

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка пристрою для теплового захисту асинхронного двигуна від навантажень

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

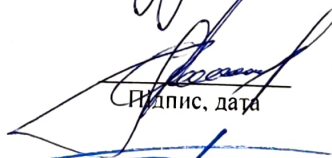
Шифр БРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу група ЕТс-20-2


Підпис

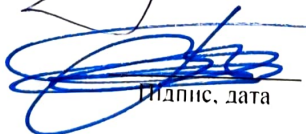
Пасічник А. М.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

к.т.н., доц. Горященко С.Л.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

доц. Тимошук О.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

20 06 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Спеціалізація Електропобутова техніка

Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

20.06.2023

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пасічник Андрій Миколайович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка пристрою для теплового захисту асинхронного двигуна від навантажень

керівник роботи Горященко Сергій Леонідович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 1 03 2023 р. № 5

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 20.06.23

3. Вихідні дані до роботи енергетичні характеристики силового обладнання та мережі

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд існуючих рішень захисту електродвигунів. 2 Розробка конструкції пристрою теплового захисту 3.Розрахунки. Висновки Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Блоки захисту електродвигунів. (ДО, А1). 2 Схема алгоритму роботи блоку захисту електродвигунів (ДІЗ, А1). 3. Режими роботи блоку теплового захисту електродвигунів (ДІ1, А1). 4. Графіки роботи блоку теплового захисту електродвигунів (ДІ2, А1). 5. Пристрій захисту та управління

асинхронним двигуном. (ВЗ, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання при

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приміт
1. <u>Огляд існуючих рішень захисту електродвигунів</u>		
2. <u>Розробка конструкції пристрою теплового захисту</u>		
3. <u>Розрахунки</u>		
4. <u>Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу</u>		

Студент

Підпис

А.М. Пасічник
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

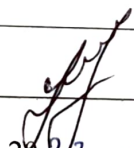
Підпис

С.Л. Горященко
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Пасічник Андрій Миколайович
2. Тема магістерської роботи Розробка пристрою для теплового захисту асинхронного двигуна від навантажень.
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____
4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 59
5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: Вступ. 1. Огляд існуючих рішень захисту електродвигунів. Розробка конструкції пристрою теплового захисту 3. Розрахунки. Висновки Список використаних джерел.

Підпис студента 
"26" 06 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол N1 від "27" 06 2023 р.

Оцінка проекту ЕК добре 4.0/5
Рекомендації ЕК у виробництво

Особливі відмітки _____

Технічний секретар 

"27" 06 2023 р.

ЗМІСТ

	стр
Вступ.....	3
1. Огляд існуючих рішень захисту електродвигунів.....	6
1.1 Пристрої теплового захисту.....	7
1.2 Нестационарні процеси у електроприводі.....	10
1.3. Блоки захисту UBZ-301 і UBZ-302.....	11
1.4 Блоки захисту UBZ	12
1.5 Мікропроцесорне реле для захисту двигуна 0,4 кВ.....	16
1.6 Пристрій для захисту асинхронного електродвигуна.....	17
1.7 Пристрій для захисту асинхронного електродвигуна по мережі живлення.....	19
1.8 Висновки до першого розділу.....	21
2 Розробка конструкції пристрою теплового захисту.....	22
2.1 Основи роботи електроприводу.....	22
2.2 Запуск електроприводу при повній напрузі.....	26
2.3 Вибір обладнання для захисту електродвигуна.....	31
2.4 Розробка моделі нагрівання електродвигуна.....	32
2.5 Розробка конструкції пристрою теплового захисту.....	39
2.6. Висновки до другого розділу.....	44
3 Розрахунки пристрою захисту	45
3.1 Теплова модель.....	45
3.2 Розрахунки режимів роботи.....	48
3.3 Висновки до третього розділу.....	52
Висновки.....	54
Список джерел посилань.....	55
Додатки.....	58

БРМА23.00.00.000ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Розробка пристрою для теплового захисту асинхронного двигуна від навантажень	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Пасічник А.			Б	2	59
Перев.		Горященко С.І.			ХНУ, гр. ЕМс-20-2		
Н. контр.		Тимошук					
Затв.		Поліщук О.С.					

ВСТУП

З середини минулого століття в енергетиці для захисту електродвигунів від аварійних ситуацій використовуються різні пристрої релейного захисту.

З середини минулого століття в енергетиці використовуються різні пристрої релейного захисту:

До них відносяться теплові, струмові, температурні, фільтрові та комбіновані.

Багаторічний досвід експлуатації електроприводів показав, що більшість існуючих захистів не гарантують безаварійної роботи.

Захист не гарантує безаварійної роботи автоматичні вимикачі (АВ) [1]. Наприклад, струмові теплові реле розраховані на тривалі перевантаження 25-30% від номінальних. Вони розраховані на перевантаження, однак у більшості випадків одна фаза розрахована на номінальне навантаження часто спрацьовує при обриві однієї фази при 60% від номінального навантаження. При навантаженнях нижче цього реле не спрацьовує і АВ продовжить працювати на двох фазах і з таких причин вийде з ладу через перегрівання ізоляції обмотки. Вибір відповідного захисного пристрою є важливим фактором забезпечення безпечної роботи електроприводу.

Пристрої, що використовуються для захисту двигуна від аварійних режимів, можна розділити на кілька типів: теплові пристрої захисту: струмові теплові реле, теплові розчіплювачі в автоматичних вимикачах.

Теплові розчіплювачі в автоматичних вимикачах бувають:

- струмозалежні захисні пристрої: запобіжники, автоматичні вимикачі автоматичні вимикачі;
- термочутливі захисні пристрої: вбудовані температурні захисти, термостати;
- захист від аварій в електромережі: реле контролю напруги та фази;
- пристрої максимального та мінімального струмового захисту;

									Арк.
									3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				

- електронне реле струму;
- комбіновані пристрої захисту.

Сучасні стандарти в більшості країн світу, в тому числі і в Україні, висувають все більш високі вимоги до безпечної експлуатації електромереж, все більш високі вимоги до безпечної експлуатації асинхронних електродвигунів [2].

Все більш високі вимоги пред'являються до безпечної експлуатації електродвигунів; висока надійність і довговічність електродвигунів змінного струму можлива тільки за умови їх експлуатації на номінальному або можлива тільки в тому випадку, якщо вони експлуатуються на номінальних або близьких до них значеннях, може бути гарантована лише за умови встановлення відповідного захисного обладнання. Відповідний захисний пристрій може швидко, за десяти частки секунди визначити характер і ступінь пошкодження двигуна та ідентифікувати зону аварійної ситуації, відключивши його від джерела живлення. Але при цьому відповідний захисний пристрій має низку суттєвих недоліків, які впливають на якість роботи.

Одні надмірно селективні, інші не мають затримки з моменту спрацьовування, треті не реагують на струми короткого замикання або перевантаження. Щоб правильно вибрати захисний пристрій, необхідно знати, як і від яких аварій захищає той чи інший пристрій, знати його принцип дії та конструктивні особливості.

Все електрообладнання в тій чи іншій мірі схильне до аварійних ситуацій, які часто призводять до збоїв в роботі іншого обладнання або всієї енергосистеми. Найпоширенішим і загальноприйнятим типом електродвигуна є асинхронний двигун завдяки простоті експлуатації, низькій вартості та надійності. Однак їхня робота вимагає постійного контролю [3].

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Захист асинхронних двигунів необхідний в наступних аварійних ситуаціях, коли обрив відкритої фази (ОВФ) відбувається в 50% випадків [4].

А саме:

- у разі короткого замикання фази; або у разі перевантаження по струму;
- у разі загоряння електричного кабелю;
- через погану фіксацію контактів фазних провідників та їх перегорання.

Обриви не завжди зупиняють двигун, але якщо навантаження на вал збільшується, двигун перегрівается і перегорає, що призводить до виходу з ладу.

Решта 50% викликані

- порушення послідовності фаз - може виникнути в разі неправильного проведення ремонтних робіт на розподільчому щиті або кабельній системі;
- злипання фаз - може статися при пошкодженні ізоляції силового кабелю або через перекриття проводів на стовпах; і
- Пперекіс фаз - коли навантаження нерівномірно розподіляється по фазах;;
- несправність системи управління охолодженням двигуна;
- інші технічні навантаження.

Отже пристрої для захисту двигунів від перевантажень, що розробляється має містити контролери двигунів, що можуть забезпечувати один або декілька видів захисту двигунів:

- захист від короткого замикання;
- захист від короткого замикання;
- захист від замикання на землю
- тепловий захист;
- мінімальний і максимальний струмовий захист.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

1.1 Пристрої теплового захисту

Тепловий захист є побічним (непрямим) захистом, він реалізується шляхом нагрівання струмової обмотки статорного нагрівального елемента захисного пристрою. Нагрівання статорного нагрівального елемента захисного пристрою, що діє на біметалеву пластину. Він впливає на біметалеву пластину, яка в свою чергу впливає на контакти ланцюга управління контактора або електромагнітного пускача. Захист є інерційний [4].

Гальванічна розв'язка. Цей захист забезпечується струмово-електричними тепловими реле і тепловими роз'єднувачами на автоматичних вимикачах.

Струмозалежні захисні пристрої. Найбільш відомими струмозалежними захисними пристроями є запобіжники, призначені для захисту електричних мереж від перевантажень і коротких замикань. Вони призначені для захисту електричних мереж від перевантажень і коротких замикань. Запобіжники складаються з корпусу (цоколя), виготовленого з електроізоляційного матеріалу, і плавких вставок, виготовлених з електроізоляційного матеріалу. Плавки вставки, розплавляються до того, як температура двигуна досягне небезпечного рівня внаслідок перевантаження або струму короткого замикання.

