $I = (1,5 \dots 7)I_{\text{ном}}$ для кожного дослідного зразка.

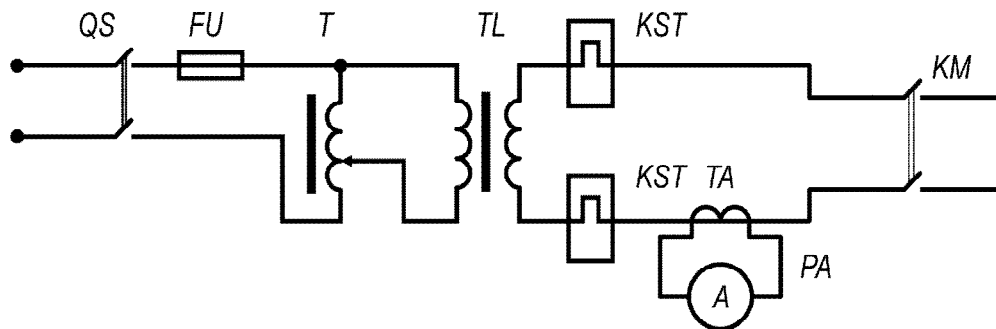


Рис. В.1. Схема випробування теплових реле

До випробувальної схеми входять наступні елементи:

Т – лабораторний автотрансформатор типу ЛАТР $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{ном}} = 4,5 \text{ А}$

ТЛ – трансформатор однофазний понижуючий 220/12 В;

T_A – вимірювальний трансформатор струму типу И54 зав. № 24532, клас точності 0,2;

P_A – амперметр типу зав. № 349748, клас точності 0,5;

Випробування проводились на п'яти зразках теплових реле типу ТРТ-115 зав. №№ 0711916, 0711954, 0713529, 0713702, 1215190.

Для контролю часу спрацювання теплового реле використовується електронний секундомір типу СЭЦ 10000Щ із похибкою вимірювання 0,1с, що відповідає вимогам стандарту стосовно точності визначення часу спрацювання і неспрацювання і не перевищує 10%.

Для кожного теплового реле відповідно до наведеної вище методики виконано зняття характеристики струму спрацювання в функції витримки часу спрацювання (часострумової характеристики) в діапазоні значень відношення $I/I_{\text{ном}}$ від 1,5 до 7. Кількість дослідів для кожного зразку теплового реле - 5.

Реле досліджувалось без попереднього нагріву при температурі навколишнього середовища 20°C.

Усереднені результати випробувань кожного зразка теплового реле наведено в таблиці В.1.

Таблиця В.1

Середній час спрацювання теплового реле за зразками

Кратність струму нагрівального елементу, $I/I_{\text{ном}}$	Час спрацювання реле за зразками				
	0711916	0711954	0713529	0713702	125190
	t, сек	t, сек	t, сек	t, сек	t, сек
1,5	351,04	217,68	330,58	248,92	242,5
2	84,228	73,466	84,148	74,124	76,166
3	32,34	28,512	31,04	26,42	28,614
4	16,388	14,322	16,578	15,56	15,59
5	9,836	8,952	9,244	9,218	9,25
6	6,934	6,07	6,58	6,248	6,654
7	4,76	4,484	4,508	4,408	4,728

За результатами вимірювань побудовано множини часострумових характеристик для кожного зразку реле .

Для реле зав. № 0711916 множину характеристик наведено на рис. В.2.

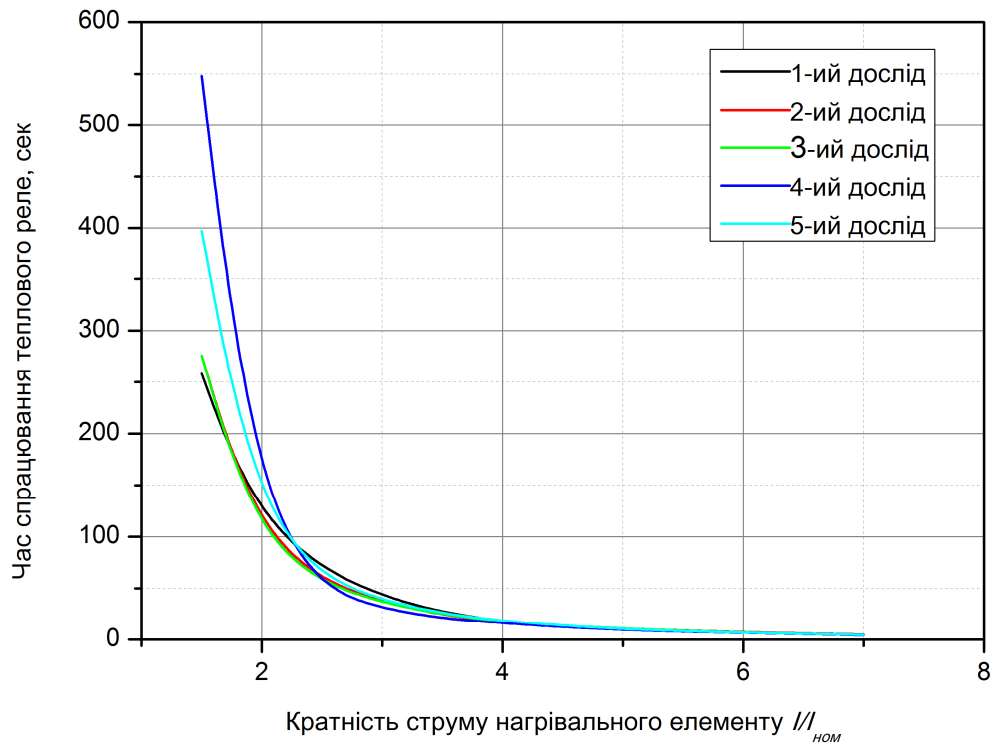


Рис. В.2. Множина часострумових характеристик теплового реле ТРТ-115 зав. № 0711916

Середня часострумова характеристика для ТРТ-115 зав. № 0711916 наведена на рис. В.3.

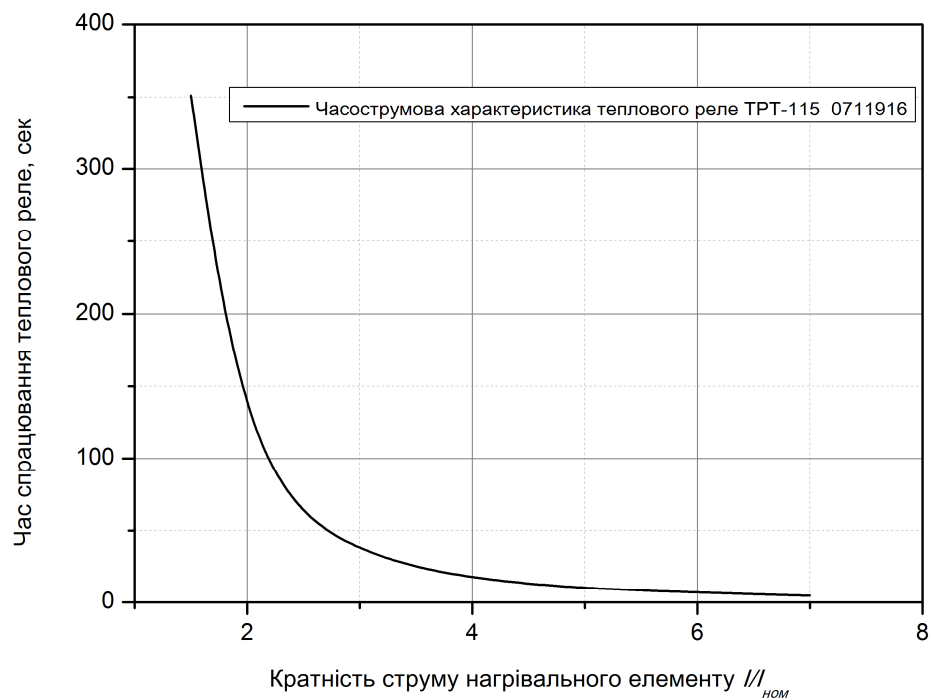


Рис. В.3. Середня часострумова характеристика теплового реле ТРТ-115 зав. № 0711916

Множина характеристик за результатами випробування теплового реле зав. № 0711954 наведено на рис. В.4.

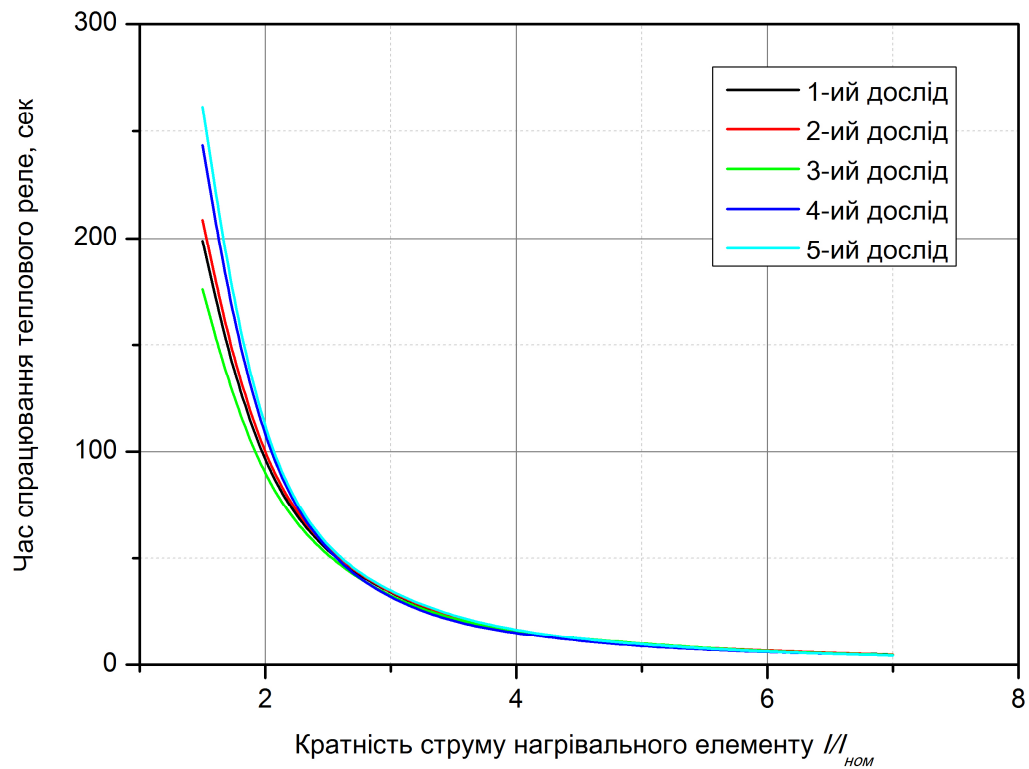


Рис. В.4. Множина часострумівих характеристик теплового реле ТРТ-115 зав. № 0711954

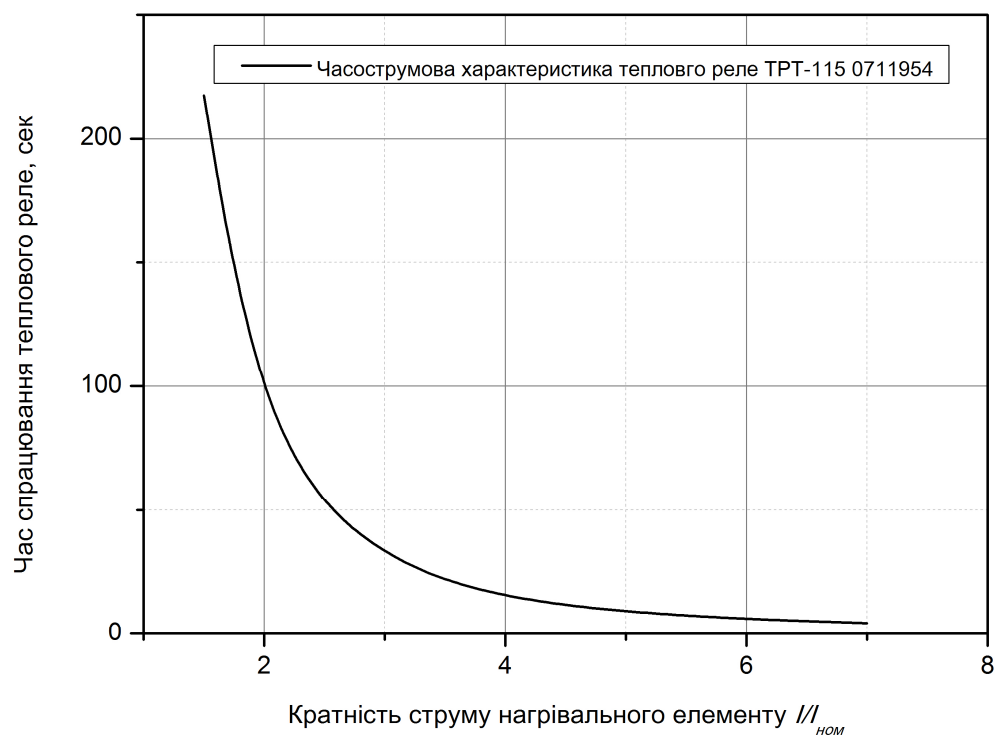


Рис. В.5. Середня часострумівих характеристика теплового реле ТРТ-115 зав. № 0711954

Характеристики для реле зав. № 0713529 наведено на рис. В.6 і рис. В.7.

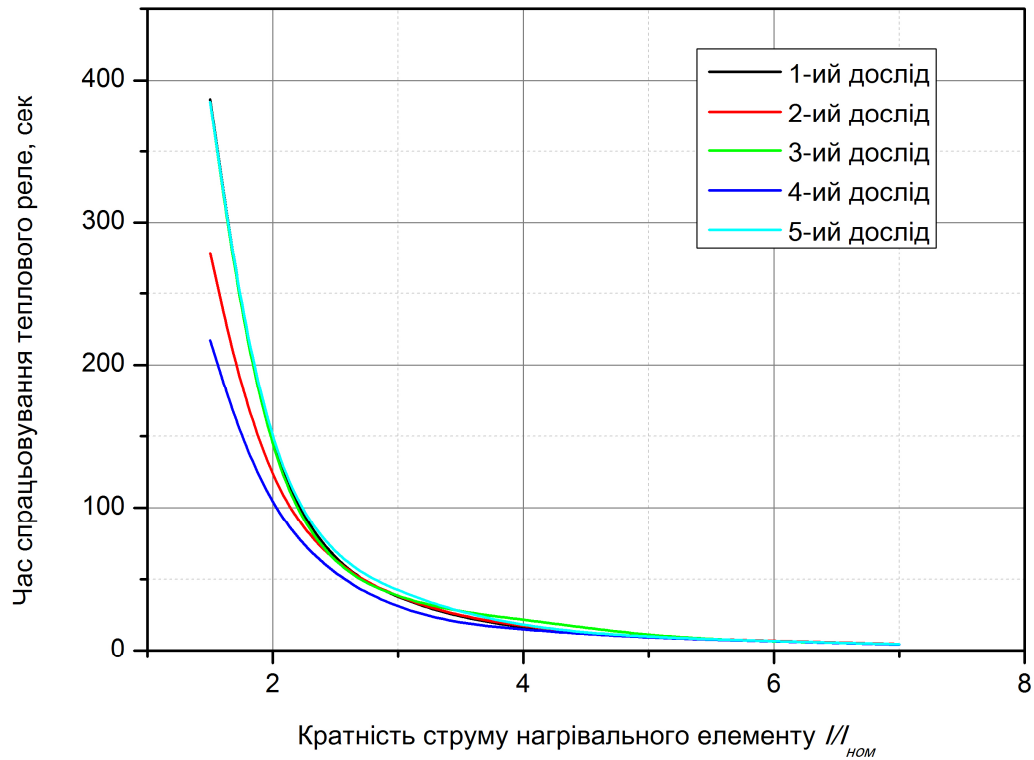


Рис. В.6. Множина часострумівих характеристик теплового реле ТРТ-115 зав. № 0713529

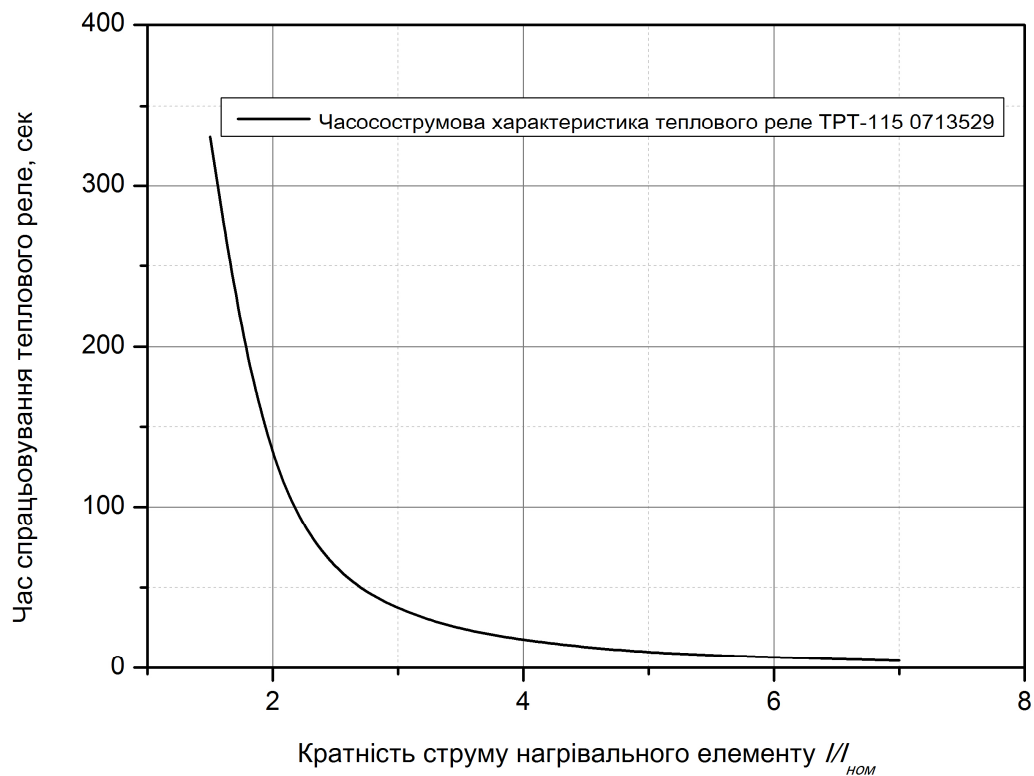


Рис. В.7. Середня часострумівих характеристика теплового реле ТРТ-115 зав. № 0713529

Характеристики для теплового реле ТРТ-115 зав. № 0713702 представлено на рис. В.8 і рис. В.9.

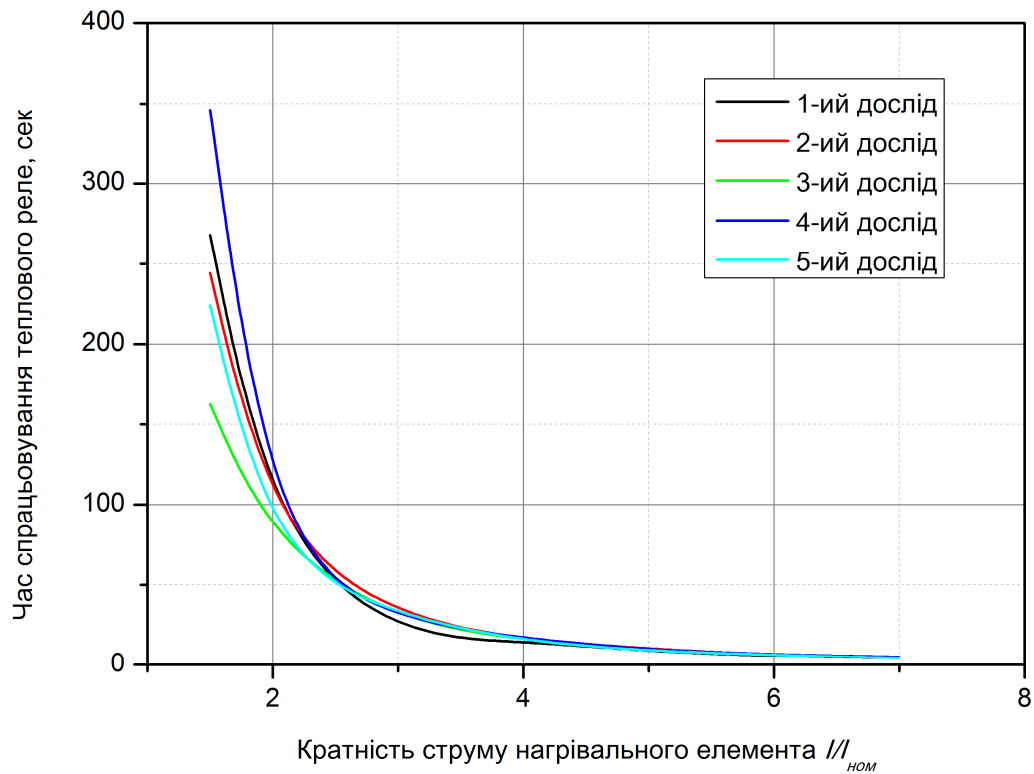


Рис. В.8. Множина часострумових характеристик теплового реле ТРТ-115 зав. № 0713702