Запобіжники підключаються послідовно з ланцюгом, який потрібно захистити.

Автоматичні вимикачі призначені для вмикання та вимикання асинхронних двигунів та іншого струмоприймаючого обладнання, а також для захисту від перевантажень і струмів короткого замикання [3].

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Автоматичний вимикач поєднує в собі функції автоматичного вимикача, запобіжника і теплового реле і в аварійній ситуації відключає всі три фази одночасно. У робочому режимі увімкнення та вимкнення здійснюється вручну.

В аварійному режимі воно автоматично переривається електромагнітним або тепловим роз'єднувачем. Важливими компонентами автоматичного вимикача є: роз'єднувач, який керує параметрами налаштування мережі захисту ланцюга, впливає на розчіплювальний механізм, який вимикає обладнання.

Найпоширенішими типами роз'єднувачів є:

- електромагнітний - для захисту від струму короткого замикання;
- тепловий тип для захисту від перевантаження.

Електромагнітні вимикачі складаються з рухомої котушки, поворотної пружини і зворотної пружини. Коли струм короткого замикання протікає через котушку, струм короткого замикання миттєво протікає через сердечник.

Коли струм короткого замикання протікає через котушку, сердечник миттєво втягується і впливає на напрямну рейку та механізм вільного розчеплення.

Тепловий розчіплювач являє собою біметалеву пластину, з'єднану послідовно з контактами. Вона з'єднана послідовно з контактами. Нагрівається під дією надструмів. Механізм вільного розчеплення спрацьовує з витримкою часу, обернено пропорційною до шляху спрацьовування рейки розчеплювача.

Вибір автоматичних вимикачів ґрунтується на номінальному струмі, струмо-часових характеристиках відключення, максимальній відключаючій здатності, умовах монтажу та експлуатації.

Відключаюча здатність, умови встановлення та експлуатації
Правильний вибір характеристик автоматичного вимикача є ключовими для його своєчасної роботи.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Пристрої відведення тепла, що використовуються в автоматичних вимикачах чутливі до зовнішнього тепла. На практиці найчастіше зустрічаються вимикачі з проміжними полюсами відключаються під час номінального режиму роботи через нагрівання сусіднього полюса. Це обмежує робочий діапазон і номінальний струм повинен бути скоригований з урахуванням цього (рис. 1.1).



$k_n = I/I_n$ – коефіцієнт навантаження;

N – кількість полюсів автоматичного вимикача

Рисунок 1.1 – Графік залежності навантажувальної здатності автоматичного вимикача від кількості сусідніх полюсів

Навантажувальні характеристики більшості автоматичних вимикачів залежать від температури навколишнього середовища, збільшується і зменшується з підвищенням температури (рис. 1.4). З цієї причини це обмежує їх потенціал для використання в суворих температурних умовах, особливо обмежене використання на гарячих робочих місцях і на відкритому повітрі.

Щоб запобігти іншим нещасним випадкам, автоматичні вимикачі мають такі особливості. Автоматичні вимикачі оснащені низкою додаткових пристроїв.

Роз'єднувач мінімальної напруги вимикає автоматичний вимикач, якщо відбувається неприпустиме падіння напруги менше ніж 0,7 В. Повторний роз'єднувач нульової напруги спрацьовує, якщо напруга в мережі становить $0,35 U_n$ (U_n - номінальна напруга мережі) і спрацьовує, коли вона падає нижче $0,35 U_n$ (U_n - номінальна напруга мережі). Незалежний роз'єднувач призначений для дистанційного відключення автоматичних вимикачів. Захищає від пожежо- та вибухонебезпечності. Запобігає вибухам. [1]

Контроль параметрів мережевої напруги та управління трифазними електроустановками передбачає підготовку до аварійних ситуацій шляхом відключення трифазних електроустановок від електромережі, включаючи автоматичні вимикачі.

Відключення від електромережі в разі виникнення аварійної ситуації:

- Неприпустимі перепади напруги (стрибки та падіння напруги);
- Відключення, замикання, спотворення, порушення послідовності фаз.

Однак це не стосується випадків, коли параметри мережі були відновлені до нормального стану. Після відновлення параметрів мережі до нормального стану двигун повинен бути автоматично увімкнений.

Статистика показує, що значна кількість несправностей електродвигунів прямо чи опосередковано пов'язані з перепадами напруги в мережі. Тому моніторинг напруги є найдоцільнішим способом захисту електродвигуна, найдоцільніше використовувати монітор напруги.

Більшість реле напруги на ринку не мають такої універсальності.

Деякі з них контролюють лише обриви фаз, а інші деякі контролюють перенапругу або недонапругу, а інші - відхилення фаз. З цієї причини.

Це зумовлює необхідність використання декількох подібних реле одночасно, що ускладнює схему, збільшує витрати і знижує надійність. За схемотехнікою цей клас захисних пристроїв можна розділити на дві групи: аналогові та цифрові. Про переваги цифрових технологій над аналоговими сказано досить багато. Варто лише згадати про них. Характеристики

					Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ

аналогових реле напруги сильно залежать від параметрів вимірюваної напруги і температури навколишнього середовища. Аналогові реле напруги характеризуються низькою надійністю, великими габаритами і підвищеним енергоспоживанням, працюють при пікових значеннях напруги, оскільки практично неможливо розрахувати значення напруги, що діє на пристрій.

Мікропроцесорні реле-регулятори напруги виконують більшість функцій в одному невеликому пристрої і працюють за поточними значеннями.

Вони працюють відповідно до напруги, розрізняють типи несправностей і мають багато параметрів, що налаштовуються. Найкращі моделі пристроїв захисту мають незалежно регульовані параметри.

Пристрої мають незалежно регульовану (або "вшиту") уставку мінімальної напруги, яка регулюється для запобігання запуску.

Якщо виникають затримки, пристрій реагує на серйозні несправності, такі як втрата фази або сильне перекошування фаз.

Сильний перекіс фаз можуть контролювати монітори, що використовуються для керування АВ (для керування пристроями з тривалими перехідними процесами) і для контролю контактів магнітного пускача.

Остання функція використовується і найбільше підходить для потужних двигунів і двигунів, що працюють в режимі старт-стоп.

1.2 Нестационарні процеси у електроприводі

Нестационарні теплові процеси в електричних машинах відбуваються під час роботи. Вони відбуваються під час пуску, зупинки, гальмування, зміни навантаження та зміни швидкості машини. Нестационарні процеси нагріву набувають особливого значення при перевантаженнях по струму і напрузі, при частих і тривалих пусках двигуна, а також при його зупинці. [1, 2]

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Характерною особливістю нестационарних теплових режимів (теплових перехідних процесів) в електричних машинах є їх інерційність, яка проявляється в значному запізненні зміни температури від електромеханічного перехідного процесу. Це дозволяє машині певний час витримувати дію навантажень, струмів короткого замикання та інших аномальних режимів. Врахування теплової інерції в розрахунках нестационарного нагріву є необхідною умовою для отримання достовірних результатів.

Підвищення температури обмотки викликає теплове старіння ізоляції, що призводить до незворотної втрати електричної та механічної міцності. Відповідно до закону Монцінгера, підвищення температури на 8-10°C скорочує термін служби ізоляції вдвічі.

1.3. Блоки захисту UBZ-301 і UBZ-302

Блок захисту UBZ-301 пропонується в трьох версіях, класифікованих відповідно до діапазону номінального струму (від 50 до 50 А, від 10 до 100 А і від 63 до 630 А). Кожен пристрій захищає трифазні електродвигуни від обриву фази в разі зниження напруги в електромережі або інших механічних відхилень. Пристрої працюють з високою точністю та надійністю [2].

Пристрій є мікропроцесорним автоматичним пристроєм і не потребує робочого джерела живлення. У разі аварійної ситуації з мережевою напругою пристрій автоматично вмикається знову після відновлення всіх параметрів. У разі виникнення проблеми з самим двигуном, пристрій блокує його перезапуск.

Блок захисту UBZ-302 призначений для захисту трифазних двигунів від втрати однієї фази і для контролю інших параметрів трифазних асинхронних двигунів. Комплект захисту UBZ-302 включає в себе всі параметри,

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

реалізовані в UBZ-301. Крім того, пристрій також забезпечує захист від теплового захисту двигуна, блокування ротора і затримки пуску.

Пристрої захисту трифазних електродвигунів використовуються для підтримки якості роботи різних інженерних і промислових систем:

- опалення та водопостачання;
- вентиляція та кондиціонування повітря;
- автоматичний контроль і облік на виробництві;
- управління технологічними процесами.

Блок захисту UBZ -302-01, це пристрій загального призначення, що використовується на двошвидкісних двигунах для контролю напруги мережі, опору ізоляції пристрою та активних значень лінійного і фазного струмів.

Параметри встановлюються за допомогою визначених користувачем програмних завдань. Після встановлення поточних параметрів пристрій може бути налаштований на автоматичне відключення або ввімкнення.

1.4 Блоки захисту UBZ

Релейний захист електродвигунів забезпечують пристрої UBZ 304 і 305 [2], які працюють в діапазоні потужностей 2,5-315 кВт і використовують стандартні зовнішні трансформатори з вихідним струмом 5 А.

Ці універсальні пристрої працюють в ізольованій мережі з глухозаземленою нейтраллю; тип 304 монтується на панель, а тип 305 - на DIN-рейку.