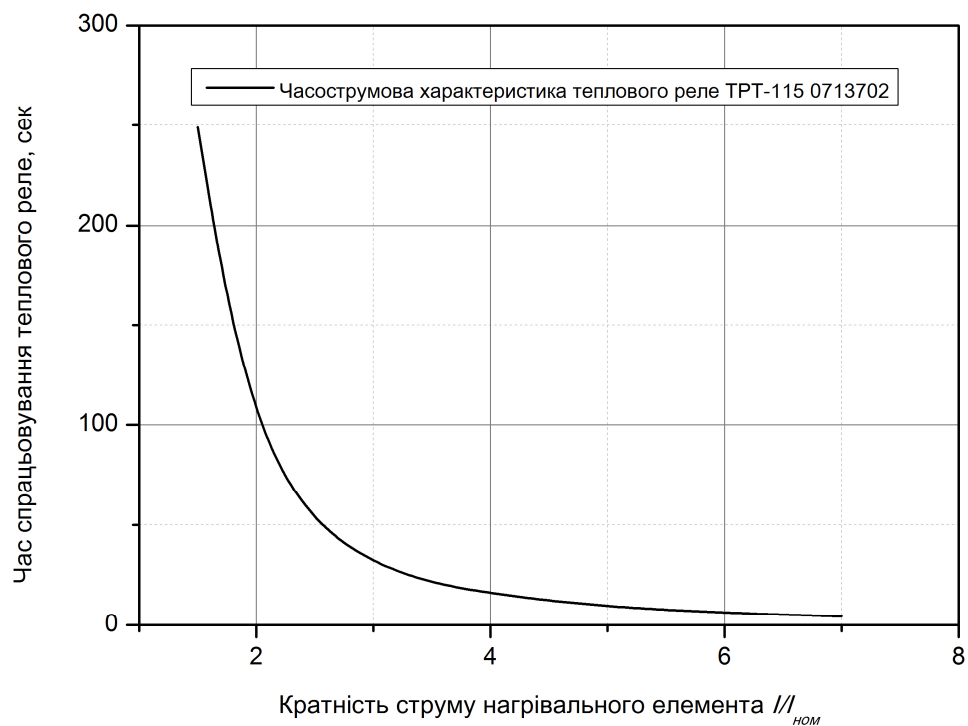


Рис. В.9. Середня часострумова характеристика теплового реле ТРТ-115 зав. № 0713702

Характеристики теплового реле зав. № 125190 приведено на рис. В.10 і рис. В.11.

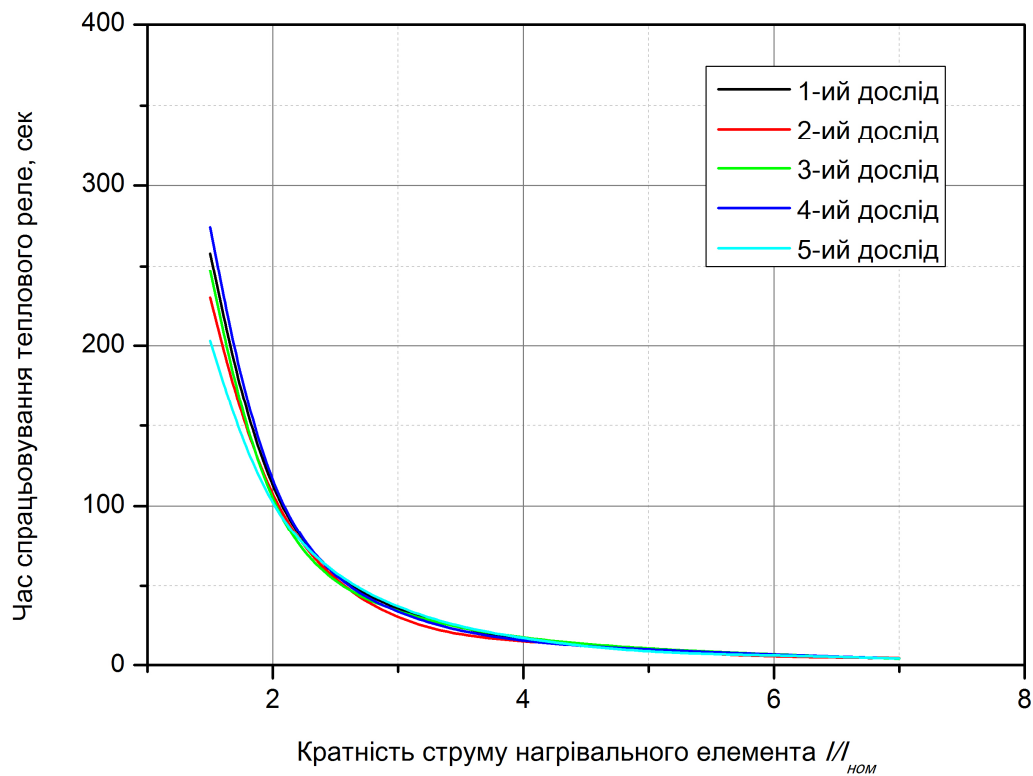


Рис. В.10. Множина часострумових характеристик теплового реле ТРТ-115 зав. № 125190

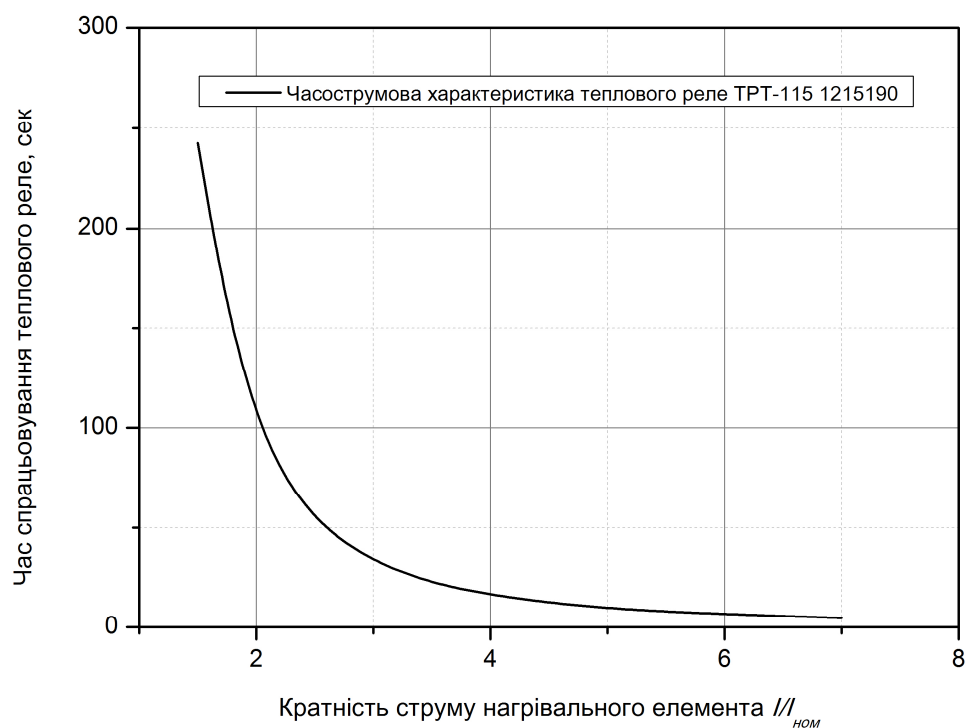


Рис. В.11. Середня часострумова характеристика теплового реле ТРТ-115 зав. № 125190

В табл. В.2. Наведено результати усереднення часострумівих характеристик окремих зразків теплових реле.

Таблиця В.2

Середнє експериментальне значення часу спрацювання теплових реле типу ТРТ-115

Кратність струму нагрівального елемента, $I/I_{\text{ном}}$	Середній час спрацювання теплового реле типу ТРТ-115
	t , сек
1,5	278,144
2	78,4264
3	29,3852
4	15,6876
5	9,3
6	6,4972
7	4,5776

За даними з табл. В.2 і паспортом на теплові реле типу ТРТ-115 побудовано криві часострумівих характеристик, які зображено на рис. В.12

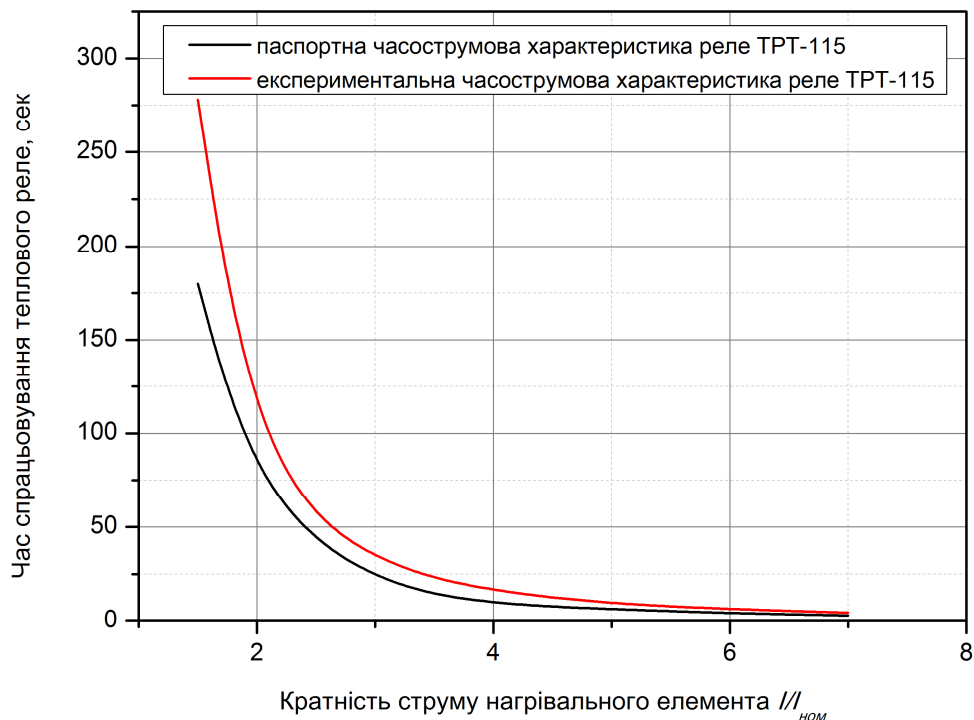


Рис. В.12. Порівняння паспортних та експериментальних часострумівих характеристик електротеплових реле типу ТРТ-115

Точність спрацювання реле, відповідно до ГОСТ 9219 визначається відхиленням уставки δ при нормальних кліматичних умовах випробування

$$\delta = \frac{M - T}{T} \cdot 100,$$

де T – номінальне значення величини уставки;

M – середнє арифметичне значення ряду величин спрацювання.