Блок захисту UBZ -115 використовується для захисту однофазних двигунів з максимальною потужністю 5,5 кВт і максимальним струмом 25 А. Крім теплового захисту двигуна, цей пристрій також захищає двигун у разі виникнення таких аварійних ситуацій:

- несправність мережевої напруги;

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- затримка запуску (доступна дистанційно керована функція плавного пуску);
- "сухий хід" (коли на валу двигуна більше немає навантаження);
- механічні навантаження.

Блок захисту UBZ-118. Принцип роботи цього пристрою аналогічний принципу роботи UBZ-115, з тією лише різницею, що UBZ-118 має потужність електродвигуна до 2,6 кВт. Цей пристрій призначений для наступних застосувань.

UBZ-306М призначений для наступних застосувань:

- Захист асинхронних електродвигунів потужністю від 2,5 до 315 кВт при використанні зовнішніх стандартних трансформаторів струму з вихідними струмами 5 А;
- Контроль балансування верстатів-качалок
- Безперервний контроль параметрів напруги мережі, значень трифазного (лінійного) струму і значень трифазного (лінійного) струму.

(Трифазне електрообладнання 380 В 50 Гц) Безперервний контроль значень трифазного (лінійного) струму та перевірка значень опору ізоляції електродвигунів.

Перевірка величини опору ізоляції електродвигунів.

Прилад може використовуватися як в мережах з ізолюваною, так і з заземленою нейтраллю.



Рисунок 1.3- UBZ-306М

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

UBZ-302 призначений для безперервного контролю трифазного електрообладнання (переважно трифазних асинхронних двигунів):

- напруга мережі;
- фазний/лінійний струм в амперах;
- споживана потужність;
- напруга і струм прямої і зворотної послідовності;
- опір ізоляції на корпус;
- диференціальний струм витоку на землю (струм нульової послідовності);



Рисунок 1.4 - Універсальний блок захисту UBZ-302

Блоки призначені для широкого спектру застосувань, таких як інженерні системи будівель і споруд (опалення, вентиляція, водопостачання, кондиціонування), системи управління технологічними процесами, промислова автоматизація, системи контролю, вимірювання та диспетчеризації.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Пристрої значно знижують ймовірність виходу з ладу трифазного електрообладнання, зменшують експлуатаційні витрати, оптимізують енергоспоживання і значно підвищують зручність експлуатації.

Має повний набір функцій захисту, реалізований в UBZ-301. Крім того, він забезпечує захист від затримок пуску і блокування ротора, а також використовує датчик температури для контролю перегріву обмоток двигуна.

Друге вихідне реле керування дозволяє конфігурувати додаткові режими роботи:

- перемикання зірка-трикутник;
- перемикання із затримкою запуску (наприклад, каскадне ввімкнення двигуна).

Дистанційне реле аварійної сигналізації підключається згідно рис.1.5.

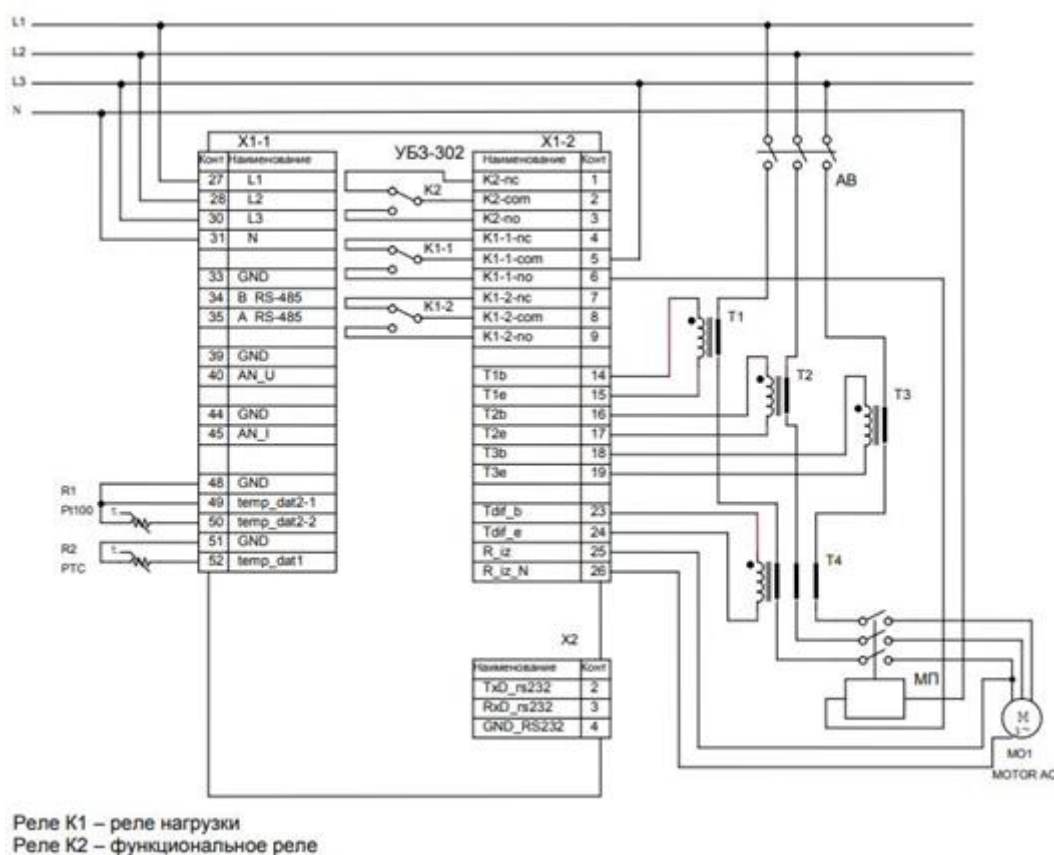


Рисунок 1.5 – Схема підключення UBZ

1.5 Мікропроцесорне реле для захисту двигуна 0,4 кВ

Мережа з ізольованою нейтраллю представлена РДТ-01-053, РДТ-01-203, РДЦ-01-053, РДЦ-01-203 - мікропроцесорні реле захисту електродвигунів, РДЦ-01-053. (рис.1.6) [8]

Реле захисту електродвигунів РДЦ-01-053, РДЦ-01-203 з цифровою настройкою і індикацією параметрів управління, пряма комутація 3х380 В 50 Гц, потужність (0,55... .. 2,2) кВт (РДЦ-01-053), (2,2. .9,0) кВт (РДЦ-01-203), та потужністю (9,0. .450) кВт (РДЦ-01-053), ввімкнені через струмовимірювальний трансформатор, захищають електродвигуни 3х380 В 50 Гц.

Реле захищає електродвигун від наступних наслідків:

- перевантаження;
- несиметрія навантаження;
- робота з низьким навантаженням;
- перенапруга;
- недостатня напруга живлення;
- неправильне чергування фаз;
- зниження опору ізоляції обмотки двигуна перед пуском;
- перемикання електричного кола при досягненні одним з параметрів керування певного, заздалегідь запрограмованого рівня.

Водночас, окрім функції захисту, реле має низку важливих сервісних функцій. Можливість контролю наступних параметрів:

- струм споживання кожної фази (IA, IB, IC);
- напруга мережі в кожній фазі (UA, UB, UC);
- частота мережі;
- Лічильники ресурсу електродвигунів;
- Аномалії в мережі та причини аварійних ситуацій;

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Налаштування кількості автоматичних перезапусків після аварійного відключення (макс. 5; інтервал перезапуску 15 с);

Захист налаштованих параметрів від несанкціонованого доступу (пароль). Є можливість скидання збережених аварійних параметрів без вимкнення пристрою (підтвердження).



Рисунок 1.6 - Мікропроцесорні реле захисту електродвигунів РДЦ

1.6 Пристрій для захисту асинхронного електродвигуна

Відомі пристрої захисту двигуна [5] від перевантаження, який містить п'ятий та шостий порогові елементи, аналізатор спектра, блок реєстрації рівня вібраційного сигналу, блок пам'яті, схема керування, триканальний ключовий елемент, блок визначення навантаження, три входи якого з'єднані з трьома виходами блока датчика струму, три виходи з'єднані з трьома входами блока пам'яті, четвертий вхід з'єднано з виходом схеми керування, три виходи з'єднано з входами четвертого, п'ятого та шостого порогових елементів, віброперетворювач через аналізатор спектра з'єднано з блоком реєстрації рівня вібраційного сигналу, його другий вхід з'єднано з другим виходом схеми

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				17

1.7 Пристрій для захисту асинхронного електродвигуна по мережі живлення

Блок захисту асинхронного електродвигуна 1 (рис.1.8) [6] від мережі живлення містить блок датчиків струму 2 з датчиками, з'єднаними за схемою "зірка", нульова точка якої підключена до "загального" провідника пристрою, три виходи блоку 2 підключені до трьох входів блоку захисту 3, четвертий, п'ятий та шостий входи якого підключені до джерел трьох постійних вхідних впливів E_1 , E входи якого підключені до джерел трьох постійних вхідних впливів E_1 , E_2 та E_3 відповідно, другий вихід підключений від мережі живлення через другий блок підключення 4, другий модем 5 та другий блок регулятора живлення 6, перший вихід підключений до третього входу елемента АБО 7, а його вихід підключений до четвертого входу з'єднаний з четвертим входом блока керування джерелом живлення 6 через незалежний блок затримки часу 8, другий вхід з'єднаний з першим входом елемента АБО 7 та через перший пороговий елемент 9 з віброперетворювачем 10, третій вхід з'єднаний з другим входом елемента АБО 7 та через другий пороговий елемент 11 з'єднаний з перетворювачем температури 12, керуючим елементом 13 з'єднаний з перетворювачем температури 12, блок керування 16 підключений від мережі електроживлення через блок з'єднання 13, модем 14, блок регулятора потужності 15 та перший, другий і третій виходи, перший, другий і третій виходи блоку регулятора потужності 15 з'єднані з трьома входами блоку індикації 17 підключений до другого входу порогових елементів 9 і 11, які підключені до джерел постійної дії четвертого і п'ятого входів E_4 і E_5 відповідно, блок живлення 18 підключений до кола живлення електродвигуна, а другий блок живлення 19 підключений до входу другого блоку з'єднання 4 19]. Блок керування 16 містить електромагнітний пускач з керуючими контактами, кнопками СТАРТ і СТОП, ключовий елемент 20 і пускову

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				19

катушку 21, з'єднані послідовно з входом, причому другий вхід ключового елемента 20 з'єднаний з колом керування електродвигуном [6].