Для кожної точки експериментально визначеної часопротокової характеристики теплового реле, що відповідає певному значенню відношення $\frac{I}{I_{\text{ном}}}$, визначимо похибку часу спрацювання у порівнянні із паспортною характеристикою за наведеною вище формулою. Результати розрахунків наведемо в табл. В.3.

Таблиця В.3

Визначення похибки часу спрацювання теплових реле типу ТРТ-115

Кратність струму нагрівального елемента, $I/I_{\text{ном}}$	Середній час спрацювання теплового реле типу ТРТ-115	Паспортний час спрацювання реле ТРТ-115	Похибка спрацювання
	t, сек	t, сек	δ , %
1,5	278,144	180	54,5%
2	78,4264	65	20,7%
3	29,3852	19	54,7%
4	15,6876	9	74,3%
5	9,3	6,5	43,1%
6	6,4972	4,3	51,1%
7	4,5776	3,2	43,1%

Результати розрахунків також графічно представимо у вигляді гістограм на рис. В.13.

Як видно із табл. В.3 та рис В.13 значення похибки часу спрацювання не є сталим і стохастично змінюється при зміні кратності струму нагрівального

елемента теплового реле. Значення δ коливається в межах від 20,7% до 74,3%. Середнє значення похибки часу спрацювання досліджуваного теплового реле типу ТРТ-115 становить 48,8%.

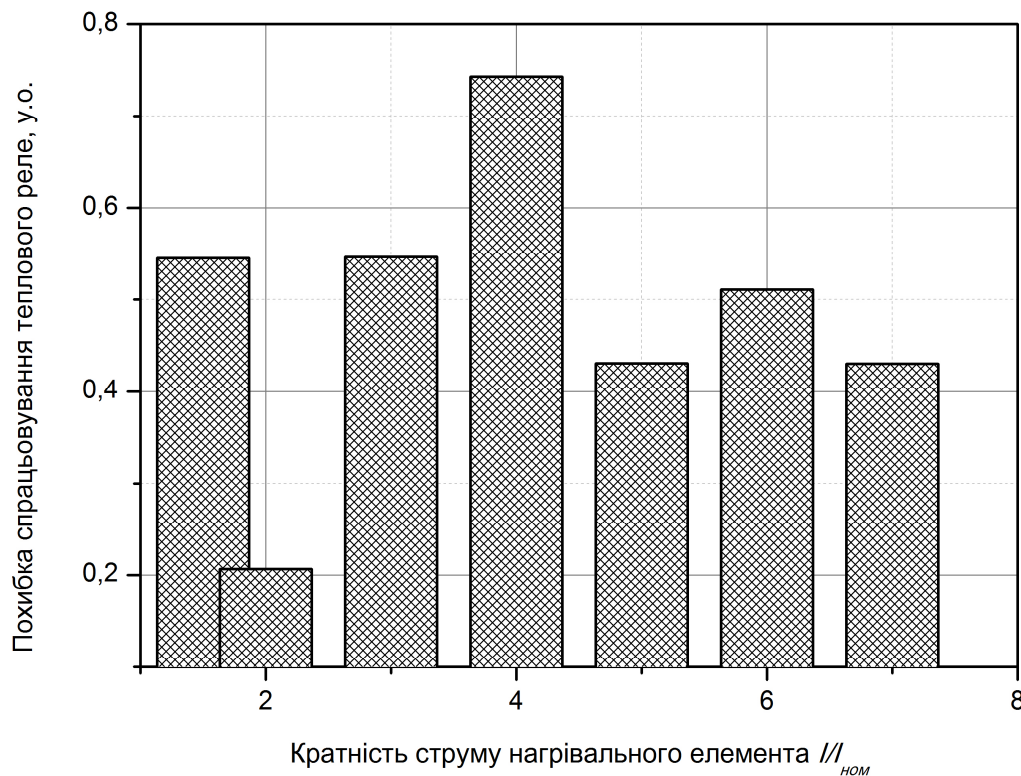


Рис. В.13. Похибка спрацювання теплового реле типу ТРТ-115

Відповідно до методики випробування електротеплових реле налаштування реле вважається задовільним, якщо час спрацювання зразку реле у порівнянні із еталоном не перевищує 10%. Зважаючи на це, можливим є висновок про те, що теплові реле, представлені на випробування не задовольняють вимогам технічних умов на реле електротеплової дії і повинно бути виконано їх налаштування. При неможливості під час налаштування досягти значень похибки часу спрацювання менше 10% дане теплове реле повинно бути замінено іншим, похибка спрацювання якого відповідає вказаним нормативно-технічним документам.

ДОДАТОК Д

**Визначення числових значень залежності коефіцієнта
несиметрії від електричного навантаження фазорозщеплювача
при проміжних значеннях напруги**

Таблиця В.1

Визначення числових значень залежності коефіцієнта
несиметрії від електричного навантаження фазорозщеплювача
при проміжних значеннях напруги

Потужність навантаження P_1 , кВт	Значення коефіцієнта несиметрії k_{2u} [%] при різних значеннях напруги живлення, В											
	160,0	161,0	162,0	163,0	164,0	165,0	166,0	167,0	168,0	169,0	170,0	171,0
0	5,433	5,431	5,430	5,428	5,426	5,425	5,423	5,421	5,420	5,418	5,417	5,415
1	4,599	4,600	4,601	4,601	4,602	4,603	4,603	4,604	4,605	4,605	4,606	4,607
2	3,893	3,892	3,891	3,890	3,889	3,888	3,887	3,886	3,885	3,884	3,883	3,882
3	3,419	3,415	3,411	3,407	3,403	3,400	3,396	3,392	3,388	3,384	3,381	3,377
4	3,431	3,422	3,414	3,404	3,396	3,388	3,379	3,370	3,362	3,353	3,345	3,336
5	3,707	3,695	3,682	3,668	3,655	3,643	3,630	3,617	3,603	3,591	3,578	3,565
6	4,227	4,211	4,194	4,175	4,158	4,141	4,124	4,107	4,089	4,072	4,055	4,037
7	4,870	4,849	4,828	4,805	4,784	4,763	4,742	4,720	4,698	4,677	4,657	4,635
8	5,503	5,479	5,455	5,428	5,404	5,380	5,355	5,330	5,304	5,280	5,256	5,231
9	6,012	5,986	5,959	5,930	5,904	5,878	5,852	5,824	5,796	5,769	5,744	5,716
10	6,322	6,295	6,269	6,239	6,213	6,186	6,160	6,132	6,104	6,077	6,051	6,023
11	6,424	6,399	6,375	6,347	6,322	6,297	6,272	6,246	6,220	6,195	6,170	6,144
12	6,403	6,381	6,359	6,335	6,313	6,291	6,269	6,246	6,223	6,200	6,179	6,156
13	6,456	6,437	6,417	6,396	6,376	6,356	6,337	6,316	6,296	6,276	6,256	6,236
14	6,927	6,906	6,884	6,861	6,839	6,818	6,797	6,774	6,752	6,730	6,709	6,686

Продовження таблиці В.1

Потужність навантаження P_1 , кВт	Значення коефіцієнта несиметрії k_{2u} [%] при різних значеннях напруги живлення, В											
	172,0	173,0	174,0	175,0	176,0	177,0	178,0	179,0	180,0	181,0	182,0	183,0
0	5,413	5,412	5,410	5,408	5,407	5,405	5,404	5,402	5,400	5,399	5,397	5,395
1	4,607	4,608	4,609	4,609	4,610	4,611	4,611	4,612	4,613	4,613	4,614	4,614
2	3,881	3,880	3,879	3,878	3,877	3,876	3,875	3,874	3,873	3,872	3,871	3,870
3	3,373	3,369	3,365	3,361	3,358	3,354	3,350	3,346	3,342	3,338	3,335	3,331
4	3,327	3,319	3,310	3,301	3,293	3,284	3,275	3,266	3,258	3,250	3,241	3,232
5	3,552	3,539	3,526	3,513	3,500	3,487	3,474	3,460	3,448	3,435	3,422	3,409
6	4,021	4,003	3,986	3,968	3,951	3,934	3,916	3,898	3,881	3,864	3,847	3,830
7	4,614	4,592	4,571	4,549	4,528	4,506	4,484	4,462	4,442	4,421	4,400	4,378
8	5,206	5,181	5,157	5,131	5,107	5,082	5,056	5,031	5,007	4,982	4,958	4,933
9	5,690	5,662	5,636	5,608	5,582	5,554	5,527	5,499	5,473	5,447	5,420	5,393
10	5,996	5,968	5,942	5,914	5,887	5,859	5,831	5,803	5,777	5,750	5,724	5,696
11	6,119	6,093	6,068	6,042	6,017	5,991	5,965	5,938	5,914	5,889	5,864	5,838
12	6,134	6,111	6,089	6,066	6,044	6,021	5,998	5,975	5,953	5,931	5,909	5,886
13	6,216	6,196	6,176	6,156	6,136	6,115	6,095	6,074	6,055	6,035	6,015	5,995
14	6,665	6,642	6,621	6,599	6,577	6,555	6,532	6,510	6,488	6,467	6,445	6,423