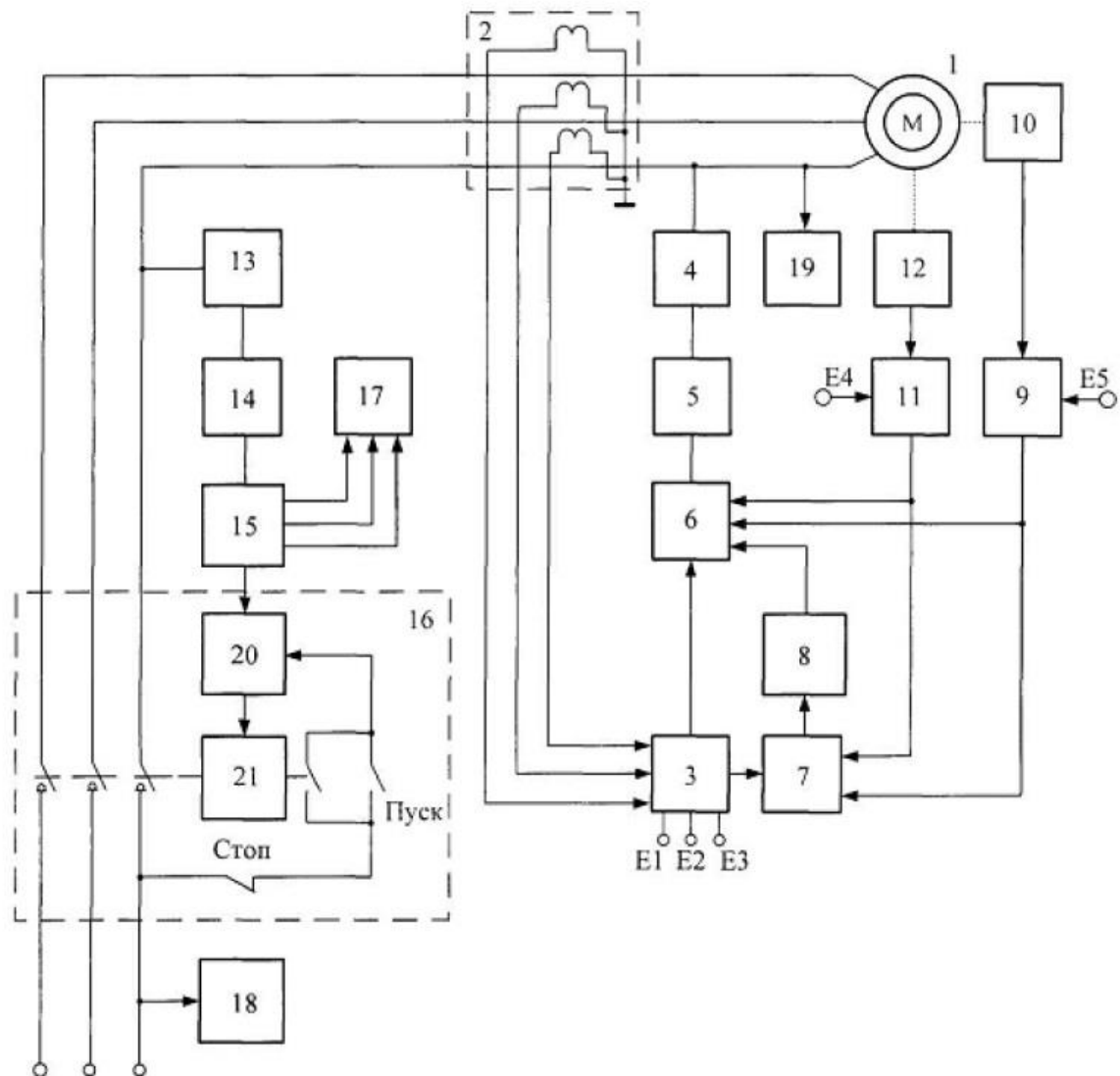


Рисунок 1.8 - Пристрій для захисту асинхронного електродвигуна по мережі живлення

При зменшенні струму в одній з фаз нижче порогового значення, наприклад, при обриві фази електродвигуна 1, і при зміні послідовності чергування фаз, послідовність імпульсів на вході елемента 22.1.22.3 і на виході блоку 3. 3, коли на виході блоку 3 сигнал дорівнює логічній одиниці $U_3=1$, він через елемент 7 виконується АБО і передається на блок 8 незалежної витримки

часу, який видає сигнал $U_8=0$ з витримкою часу $t \leq 5$ с, який передається на блок 6 регулятора потужності, модем 5, блок 4 з'єднання, блок 13 з'єднання, блок 14 з'єднання, блок 15 з'єднання блок 13, модем 14 та блок 15 регулятора потужності і передається на вхід блоку управління 16, а потім на ключовий елемент 20, який вмикає та вимикає живлення котушки пускача 21. Він також передається на блок індикації, де зберігається і відображається у відповідному режимі сигналізації. Силові контакти пускача і замикаючі блок-контакти розмикаються, і двигун 1 знеструмлюється. Незалежний блок затримки часу 8 дозволяє встановлювати інший час в залежності від технологічного процесу.

1.8 Висновки до першого розділу

Проведено огляд технічних рішень щодо захисту електродвигунів від перенавантажень. Визначені основні елементи захисту.

Обрано подальші напрямки розробки пристрою для теплового захисту асинхронного електродвигуна.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ

2.1 Основи роботи електроприводу

Двигуни працюють за загальним принципом асинхронної роботи. Статор, який створює магнітне поле, і ротор, який передає рушійну силу, з'єднані гальванічною ізоляцією. Підведення живлення до обмоток статора створює магнітну індукцію, яка пов'язана з магнітним полем, з якого генерується потужність. Для створення обертального руху на ротор необхідно подати два змінних струми. Ці змінні струми не синхронізовані в часі і подаються в шаховому порядку в двох різних місцях, залежно від бажаного напрямку руху [10, 11].

Різниця між швидкістю обертового магнітного поля, що генерується статором, і швидкістю ротора відома як "ковзання".

Залежно від типу використовуваного струму (однофазний, багатофазний змінний або постійний струм), конструкція статора, ротора і використовуваний метод будуть відрізнятися, але основний принцип залишається незмінним.

Двигуни споживають активну потужність для перетворення в механічну і реактивну потужність для намагнічування обмоток.

Вона використовується для намагнічування обмоток, але не сприяє створенню рушійної сили. Струм намагнічування - це загальний струм.

20% від загального струму для біполярних двигунів і до 60% для невеликих 8-полюсних двигунів. Струм намагнічування не залежить від навантаження, але залежить від конструкції статора і прикладеної напруги. Він є найвищим під час запуску. Коефіцієнт потужності двигуна під час запуску становить приблизно від 0,1 до 0,25 [12].

Він збільшується до максимуму під час фази прискорення і зменшується в міру наближення до максимальної швидкості.

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				22

Активна та реактивна потужність позначені P та Q відповідно на діаграмі нижче. Зв'язок між активною потужністю, виміряною в кВт, і загальною потужністю S позначено P і Q на наступній діаграмі.

Співвідношення між активною потужністю, виміряною в кВт, і повною потужністю, виміряною в кВА, називається коефіцієнтом потужності.

Альтернативно, він позначається як $\cos\phi$. $\cos\phi$ можна використовувати для вираження співвідношення потужностей, тому що двигуни сам по собі є лінійним навантаженням. При використанні з електронними перетворювачами потужності його краще називати коефіцієнтом потужності, ($\tan \phi$).

$\cos \phi$ являє собою кут між P і S і зазвичай має значення між 0,7 і 0,9.

В установках, де споживається велика кількість двигунів, коефіцієнт потужності зменшується. Це призводить до підвищення цін на електроенергію і збільшення споживання струму. Тому доцільно компенсувати коефіцієнт потужності системи за допомогою конденсаторної батареї.

Реактивна потужність може бути компенсована централізовано в точці постачання або безпосередньо на приймальному кінці (рис.2.1).

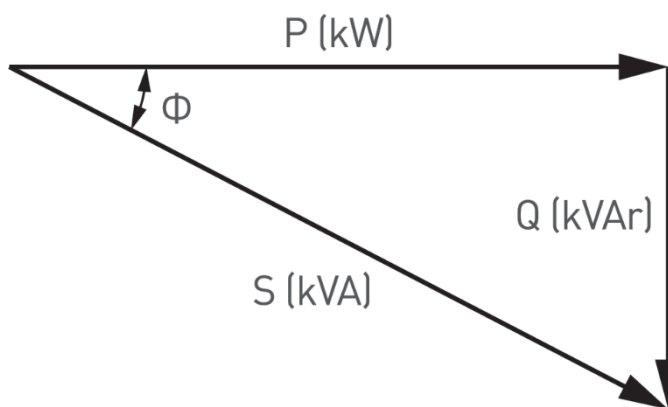


Рисунок 2.1 - Характеристики кривої крутний момент/швидкість двигуна

Початковий або пусковий момент: це значення крутного моменту, який створює двигун при увімкненні. Тому важливо перевірити діапазон напруги двигуна при цих початкових умовах. Особливо важливо враховувати падіння напруги.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Момент розгону: найнижча точка на кривій перед тим, як двигун розганяється до максимальної швидкості. Для того, щоб двигун прискорився, він повинен бути вищим за момент опору. Але деякі двигуни не піддаються такому падінню крутного моменту, і мінімальне значення залишається на рівні початкового значення крутного моменту.