Продовження таблиці В.1

Потужність навантаження P_1 , кВт	Значення коефіцієнта несиметрії k_{2u} [%] при різних значеннях напруги живлення, В											
	184,0	185,0	186,0	187,0	188,0	190,0	191,0	192,0	193,0	194,0	195,0	196,0
0	5,394	5,392	5,391	5,389	5,387	5,384	5,383	5,381	5,379	5,378	5,376	5,374
1	4,615	4,616	4,616	4,617	4,618	4,619	4,620	4,620	4,621	4,622	4,622	4,623
2	3,869	3,868	3,867	3,866	3,865	3,863	3,862	3,861	3,860	3,859	3,858	3,857
3	3,327	3,323	3,319	3,315	3,311	3,304	3,300	3,296	3,292	3,289	3,285	3,281
4	3,224	3,215	3,207	3,198	3,189	3,172	3,164	3,154	3,146	3,138	3,129	3,120
5	3,396	3,383	3,371	3,358	3,344	3,319	3,306	3,292	3,279	3,267	3,254	3,241
6	3,812	3,795	3,778	3,761	3,743	3,709	3,692	3,673	3,656	3,640	3,623	3,605
7	4,356	4,335	4,314	4,293	4,270	4,229	4,208	4,185	4,164	4,143	4,122	4,100
8	4,908	4,883	4,859	4,835	4,808	4,760	4,735	4,709	4,685	4,660	4,636	4,611
9	5,366	5,339	5,312	5,286	5,257	5,205	5,178	5,149	5,123	5,097	5,071	5,043
10	5,669	5,641	5,615	5,588	5,559	5,506	5,479	5,450	5,423	5,397	5,370	5,342
11	5,812	5,786	5,762	5,737	5,709	5,659	5,634	5,607	5,582	5,557	5,532	5,506
12	5,863	5,841	5,819	5,797	5,773	5,729	5,707	5,683	5,661	5,639	5,617	5,594
13	5,975	5,955	5,935	5,915	5,894	5,855	5,835	5,814	5,794	5,774	5,755	5,734
14	6,401	6,379	6,358	6,336	6,313	6,270	6,249	6,225	6,204	6,182	6,161	6,138

Продовження таблиці В.1

Потужність навантаження P_1 , кВт	Значення коефіцієнта несиметрії k_{2u} [%] при різних значеннях напруги живлення, В											
	209,0	210,0	211,0	212,0	213,0	214,0	215,0	216,0	217,0	218,0	219,0	220,0
0	5,353	5,352	5,350	5,348	5,347	5,345	5,343	5,342	5,340	5,339	5,337	5,335
1	4,632	4,632	4,633	4,633	4,634	4,635	4,635	4,636	4,637	4,637	4,638	4,639
2	3,843	3,842	3,841	3,840	3,839	3,838	3,837	3,836	3,835	3,834	3,833	3,832
3	3,231	3,227	3,223	3,220	3,216	3,212	3,208	3,204	3,200	3,197	3,193	3,189
4	3,008	3,000	2,991	2,983	2,973	2,965	2,957	2,948	2,939	2,930	2,922	2,914
5	3,072	3,060	3,046	3,034	3,020	3,007	2,995	2,982	2,968	2,955	2,943	2,930
6	3,379	3,363	3,346	3,329	3,310	3,293	3,276	3,259	3,241	3,224	3,207	3,190
7	3,821	3,801	3,779	3,759	3,736	3,715	3,694	3,673	3,650	3,629	3,608	3,587
8	4,288	4,265	4,239	4,215	4,188	4,164	4,140	4,116	4,089	4,065	4,041	4,016
9	4,692	4,667	4,639	4,613	4,584	4,558	4,532	4,505	4,476	4,450	4,424	4,397
10	4,987	4,962	4,934	4,908	4,878	4,852	4,825	4,799	4,769	4,743	4,716	4,690
11	5,173	5,150	5,124	5,099	5,071	5,046	5,021	4,997	4,969	4,944	4,919	4,894
12	5,301	5,280	5,257	5,235	5,211	5,189	5,167	5,145	5,121	5,099	5,077	5,055
13	5,473	5,454	5,433	5,414	5,392	5,373	5,353	5,333	5,312	5,292	5,273	5,253
14	5,852	5,832	5,810	5,788	5,765	5,743	5,722	5,700	5,677	5,655	5,634	5,613

Продовження таблиці В.1

Потужність навантаження P_1 , кВт	Значення коефіцієнта несиметрії k_{2u} [%] при різних значеннях напруги живлення, В											
	221,0	222,0	223,0	224,0	225,0	226,0	227,0	228,0	229,0	230,0	231,0	232,0
0	5,334	5,332	5,330	5,329	5,327	5,326	5,324	5,322	5,321	5,319	5,317	5,316
1	4,639	4,640	4,641	4,641	4,642	4,643	4,643	4,644	4,645	4,645	4,646	4,646
2	3,831	3,830	3,829	3,828	3,827	3,826	3,825	3,824	3,823	3,822	3,821	3,820
3	3,185	3,181	3,177	3,174	3,170	3,166	3,162	3,158	3,154	3,151	3,147	3,143
4	2,904	2,896	2,888	2,879	2,870	2,861	2,853	2,845	2,836	2,827	2,818	2,810
5	2,916	2,903	2,891	2,878	2,865	2,851	2,839	2,826	2,813	2,800	2,787	2,774
6	3,172	3,155	3,138	3,121	3,103	3,085	3,068	3,052	3,034	3,016	2,999	2,982
7	3,564	3,543	3,523	3,502	3,480	3,458	3,437	3,416	3,394	3,372	3,351	3,330
8	3,990	3,966	3,941	3,917	3,892	3,866	3,842	3,818	3,792	3,767	3,743	3,719
9	4,369	4,342	4,316	4,290	4,262	4,234	4,208	4,182	4,154	4,127	4,100	4,074
10	4,660	4,634	4,607	4,581	4,553	4,525	4,498	4,472	4,444	4,416	4,389	4,363
11	4,867	4,842	4,817	4,792	4,766	4,740	4,715	4,690	4,664	4,638	4,613	4,588
12	5,031	5,009	4,987	4,965	4,942	4,919	4,897	4,875	4,852	4,829	4,807	4,785
13	5,231	5,212	5,192	5,173	5,152	5,132	5,112	5,092	5,072	5,051	5,032	5,012
14	5,589	5,568	5,546	5,525	5,502	5,480	5,459	5,437	5,415	5,392	5,371	5,349

Продовження таблиці В.1

Потужність навантаження P_1 , кВт	Значення коефіцієнта несиметрії k_{2u} [%] при різних значеннях напруги живлення, В											
	233,0	234,0	234,0	235,0	236,0	237,0	238,0	240,0	241,0	242,0	243,0	244,0
0	5,314	5,313	5,313	5,311	5,309	5,308	5,306	5,303	5,301	5,300	5,298	5,296
1	4,647	4,648	4,648	4,648	4,649	4,650	4,650	4,652	4,652	4,653	4,654	4,654
2	3,819	3,818	3,818	3,817	3,816	3,815	3,814	3,812	3,811	3,810	3,809	3,808
3	3,139	3,135	3,135	3,131	3,128	3,124	3,120	3,112	3,109	3,104	3,101	3,097
4	2,801	2,793	2,792	2,784	2,776	2,767	2,758	2,741	2,733	2,723	2,715	2,707
5	2,761	2,748	2,748	2,735	2,722	2,710	2,696	2,670	2,658	2,644	2,631	2,619
6	2,965	2,948	2,947	2,930	2,913	2,896	2,878	2,844	2,827	2,808	2,791	2,774
7	3,309	3,288	3,287	3,266	3,245	3,224	3,202	3,159	3,138	3,115	3,094	3,074
8	3,693	3,669	3,668	3,644	3,619	3,595	3,570	3,520	3,496	3,469	3,445	3,421
9	4,046	4,020	4,019	3,993	3,966	3,940	3,912	3,858	3,832	3,803	3,777	3,751
10	4,335	4,308	4,307	4,280	4,254	4,227	4,199	4,145	4,118	4,089	4,062	4,036
11	4,562	4,537	4,536	4,511	4,486	4,461	4,435	4,384	4,359	4,331	4,306	4,281
12	4,762	4,740	4,739	4,717	4,695	4,673	4,650	4,605	4,583	4,559	4,537	4,515
13	4,991	4,972	4,971	4,951	4,932	4,912	4,891	4,851	4,832	4,810	4,791	4,771
14	5,327	5,305	5,304	5,283	5,262	5,240	5,218	5,174	5,152	5,129	5,107	5,086

Продовження таблиці В.1

Потужність навантаження P_1 , кВт	Значення коефіцієнта несиметрії k_{2u} [%] при різних значеннях напруги живлення, В											
	245,0	246,0	247,0	248,0	249,0	250,6	251,0	252,0	253,0	254,0	255,0	256,0
0	5,295	5,293	5,291	5,290	5,288	5,286	5,285	5,283	5,282	5,280	5,278	5,277
1	4,655	4,656	4,656	4,657	4,658	4,659	4,659	4,660	4,660	4,661	4,662	4,662
2	3,807	3,806	3,805	3,804	3,803	3,801	3,801	3,800	3,799	3,798	3,797	3,796
3	3,093	3,089	3,085	3,082	3,078	3,072	3,070	3,066	3,063	3,058	3,055	3,051
4	2,698	2,689	2,680	2,672	2,664	2,649	2,646	2,637	2,629	2,620	2,611	2,603
5	2,606	2,592	2,579	2,567	2,554	2,532	2,527	2,515	2,502	2,488	2,475	2,463
6	2,758	2,739	2,722	2,705	2,688	2,660	2,653	2,636	2,619	2,600	2,584	2,567
7	3,053	3,030	3,009	2,988	2,967	2,932	2,923	2,902	2,881	2,858	2,838	2,817
8	3,397	3,370	3,346	3,321	3,297	3,256	3,246	3,222	3,198	3,171	3,147	3,123
9	3,724	3,695	3,669	3,643	3,617	3,572	3,561	3,535	3,509	3,480	3,454	3,427
10	4,009	3,980	3,953	3,927	3,900	3,855	3,844	3,818	3,791	3,762	3,735	3,709
11	4,256	4,229	4,204	4,179	4,154	4,112	4,102	4,077	4,052	4,025	4,000	3,975
12	4,493	4,469	4,447	4,425	4,403	4,366	4,357	4,335	4,313	4,289	4,267	4,245
13	4,751	4,730	4,710	4,691	4,671	4,638	4,630	4,610	4,591	4,569	4,549	4,530
14	5,065	5,041	5,020	4,998	4,977	4,940	4,932	4,910	4,889	4,866	4,844	4,823