Руйнівний момент: максимальна точка на кривій, що відповідає величині крутного моменту, доступного на валу, коли на двигун подається номінальна напруга. Зі збільшенням навантаження на двигун швидкість двигуна зменшується (збільшення ковзання), аж до значення пробивного моменту, при якому двигун може стати нестабільним (зупинитися). Руйнівний момент становить щонайменше в 1,6 рази перевищує робочий момент, передбачений стандартом. Двигун може бути перевантажений до цього значення протягом 15 секунд при номінальній частоті та напрузі.

Номінальний крутний момент (Нм): крутний момент, який можна використовувати на валу без перегріву при номінальній частоті і номінальній напрузі. Крутний момент, вказаний виробником асинхронного двигуна для максимальної температури навколишнього середовища 30°C. Ці двигуни повинні гарантувати номінальний крутний момент під час безперервної роботи без перевищення максимального значення температури. Деякі режими роботи (S2, S3, S6), в яких номінальний крутний момент може бути перевищений необхідно дотримуватися.

Існують різні типи навантажень і, відповідно, різні криві крутного моменту і швидкості. Найпоширенішими є постійний крутний момент, крутний момент зі швидкістю, змінний крутний момент і гібридні типи.

Двигун працює, починаючи з високого крутного моменту, за яким слідує постійний крутний момент. Залежно від типу навантаження рекомендується визначати режим пуску (рис.2.2).

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

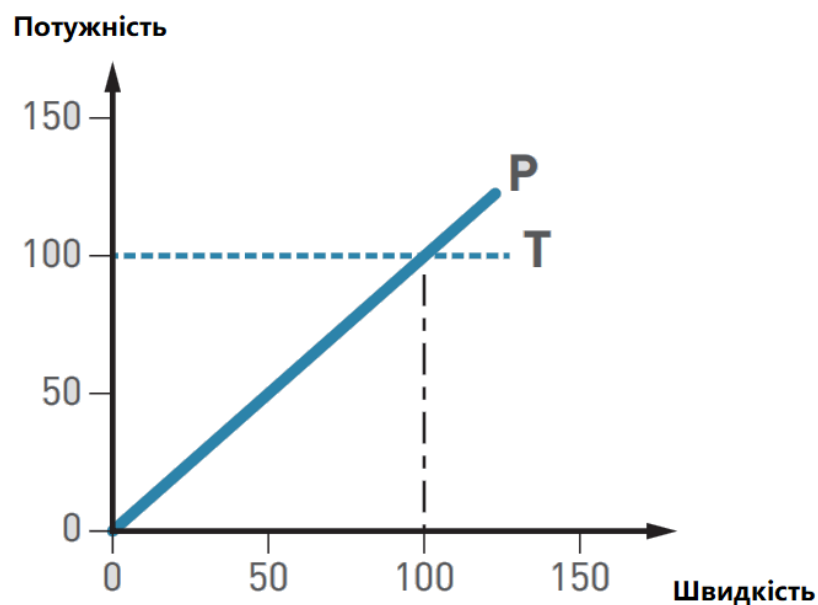


Рисунок 2.2 – Залежність потужності від швидкості [17]

Якщо крутний момент, що генерується двигуном, дорівнює необхідному крутному моменту навантаження, вважається, що двигун має стабільне навантаження.

В умовах сталого режиму необхідний крутний момент однаковий незалежно від швидкості обертання. Ліфти, конвеєри тощо. Крутний момент під час запуску показані на рис.2.3.

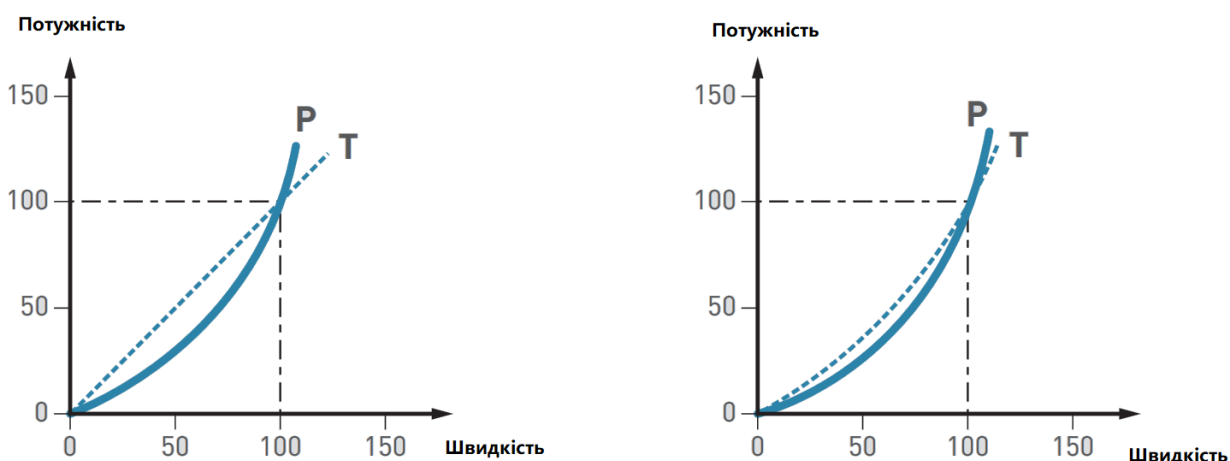


Рисунок 2.3- Залежність потужності від швидкості [17]

Крутний момент при запуску (T_s) є достатнім для подолання механічного опору і є достатнім для прискорення машини.

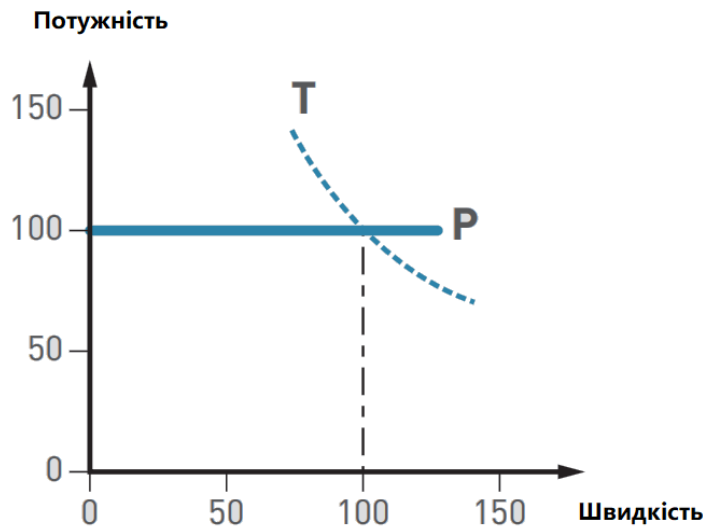


Рисунок 2.4- Необхідний крутний момент [17]

Залежно від застосування крутний момент збільшується лінійно. Крутний момент, необхідний для запуску визначається наступним чином: $T_s \geq 1,2 \times T_n$. Необхідний крутний момент зменшується зі збільшенням швидкості. Потужність є постійна.

Сьогодні вісім з десяти двигунів використовуються з фіксованою швидкістю. Це пов'язано з тим, що більшість двигунів, які продаються, мають малу потужність і використовуються там, де не потрібно змінювати крутний момент, швидкість і прискорення. Крім того, їх запуск не впливає на машину, яку вони приводять в рух.

2.2 Запуск електроприводу при повній нарузі

Пуск електродвигуна в системах з фіксованою швидкістю має багато переваг, включаючи кращу ефективність, ніж у приводів з регульованою швидкістю. Незалежно від навантаження двигуна, рівень втрат енергії

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

незначний. Це найпростіший режим пуску. Двигун запускається "природно". Двигун підключається до електромережі, вторинна обмотка (ротор) якого знаходиться в стані короткого замикання, так що пусковий струм досягає свого піку.

Цей тип пуску підходить для двигунів з обмеженою потужністю, що живляться від мережі, і які не потребують поступового прискорення. Крутний момент максимальний, але пусковий струм вищий (у 5-8 разів більше номінального). Для застосувань з фіксованою швидкістю потужність двигуна повинна бути підібрана таким чином, щоб витримувати коливання навантаження. Незважаючи на свої переваги, пуск не підходить для застосувань, коли потужність двигуна перевищує можливості електромережі. Мережа живлення не може витримати падіння напруги, пов'язане з таким пуском.