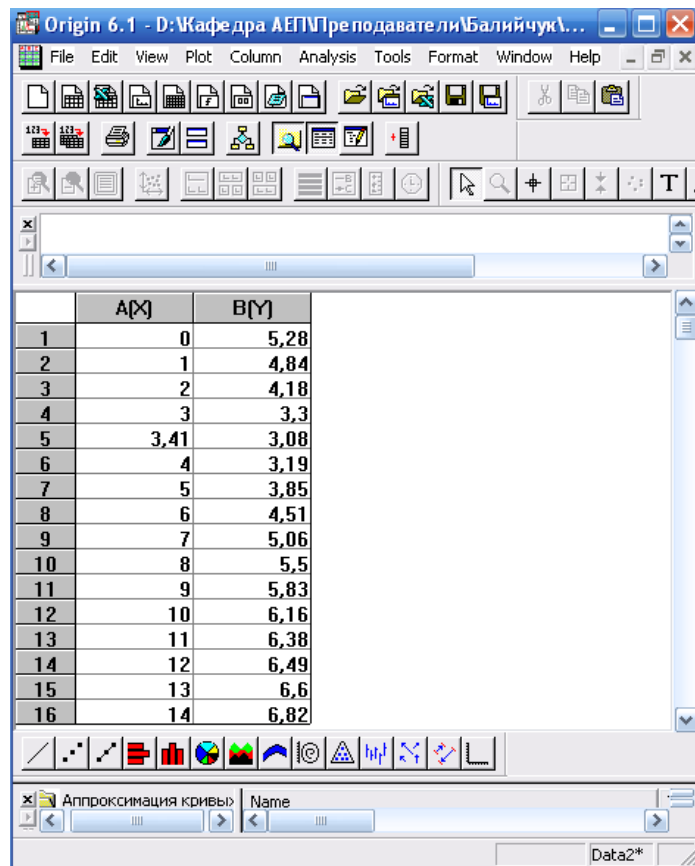
ДОДАТОК Є

Апроксимація емпіричної залежності аналітичним виразом за допомогою прикладного програмного середовища Origin 6.1

У вікні програми Origin 6.1 створюємо новий робочий лист (Worksheet), який являє собою таблицю із двома стовпчиками за замовчуванням.

Заповнюємо стовпчик $A(X)$ значеннями P із табл. 2.2 і визначаємо його як послідовність значень незалежної змінної x . Після цього аналогічно заповнюємо стовпчик $B(Y)$ значеннями K_{2U} із табл. 2.2. Стовпчик $B(Y)$ визначаємо як послідовність значень змінної y .

На рис. Є.1. показано фрагмент вікна програми Origin 6.1 із заповненим робочим листом.



	A[X]	B[Y]
1	0	5,28
2	1	4,84
3	2	4,18
4	3	3,3
5	3,41	3,08
6	4	3,19
7	5	3,85
8	6	4,51
9	7	5,06
10	8	5,5
11	9	5,83
12	10	6,16
13	11	6,38
14	12	6,49
15	13	6,6
16	14	6,82

Рис. Є.1. Фрагмент вікна програми Origin 6.1 із заповненим робочим листом

За даними робочого листа будуюмо графік функції $K_{2U} = f(P)$. Для цього виділяємо стовпці робочого листа, в строчці головного меню обираємо команду Plot і з випадаючого списку обраємо пункт Line так, як показано на рис. Д.2. У результаті описаних дій отримаємо графічне зображення функції $K_{2U} = f(P)$ в окремому вікні.

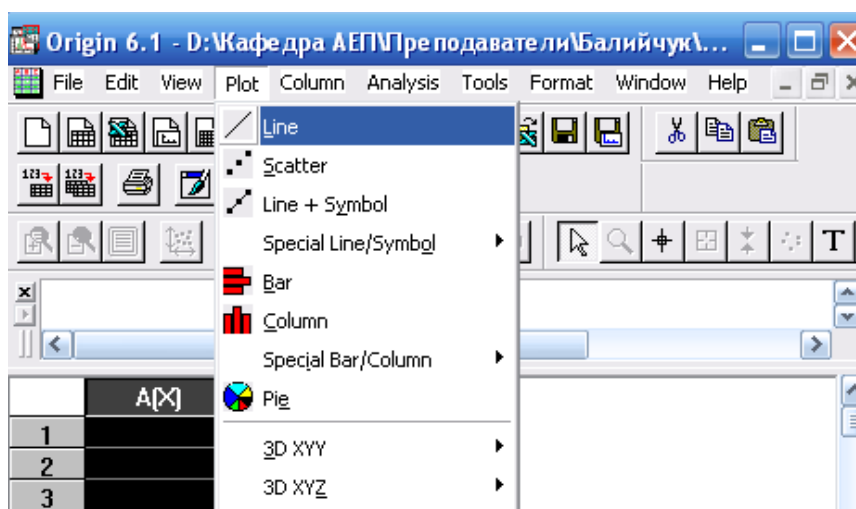


Рис. Є.2. Побудова графіка за даними робочого листа

Для того, щоб виконати апроксимацію многочленом отриманої кривої скористаємося пунктом головного меню Analysis, в якому вибираємо команду Fit Polynomial (див. рис. Є.3)

На рис. Є.4 зображено фрагмент вікна програми Origin із вікном налаштування команди Fit Polynomial. У полі Order прописуємо порядок многочлена, яким апроксимуємо криву, у полі Fit Curve # pts прописуємо бажану кількість точок кривої, якою скористається програма під час пошуку коефіцієнтів многочлена; в полях Fit Curve X min та Fit Curve X max – відповідно прописуємо мінімальне та максимальне значення незалежної змінної x для відповідної поліноміальної кривої (за замовчуванням заповнюються автоматично в залежності від максимального і мінімального значення змінної x функції, що апроксимується). Після виконання всіх налаштувань натискаємо кнопку «ОК».

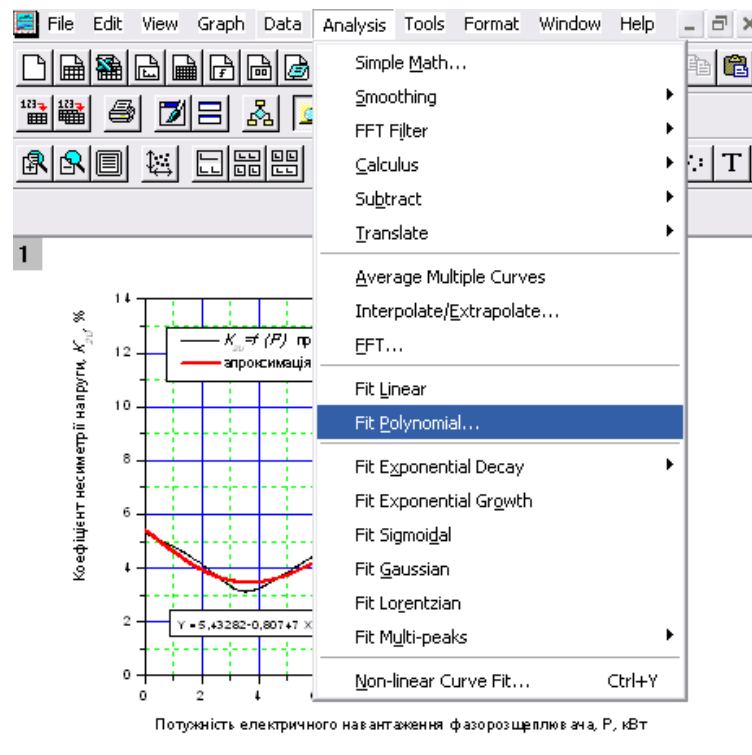


Рис. Є.3. Виклик пункту Fit Polynomial із пункту головного меню Analysis

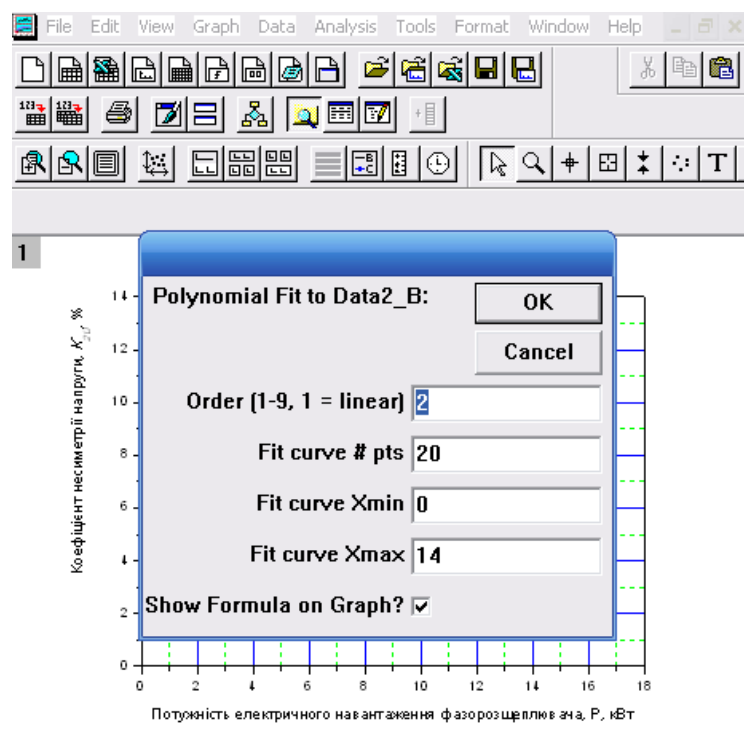


Рис. Є.4. Фрагмент вікна програми Origin 6.1 із вікном налаштувань команди Fit Polynomial

ДОДАТОК Ж

**Розрахунки нагріву асинхронних двигунів з
короткозамкненим ротором за допомогою математичного
процесора MathCad**

Лістинг розрахунку нагріву двигуна ум. № 548 в математичному процесорі MathCad

В даному файлі проводиться розрахунок нагріву асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором відповідно до методики, що наведено в п. 6-15 "Особенности теплового и вентиляционного расчета асинхронных двигателей" у джерелі **Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов. - М.: Энергия, 1980. с.234-240**

усл. № 548

Вихідні дані:
 $P_{\text{ном}} := 5000 \text{ Вт}$ $n_{\text{ном}} := 975$ $\frac{\text{об}}{\text{хв}}$ $\eta := 0.8$

Підведена до двигуна потужність

$$P_1 := \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = 6250 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в двигуні

$$\Sigma p := P_1 \cdot (1 - \eta) = 1.25 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Розподіл втрат за їх видами:

1. Електричні втрати в статорі $p_{\text{ел1}} := 0.3 \cdot \Sigma p = 375 \text{ Вт}$
2. Електричні втрати в роторі $p_{\text{ел2}} := 0.4 \cdot \Sigma p = 500 \text{ Вт}$
3. Втрати в магнітопроводі статора $p_{\text{ст}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 187.5 \text{ Вт}$
4. Механічні втрати $p_{\text{мех}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 187.5$

Довжина статора $l_1 := 135 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Діаметр статора $D_a := 368 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $D := 260 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Глибина пази $h_{\text{п}} := 28.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ $k_{\text{л}} := 1.2$ $B := 0.01$

Ширина котушки $b_{\text{кт}} := \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{п}})}{2} \cdot 1 = 0.454 \text{ м}$

Довжина лобової частини $l_{\text{л}} := k_{\text{л}} \cdot b_{\text{кт}} + 2 \cdot B = 0.564 \text{ м}$

Середня довжина витку $l_{\text{ср}} := 2 \cdot (l_1 + l_{\text{л}}) = 1.399 \text{ м}$

При класі В $k_{\rho} := 1.15$ **див. стор. 234**

Електричні втрати в статорі розділяються на

- втрати в пазовій частині $p'_{\text{ел1п}} := k_{\rho} \cdot p_{\text{ел1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср}}} = 83.244 \text{ Вт}$

- втрати в лобовій частині $p'_{ел1л} := k_p \cdot p_{ел1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л}}{l_{ср}} = 348.006 \text{ Вт}$

Коефіцієнт, що враховує, що частина втрат в осерді і в пазовій частині обмотки передається безпосередньо через станину

$$K := 0.19$$

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні $\alpha_1 := 90 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}}$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря в середині машини

$$\Delta v_{пов1} := K \cdot \frac{p'_{ел1п} + p_{ст}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 5.183 \text{ град. С}$$

Кількість пазів $Z_1 := 54$

Розміри пазу $b_1 := 11.9 \cdot 10^{-3}$ $b_2 := 8.7 \cdot 10^{-3}$

Розрахунковий периметр поперечного перерізу пазу

$$\Pi_{п} := 2 \cdot h_{п} + b_1 + b_2 = 0.078$$

Середня еквівалентна теплопровідність $\lambda_{екв} := 0.16$

Середній коефіцієнт теплопровідності ізоляції котушки

$$\lambda'_{екв} := 1.1$$

$$b_{из1} := 0.2 \cdot 10^{-3}$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора

$$\Delta v_{изп} := \frac{p'_{ел1п}}{Z_1 \cdot \Pi_{п} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{из1}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = 0.353 \text{ град. С}$$

$$b_{из1л} := 0$$

Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин

$$\Delta v_{\text{изл}} := \frac{p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{п}} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{\text{из1л}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h_{\text{п}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) = 0.666 \quad \text{град. С}$$

Довжина вильоту лобових частин обмотки $K_{\text{в}} := 0.26$

$$l_{\text{вил}} := K_{\text{в}} \cdot b_{\text{кт}} + B = 0.128 \quad \text{м}$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні ізоляції лобових частин обмотки над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v_{\text{повл}} := \frac{K \cdot p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1} = 3.515 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v'_1 := \frac{(\Delta v_{\text{повл}} + \Delta v_{\text{изп}}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta v_{\text{изл}} + \Delta v_{\text{повл}}) \cdot 2 \cdot l_{\text{л}}}{l_{\text{ср}}} = 4.443 \quad \text{град. С}$$

Еквівалента поверхня охолодження корпусу

$$S_{\text{кор}} := \pi \cdot D_{\text{а}} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{вил}}) = 0.452 \quad \text{м}^2$$

Сума втрат, що відводяться в повітря всередині машини

$$\Sigma p'_{\text{в}} := [\Sigma p + (k_{\text{р}} - 1) \cdot (p_{\text{ел1}} + p_{\text{ел2}})] - (1 - K) \cdot (p'_{\text{ел1л}} + p_{\text{ст}}) = 947.49 \quad \text{Вт}$$

Коефіцієнт підігріву повітря

$$\alpha_{\text{в}} := 54.5$$

Перевищення температури повітря всередині машини

$$\Delta v_{\text{в}} := \frac{\Sigma p'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{в}}} = 38.47 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою зовнішнього середовища

$$\Delta v_1 := \Delta v'_1 + \Delta v_{\text{в}} = 42.912 \quad \text{град. С}$$

Порівняння із методом узагальненої теплової моделі

Результати розрахунку за методикою Жежеленка

$$\Theta_1 := 42.8$$

$$\text{Відносна похибка} \quad \Delta := \left| \frac{\Theta_1 - \Delta v_1}{\Theta_1} \right| \cdot 100 = 0.262$$

Лістинг розрахунку нагріву двигуна 2ТТ-16/10-01 в математичному процесорі MathCad

В даному файлі проводиться розрахунок нагріву асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором відповідно до методики, що наведено в п. 6-15 "Особенности теплового и вентиляционного расчета асинхронных двигателей" у джерелі **Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов. - М.: Энергия, 1980. с.234-240**

2 ТТ-16/10-01

Вихідні дані:
 $P_{\text{ном}} := 820 \text{ Вт}$ $n_{\text{ном}} := 2900 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ $\eta := 0.45$

Підведена до двигуна потужність

$$P_1 := \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = 1822 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в двигуні

$$\Sigma p := P_1 \cdot (1 - \eta) = 1.002 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Розподіл втрат за їх видами:

1. Електричні втрати в статорі $p_{\text{ел1}} := 0.3 \cdot \Sigma p = 300.667 \text{ Вт}$
2. Електричні втрати в роторі $p_{\text{ел2}} := 0.4 \cdot \Sigma p = 400.889 \text{ Вт}$
3. Втрати в магнітопроводі статора $p_{\text{ст}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 150.333 \text{ Вт}$
4. Механічні втрати $p_{\text{мех}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 150.333$

Довжина статора $l_1 := 90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Діаметр статора $D_a := 153 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $D := 86 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Глибина пазу $h_{\text{п}} := 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $k_{\text{л}} := 1.2$ $B := 0.01$

Ширина котушки $b_{\text{кт}} := \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{п}})}{2} \cdot 1 = 0.159 \text{ м}$

Довжина лобової частини $l_{\text{л}} := k_{\text{л}} \cdot b_{\text{кт}} + 2 \cdot B = 0.21 \text{ м}$

Середня довжина витку $l_{\text{ср}} := 2 \cdot (l_1 + l_{\text{л}}) = 0.601 \text{ м}$

При класі В $k_{\rho} := 1.15$ **див. стор. 234**

Електричні втрати в статорі розділяються на

- втрати в пазовій частині $p'_{\text{ел1п}} := k_{\rho} \cdot p_{\text{ел1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср}}} = 103.599 \text{ Вт}$

- втрати в лобовій частині $p'_{ел1л} := k_p \cdot p_{ел1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л}}{l_{ср}} = 242.168 \text{ Вт}$

Коефіцієнт, що враховує, що частина втрат в осерді і в пазовій частині обмотки передається безпосередньо через станину

$$K := 0.22$$

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні $\alpha_1 := 150 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}}$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря в середині машини

$$\Delta v_{пов1} := K \cdot \frac{p'_{ел1п} + p_{ст}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 15.316 \text{ град. С}$$

Кількість пазів $Z_1 := 24$

Розміри пазу $b_1 := 9.7 \cdot 10^{-3}$ $b_2 := 7.8 \cdot 10^{-3}$

Розрахунковий периметр поперечного перерізу пазу

$$\Pi_{п} := 2 \cdot h_{п} + b_1 + b_2 = 0.048$$

Середня еквівалентна теплопровідність $\lambda_{екв} := 0.16$

Середній коефіцієнт теплопровідності ізоляції котушки

$$\lambda'_{екв} := 1.1$$

$$b_{из1} := 0.2 \cdot 10^{-3}$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора

$$\Delta v_{изп} := \frac{p'_{ел1п}}{Z_1 \cdot \Pi_{п} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{из1}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = 2.266 \text{ град. С}$$

$$b_{из1л} := 0$$

Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин

$$\Delta v_{\text{изл}} := \frac{p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{п}} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{\text{из1л}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h_{\text{п}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) = 1.341 \quad \text{град. С}$$

Довжина вильоту лобових частин обмотки $K_{\text{в}} := 0.26$

$$l_{\text{вил}} := K_{\text{в}} \cdot b_{\text{кт}} + B = 0.051 \quad \text{м}$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні ізоляції лобових частин обмотки над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v_{\text{повл}} := \frac{K \cdot p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1} = 12.826 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v'_1 := \frac{(\Delta v_{\text{повл}} + \Delta v_{\text{изп}}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta v_{\text{изл}} + \Delta v_{\text{повл}}) \cdot 2 \cdot l_{\text{л}}}{l_{\text{ср}}} = 15.19 \quad \text{град. С}$$

Еквівалента поверхня охолодження корпусу

$$S_{\text{кор}} := \pi \cdot D_{\text{а}} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{вил}}) = 0.093 \quad \text{м}^2$$

Сума втрат, що відводяться в повітря всередині машини

$$\Sigma p'_{\text{в}} := [\Sigma p + (k_{\text{р}} - 1) \cdot (p_{\text{ел1}} + p_{\text{ел2}})] - (1 - K) \cdot (p'_{\text{ел1л}} + p_{\text{ст}}) = 801.304 \quad \text{Вт}$$

Коефіцієнт підігріву повітря

$$\alpha_{\text{в}} := 80$$

Перевищення температури повітря всередині машини

$$\Delta v_{\text{в}} := \frac{\Sigma p'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{в}}} = 108.253 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою зовнішнього середовища

$$\Delta v_1 := \Delta v'_1 + \Delta v_{\text{в}} = 123.443 \quad \text{град. С}$$

Лістинг розрахунку нагріву двигуна АОМ 32-4 в математичному процесорі MathCad

В даному файлі проводиться розрахунок нагріву асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором відповідно до методики, що наведено в п. 6-15 "Особенности теплового и вентиляционного расчета асинхронных двигателей" у джерелі **Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов. - М.: Энергия, 1980. с.234-240**

АОМ 32-4

Вихідні дані:
 $P_{\text{ном}} := 1500 \text{ Вт}$ $n_{\text{ном}} := 1390 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ $\eta := 0.7$