Незважаючи на свою міцну конструкцію, асинхронні двигуни можуть зазнавати електричних збоїв. Найбільш вразливими частинами двигуна є обмотки ротора і статора. Вони складаються з мідних обмоток, покритих ізоляційним лаком, і повинні бути захищені від перегріву через ризик короткого замикання, що призводить до руйнування двигуна. З цієї причини двигуни зазвичай оснащені вентилятором на валу для охолодження під час нормальної роботи. Основними причинами підвищення температури двигуна є: перевантаження: при постійній швидкості в стандартному режимі роботи навантаження на двигун збільшує споживання струму і тепловіддачу обмоток. Навіть якщо двигун спроектований таким чином, щоб витримувати високі перевантаження, це не повинно тривати довго. Загальноприйнято вважати, що постійне перевантаження двигуна на 10% скорочує його термін служби вдвічі. Надмірний час запуску або тривале заклинювання трансмісійного валу: якщо двигун знаходиться в тривалій фазі запуску або зупинений, ротор піддається набагато більшому тепловому навантаженню зі збільшеним вхідним струмом і існує серйозний ризик пошкодження обмотки. Втрата фази живлення:

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

зазвичай випадково (або через перегорання запобіжника), струм збільшується приблизно на 150-170% в обох обмотках, на які продовжує подаватися живлення. Ефект особливо шкідливий, коли двигун працює з повним навантаженням, і може зруйнувати двигун під час фази запуску. Таке ж явище може виникнути, якщо є значний дисбаланс між фазами. Бажано вибрати пристрій, який може захистити від цього ризику і зазвичай позначається як "чутливий до обриву фази". Див. розділ про реле теплового перевантаження та автоматичні вимикачі двигуна (див. стор. 36). Перевага пристроїв захисту від перегріву двигуна полягає в тому, що вони можуть реагувати дуже швидко. З цієї причини стандарт ІЕС 60947-4-1 для контакторів і пускачів двигунів визначає кілька категорій класів відключення. Найпоширенішим є клас 10.

Теплові реле доступні у "стандартній" версії, яка захищає двигун від перегріву, та "диференційованій" версії, яка більш чутлива до перекосу фаз, що є основною причиною пошкодження двигуна. Примітка: Поняття диференціального теплового реле перевантаження не слід плутати з пристроями захисту від диференціального струму (наприклад, автоматичними вимикачами або пристроями захисного відключення), які використовуються для захисту людей і майна. Якщо одна фаза перервана або сильно розбалансована, струм в іншій фазі збільшиться, що призведе до перегріву обмоток. Теплові реле перевантаження рекомендується використовувати в диференціальних версіях, оскільки вони можуть швидко виявити дисбаланс між фазами.

Коли струм не протікає, біметалева планка і важелі вважаються нерухомими. Коли вони починають підтримувати струм до номінального струму, біметалева планка згинається (сторона "а"). Оскільки струм вважається еквівалентним у кожній з трьох фаз, важелі А і В змінюються в одному напрямку. Якщо поріг номінального струму перевищено, біметалічна планка вигинається за межі сторони "а" і реле спрацьовує. У цьому випадку всі біметалічні планки змінюються з однаковою швидкістю, що призводить до

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

збалансованого перевантаження.4) Якщо одна фаза переривається, знеструмлена біметалічна планка залишається у вимкненому положенні, а струм у двох інших фазах збільшується в діапазоні від 150% до 170%. Потім два важелі рухаються в протилежних напрямках. Ефект біметалевої планки посилюється, а час спрацьовування реле значно зменшується. (рис.2.5)

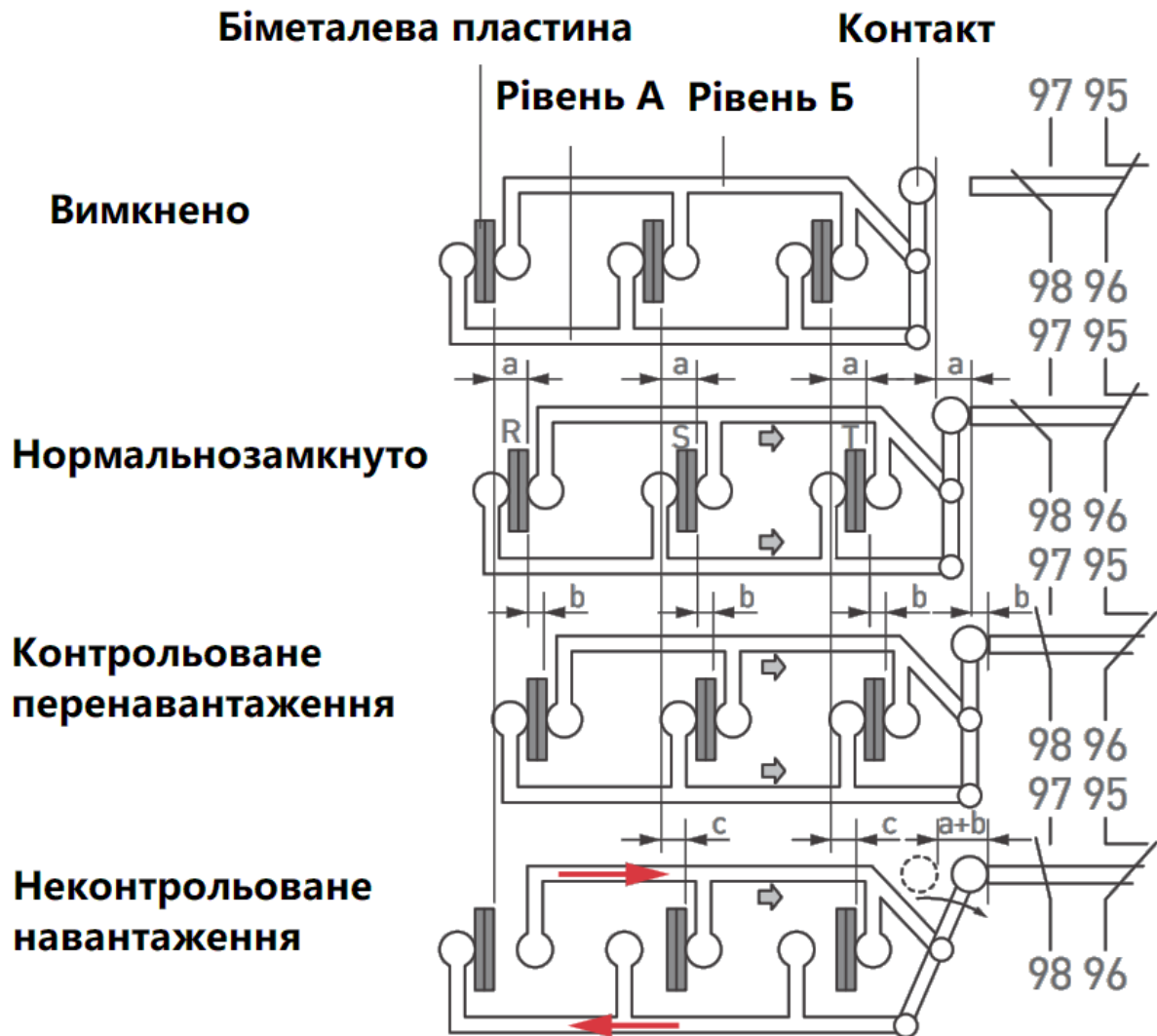


Рисунок 2.5 – Режимы работы теплового захисту [18]

Крива теплового спрацьовування (в амперах) має тенденцію бути обернено пропорційною до тривалості, вираженої в секундах і хвилинах (рис.2.6). Зона спрацьовування визначається інтервалом, обмеженим максимальним і мінімальним значеннями ІЕС 60947-4-1. Щоб запобігти хибному спрацьовуванню, рекомендується вибрати термозахисний пристрій,

крива якого не перетинається з пусковою характеристикою двигуна. Біметалічний пас холодний, коли на нього не подається напруга. Ремінь знаходиться в початковому положенні. Після певного часу роботи біметалева стрічка піддається тепловому навантаженню і вигинається в більшій чи меншій мірі відповідно до поточного значення. Це так званий "теплий стан". На практиці це означає, що поріг спрацьовування знижується (ефект пам'яті). Іншими словами, реле стає більш чутливим до збільшення струму після перевантажень, зупинок і обривів фази. Це забезпечує більш надійний захист двигунів, обмотки яких нагріваються і більш чутливі до інших перевантажень.

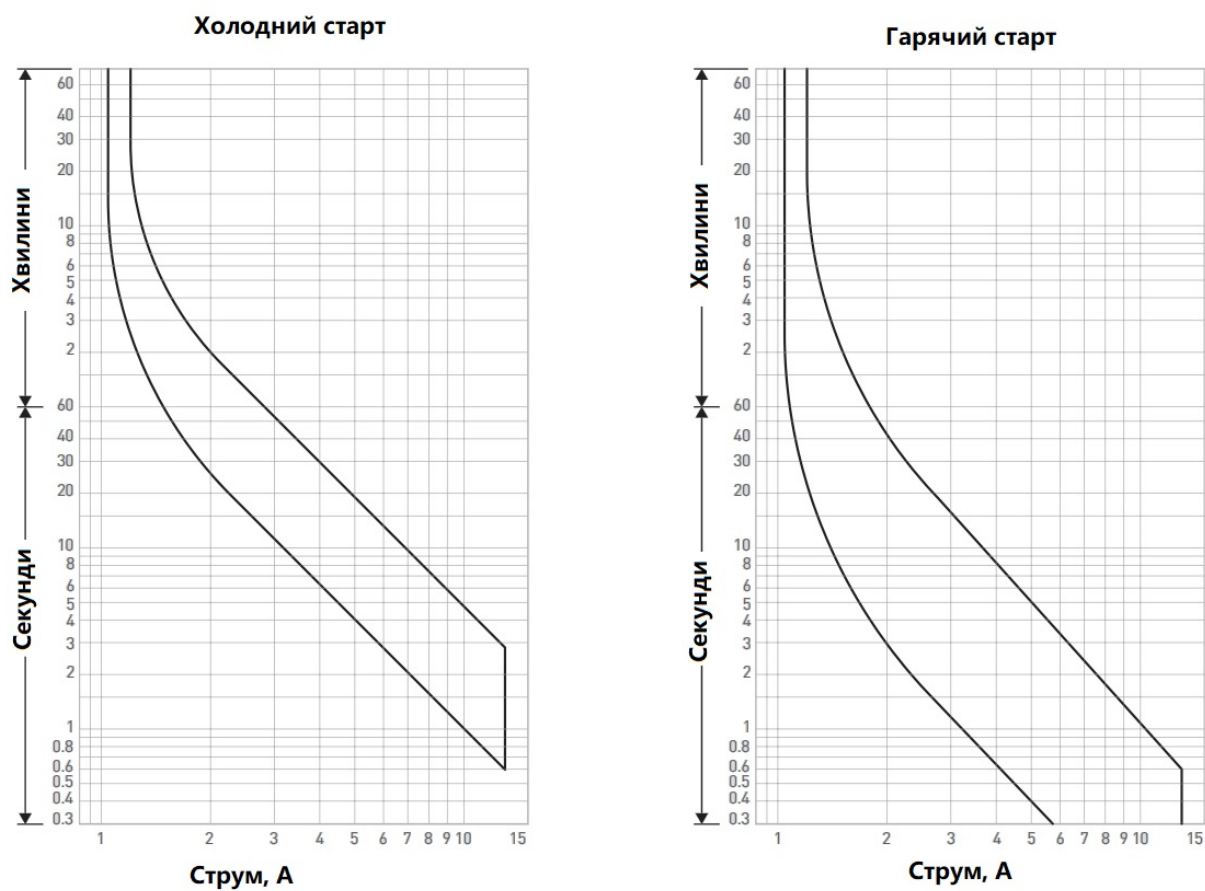


Рисунок 2.6 – Графіки теплового спрацьовування системи захисту від перенавантажень

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

2.3 Вибір обладнання для захисту електродвигуна

Для подальшого нам потрібно вибрати обладнання, що спеціалізується на захисті електродвигунів, так звані автоматичні вимикачі для електродвигунів. Вони відрізняються від стандартних автоматичних вимикачів. Електромагнітні вимикачі мають ряд особливостей:

- електромагнітні АПВ мають номінальний струм 12-14 А і призначені для режиму індуктивного навантаження (АС-3);
- висока електрична стійкість до 100 кА;
- важіль або кнопка на корпусі для керування електроприводом;
- вбудовані або встановлені швидкознімні додаткові контакти;
- вбудовані або встановлені швидкокороз'ємні контакти для захисту від перевантажень і короткого замикання.

Якщо захисні функції розподілені між кількома незалежними пристроями, це створює багато незручностей під час монтажу та експлуатації. Кожна з функцій захисту не є універсальною і підходить лише для конкретного вимикача. Тому перед нами стояло завдання створити універсальний пристрій.

Останнє покоління автоматичних вимикачів включає в себе електронні автоматичні вимикачі, які забезпечують комплексний захист двигуна та має всі вищезгадані функції роз'єднувача в одному пристрої [4]. Електронні автоматичні вимикачі засновані на мікропроцесорній технології і гарантують високу точність, високу надійність і стійкість до температурних режимів.

Це гарантує необхідну потужність для нормальної роботи.

Захисний роз'єднувач складається з трьох або чотирьох трансформаторів струму (залежно від типу), електронного блоку і розчіплювачів. Розчіплювач впливає безпосередньо на механізм вимикача.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Для управління магнітним пускачем необхідний допоміжний блок управління. Блок керування дозволяє керувати контактором у разі аварії. За винятком випадку короткого замикання.

Нам також потрібний термочутливий захисний пристрій.

2.4 Розробка моделі нагрівання електродвигуна

Температурний захист - це захист прямої дії, який реагує безпосередньо на зміну температури в найбільш нагрітій частині двигуна за допомогою вбудованого датчика температури (наприклад, коротке замикання).

Захист прямої дії, який реагує безпосередньо на зміну температури в найбільш нагрітій частині двигуна за допомогою вбудованого датчика температури.

Пристрої температурного захисту (наприклад, UWTZ) впливають на ланцюги керування контакторів та електромагнітних пускачів. Або ж вони впливають на ланцюги керування електромагнітними пускачами. Вони поділяються на два основні класи: РТС - напівпровідникові резистори з позитивним температурним коефіцієнтом опору і NTC - напівпровідникові резистори з негативним температурним коефіцієнтом опору.

Подальшим розвитком пристрою захисту є використання аналогічних якісних, недорогих пристроїв плавного пуску для домашнього використання та контролю швидкості обертання АД зі збереженням усіх захисних функцій.

Такі пристрої повинні виявляти більшість причин виникнення аварійних станів, таких як Аварійні режими: тривалий пуск, перевантаження по струму, механічні перевантаження тощо,

Таке обладнання повинно виявляти більшість причин, що призводять до виникнення аварійних режимів за рахунок зміни напруги і частоти мережевого

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

живлення, тобто тривалий пуск, струмові перевантаження, механічні перевантаження і т.д.

Зміна напругу і частоту мережі електроживлення дає змогу оптимізувати роботу АВР у різних режимах та забезпечує плавний пуск, плавне регулювання частоти обертання і рівномірне обертання двигуна в діапазоні перевантажень.

Рівномірна частота обертання двигуна в діапазоні перевантажень, висока ефективність (ККД і коефіцієнт потужності і коефіцієнт потужності) і поліпшена динаміка приводу гарантують, що буде зменшення зносу механічних компонентів і продовження терміну служби статора.

Продовження терміну служби обмоток статора і всього АД, зниження енергоспоживання і споживання реактивної.

У теплових розрахунках електродвигунів використовуються різні методи для різних умов теплообміну [4]:

1) аналітичні методи, які розв'язують рівняння тривимірного або двовимірного температурного поля аналітично, строго або наближено, зазвичай використовуються, коли поле є суттєво неоднорідним. У таких випадках часто доводиться спрощувати геометрію і граничні умови математичної моделі;

2) чисельні сіткові методи використовуються в таких випадках, але не вимагають значного спрощення обчислювального простору;

3) методи одновимірного температурного поля використовуються для розрахунку розподілу температур на рівні, наприклад, обмоток в електричних машинах;

4) метод еквівалентної теплової схеми (ЕТС) є найбільш поширеним методом завдяки своїй простоті та достатній точності розрахунку.

Метод базується на тепловому опорі [13], підключеному до теплової мережі, що моделює реальні шляхи теплового потоку в машині, і ґрунтується

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

на формі фундаментального закону теплопровідності (закон Фур'є), який передбачає подібність між тепловим потоком і струмом. [9, 13].

$$\Delta P = \frac{\lambda \cdot F_t \cdot \Delta \theta}{\delta} = \frac{\Delta \theta}{R_t} \quad (2.1)$$

і струмом (закон Ома).

$$I = \frac{k \cdot F_{np} \cdot \Delta U}{l} = \frac{\Delta U}{R_e}, \quad (2.2)$$

де F_t - площа перерізу, перпендикулярного до теплопровідності.

λ - теплопровідність

$\Delta \theta$ - перепад температури по довжині δ

R_t - термічний опір цього перерізу на шляху теплового потоку

k - питома електропровідність;

ΔU - різниця потенціалів по довжині провідника l в перерізі F_{np} ;

R_e - електричний опір. Компоненти діаграми теплопередачі моделюють кожну частину двигуна. Якщо частина двигуна має розосереджене джерело тепла, то при створенні еквівалентної діаграми теплопередачі його замінюють централізованим джерелом тепла (джерелом теплового потоку), розташованим у вузлі, що моделює цю частину. Вузли з внутрішнім тепловиділенням зображуються на діаграмі кружечками, а вузли без тепловиділення - крапками.

Для детальних розрахунків значень температур використовуються детальніші еквівалентні діаграми розподілу тепла. Наприклад, в [14] наведено діаграму розподілу тепла для закритого двигуна вентилятора (рис. 1.2).

Система рівнянь для цієї стаціонарної схеми:

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} = \left(- \sum_{k=1}^{m(k \neq 1)} \Lambda_{k1} \right) \cdot (\theta_1 - \theta_B) + \sum_{k=1}^{m(k \neq 1)} [\Lambda_{k1} \cdot (\theta_k - \theta_B)] + P_1, \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} = \left(- \sum_{k=1}^{m(k \neq 2)} \Lambda_{k2} \right) \cdot (\theta_2 - \theta_B) + \sum_{k=1}^{m(k \neq 2)} [\Lambda_{k2} \cdot (\theta_k - \theta_B)] + P_2, \\ \dots \dots \dots \\ C_m \cdot \frac{d\theta_m}{dt} = \left(- \sum_{k=1}^{m(k \neq m)} \Lambda_{km} \right) \cdot (\theta_m - \theta_B) + \sum_{k=1}^{m(k \neq m)} [\Lambda_{km} \cdot (\theta_k - \theta_B)] + P_m, \end{array} \right. \quad (2.4)$$

де $\Delta\theta_{m,1}$ - надлишкова температура на передній частині обмотки;