Підведена до двигуна потужність

$$P_1 := \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = 2143 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в двигуні

$$\Sigma p := P_1 \cdot (1 - \eta) = 642.857 \text{ Вт}$$

Розподіл втрат за їх видами:

1. Електричні втрати в статорі $p_{\text{ел1}} := 0.3 \cdot \Sigma p = 192.857 \text{ Вт}$
2. Електричні втрати в роторі $p_{\text{ел2}} := 0.4 \cdot \Sigma p = 257.143 \text{ Вт}$
3. Втрати в магнітопроводі статора $p_{\text{ст}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 96.429 \text{ Вт}$
4. Механічні втрати $p_{\text{мех}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 96.429$

$$\text{Довжина статора } l_1 := 90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\text{Діаметр статора } D_a := 145 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad D := 89 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\text{Глибина пазу } h_{\text{п}} := 14.8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad k_{\text{л}} := 1.2 \quad B := 0.01$$

$$\text{Ширина котушки } b_{\text{кт}} := \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{п}})}{2} \cdot 1 = 0.163 \text{ м}$$

$$\text{Довжина лобової частини } l_{\text{л}} := k_{\text{л}} \cdot b_{\text{кт}} + 2 \cdot B = 0.216 \text{ м}$$

$$\text{Середня довжина витку } l_{\text{ср}} := 2 \cdot (l_1 + l_{\text{л}}) = 0.611 \text{ м}$$

$$\text{При класі В } k_{\rho} := 1.15 \text{ див. стор. 234}$$

Електричні втрати в статорі розділяються на

$$\text{– втрати в пазовій частині } p'_{\text{ел1п}} := k_{\rho} \cdot p_{\text{ел1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср}}} = 65.304 \text{ Вт}$$

- втрати в лобовій частині $p'_{ел1л} := k_p \cdot p_{ел1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л}}{l_{ср}} = 156.482 \text{ Вт}$

Коефіцієнт, що враховує, що частина втрат в осерді і в пазовій частині обмотки передається безпосередньо через станину

$$K := 0.20$$

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні $\alpha_1 := 90 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}}$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря в середині машини

$$\Delta v_{пов1} := K \cdot \frac{p'_{ел1п} + p_{ст}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 14.282 \text{ град. С}$$

Кількість пазів $Z_1 := 24$

Розміри пазу $b_1 := 9.6 \cdot 10^{-3}$ $b_2 := 7 \cdot 10^{-3}$

Розрахунковий периметр поперечного перерізу пазу

$$\Pi_{п} := 2 \cdot h_{п} + b_1 + b_2 = 0.046$$

Середня еквівалентна теплопровідність $\lambda_{екв} := 0.16$

Середній коефіцієнт теплопровідності ізоляції котушки

$$\lambda'_{екв} := 1.1$$

$$b_{из1} := 0.2 \cdot 10^{-3}$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора

$$\Delta v_{изп} := \frac{p'_{ел1п}}{Z_1 \cdot \Pi_{п} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{из1}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = 1.435 \text{ град. С}$$

$$b_{из1л} := 0$$

Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин

$$\Delta v_{\text{изл}} := \frac{p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{п}} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{\text{из1л}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h_{\text{п}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) = 0.879 \quad \text{град. С}$$

Довжина вильоту лобових частин обмотки $K_{\text{в}} := 0.26$

$$l_{\text{вил}} := K_{\text{в}} \cdot b_{\text{кт}} + B = 0.052 \quad \text{м}$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні ізоляції лобових частин обмотки над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v_{\text{повл}} := \frac{K \cdot p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1} = 11.869 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v'_1 := \frac{(\Delta v_{\text{повл}} + \Delta v_{\text{изп}}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta v_{\text{изл}} + \Delta v_{\text{повл}}) \cdot 2 \cdot l_{\text{л}}}{l_{\text{ср}}} = 13.622 \quad \text{град. С}$$

Еквівалента поверхня охолодження корпусу

$$S_{\text{кор}} := \pi \cdot D_{\text{а}} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{вил}}) = 0.089 \quad \text{м}^2$$

Сума втрат, що відводяться в повітря всередині машини

$$\Sigma p'_{\text{в}} := [\Sigma p + (k_{\text{р}} - 1) \cdot (p_{\text{ел1}} + p_{\text{ел2}})] - (1 - K) \cdot (p'_{\text{ел1л}} + p_{\text{ст}}) = 508.029 \quad \text{Вт}$$

Коефіцієнт підігріву повітря

$$\alpha_{\text{в}} := 81.2$$

Перевищення температури повітря всередині машини

$$\Delta v_{\text{в}} := \frac{\Sigma p'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{в}}} = 70.511 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою зовнішнього середовища

$$\Delta v_1 := \Delta v'_1 + \Delta v_{\text{в}} = 84.134 \quad \text{град. С}$$

Порівняння із методом узагальненої теплової моделі

Результати розрахунку за методикою Жежеленка

$$\Theta_1 := 83.7$$

$$\text{Відносна похибка} \quad \Delta := \left| \frac{\Theta_1 - \Delta v_1}{\Theta_1} \right| \cdot 100 = 0.518$$

Лістинг розрахунку нагріву двигуна АОМ 22-2 в математичному процесорі MathCad

В даному файлі проводиться розрахунок нагріву асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором відповідно до методики, що наведено в п. 6-15 "Особенности теплового и вентиляционного расчета асинхронных двигателей" у джерелі **Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов. - М.: Энергия, 1980. с.234-240**

АОМ 22-2

Вихідні дані:
 $P_{\text{ном}} := 1000 \text{ Вт}$ $n_{\text{ном}} := 2850 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ $\eta := 0.81$

Підведена до двигуна потужність

$$P_1 := \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = 1235 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в двигуні

$$\Sigma p := P_1 \cdot (1 - \eta) = 234.568 \text{ Вт}$$

Розподіл втрат за їх видами:

1. Електричні втрати в статорі $p_{\text{ел1}} := 0.3 \cdot \Sigma p = 70.37 \text{ Вт}$
2. Електричні втрати в роторі $p_{\text{ел2}} := 0.4 \cdot \Sigma p = 93.827 \text{ Вт}$
3. Втрати в магнітопроводі статора $p_{\text{ст}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 35.185 \text{ Вт}$
4. Механічні втрати $p_{\text{мех}} := 0.15 \cdot \Sigma p = 35.185$

Довжина статора $l_1 := 85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Діаметр статора $D_a := 120 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $D := 64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Глибина пазу $h_{\text{п}} := 13.7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ $k_{\text{л}} := 1.2$ $B := 0.01$

Ширина котушки $b_{\text{кт}} := \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{п}})}{2} \cdot 1 = 0.122 \text{ м}$

Довжина лобової частини $l_{\text{л}} := k_{\text{л}} \cdot b_{\text{кт}} + 2 \cdot B = 0.166 \text{ м}$

Середня довжина витку $l_{\text{ср}} := 2 \cdot (l_1 + l_{\text{л}}) = 0.503 \text{ м}$

При класі В $k_{\rho} := 1.15$ **див. стор. 234**

Електричні втрати в статорі розділяються на

- втрати в пазовій частині $p'_{\text{ел1п}} := k_{\rho} \cdot p_{\text{ел1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср}}} = 27.355 \text{ Вт}$

- втрати в лобовій частині $p'_{ел1л} := k_p \cdot p_{ел1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л}}{l_{ср}} = 53.571 \text{ Вт}$

Коефіцієнт, що враховує, що частина втрат в осерді і в пазовій частині обмотки передається безпосередньо через станину

$$K := 0.22$$

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні $\alpha_1 := 110 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}}$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря в середині машини

$$\Delta v_{пов1} := K \cdot \frac{p'_{ел1п} + p_{ст}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 7.319 \text{ град. С}$$

Кількість пазів $Z_1 := 24$

Розміри пазу $b_1 := 8 \cdot 10^{-3}$ $b_2 := 6 \cdot 10^{-3}$

Розрахунковий периметр поперечного перерізу пазу

$$\Pi_{п} := 2 \cdot h_{п} + b_1 + b_2 = 0.041$$

Середня еквівалентна теплопровідність $\lambda_{екв} := 0.16$

Середній коефіцієнт теплопровідності ізоляції котушки

$$\lambda'_{екв} := 1.1$$

$$b_{из1} := 0.2 \cdot 10^{-3}$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора

$$\Delta v_{изп} := \frac{p'_{ел1п}}{Z_1 \cdot \Pi_{п} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{из1}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = 0.663 \text{ град. С}$$

$$b_{из1л} := 0$$

Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин

$$\Delta v_{\text{изл}} := \frac{p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\Pi} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{\text{из1л}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h_{\Pi}}{12 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) = 0.329 \quad \text{град. С}$$

Довжина вильоту лобових частин обмотки $K_B := 0.26$

$$l_{\text{вил}} := K_B \cdot b_{\text{КТ}} + B = 0.042 \quad \text{м}$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні ізоляції лобових частин обмотки над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v_{\text{повл}} := \frac{K \cdot p'_{\text{ел1л}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1} = 6.384 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині машини

$$\Delta v'_1 := \frac{(\Delta v_{\text{повл}} + \Delta v_{\text{изп}}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta v_{\text{изл}} + \Delta v_{\text{повл}}) \cdot 2 \cdot l_{\text{л}}}{l_{\text{ср}}} = 7.142 \quad \text{град. С}$$

Еквівалента поверхня охолодження корпусу

$$S_{\text{кор}} := \pi \cdot D_a \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{вил}}) = 0.064 \quad \text{м}^2$$

Сума втрат, що відводяться в повітря всередині машини

$$\Sigma p'_B := [\Sigma p + (k_p - 1) \cdot (p_{\text{ел1}} + p_{\text{ел2}})] - (1 - K) \cdot (p'_{\text{ел1л}} + p_{\text{ст}}) = 189.968 \quad \text{Вт}$$

Коефіцієнт підігріву повітря

$$\alpha_B := 94$$

Перевищення температури повітря всередині машини

$$\Delta v_B := \frac{\Sigma p'_B}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_B} = 31.821 \quad \text{град. С}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою зовнішнього середовища

$$\Delta v_1 := \Delta v'_1 + \Delta v_B = 38.963 \quad \text{град. С}$$

Порівняння із методом узагальненої теплової моделі

Результати розрахунку за методикою Жежеленка

$$\Theta_1 := 39.12$$

$$\text{Відносна похибка} \quad \Delta := \left| \frac{\Theta_1 - \Delta v_1}{\Theta_1} \right| \cdot 100 = 0.402$$