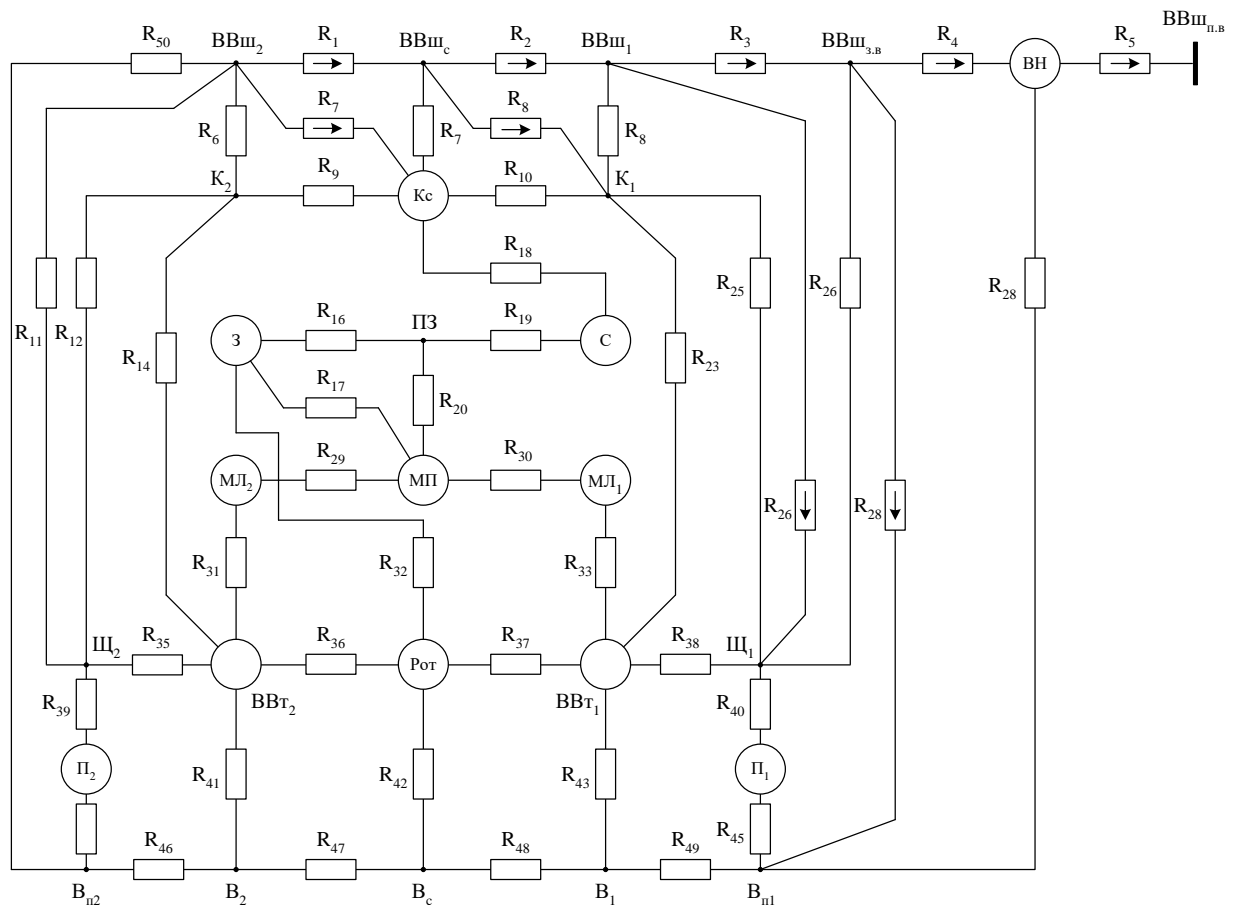


Рисунок 2.7 - Схема двигуна з замкнутим контуром з урахуванням нерівномірності температури корпусу.

Однак автори [4] зазначають, що використання детальних схем з більшою кількістю кешів рекомендується лише в певних випадках (наприклад, при проектуванні систем охолодження машин). Для практичних розрахунків для конкретних машин зручно користуватися спрощеними еквівалентними

$\Delta\theta_{\theta,po}$ - надлишкова температура ротора;
 $\Delta\theta_{c,w}$ - надлишкова температура повітря всередині машини;
 $\Delta\theta_k$ - надлишкова температура корпусу;
 $S_{m,l}$ - теплоємність на передній частині обмотки;
 $S_{m,l...}$ - теплоємність на задній частині обмотки;
 $S_{m,p}$ - теплоємність пазової частини обмотки; $S_{m,p}$ - теплоємність пазової частини обмотки;
 $C_{c,st}$ - теплоємність сталі статора пакета;
 $C_{,m}$ - теплоємність ротора;
 $S_{v,wt}$ - теплоємність повітря всередині машини;
 $S_{r,w}$ - теплоємність корпусу;
 $R_{m,l}$ - втрати електричної потужності на передній частині обмотки;
 $R_{m,p}$ - потужність електричних втрат у пазовій частині обмотки;
 $R_{c,st}$ - потужність втрат у сталі статора через вихрові струми та гістерезис;
 R_{rot} - потужність електричних втрат у роторі;
 $R_{v,w}$ - потужність механічних та додаткових втрат;
 Λ_a - теплопровідність лобової та пазової частин обмотки;
 $\Lambda_{m,c}$ - теплопровідність між пазовою частиною обмотки і осердям статора; $\Lambda_{m,c}$ - теплопровідність між пазовою частиною обмотки і осердям статора;
 $\Lambda_{m,c}$ - теплопровідність між передньою частиною обмотки і повітрям всередині машини;
 $\Lambda_{rot,c}$ - теплопровідність між ротором і внутрішнім повітрям;
 $\Lambda_{rot,c}$ - теплопровідність між ротором і осердям статора;
 $\Lambda_{c,k}$ - теплопровідність між осердям статора і корпусом;
 Λ_c - теплопровідність між корпусом і зовнішнім повітрям.

Системи диференціальних рівнянь (2.3) і (2.4), що описують процес попереднього нагрівання двигуна, фактично є тепловими моделями асинхронних двигунів.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

На основі цих рівнянь можна розробити програму керування асинхронним двигуном на мікроконтролері.

2.5 Розробка конструкції пристрою теплового захисту

Конструкція блоку теплового захисту, що пропонується представлена на рис.2.9. Конструкція розроблена у програмному середовищі SolidWorks.

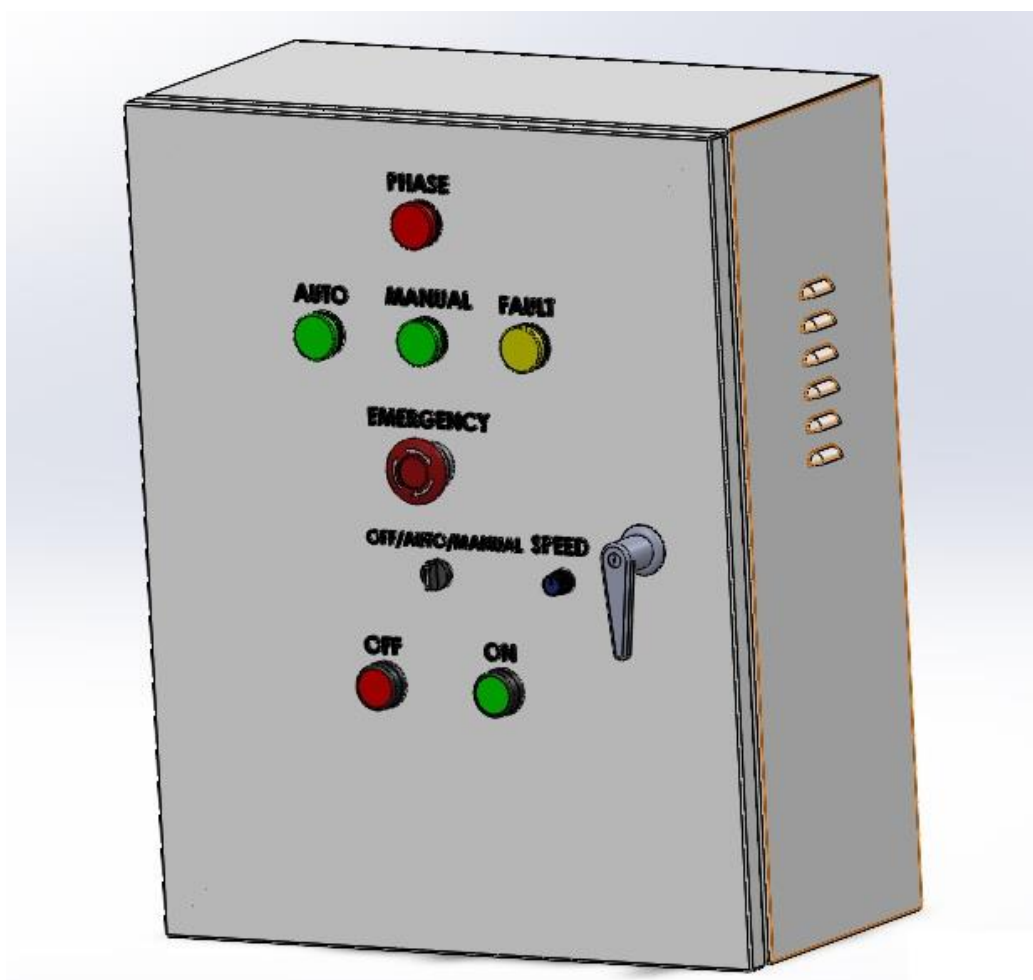


Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд конструкції пристрою для теплового захисту

Внутрішня будова на 2.9. Вигляд загальний на БРМА 23.00.00.000 ВЗ.

Пристрій складається з: корпусу 1; кришки 2; програмоване реле 3; теплові реле 4; автоматичні вимикачі 5, 6, 7; блоку додаткових контактів 8;

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

блоку живлення 9; вентилятору охолодження 10; актуатор блокування кришки 11; Регулятор контролера 12; Індикатор фази 13; Індикатор 14 автоматики; Індикатор ручного керування 15; Аварійний Індикатор 16; Кнопка «стоп» 17; Кнопка «пуск» 18.

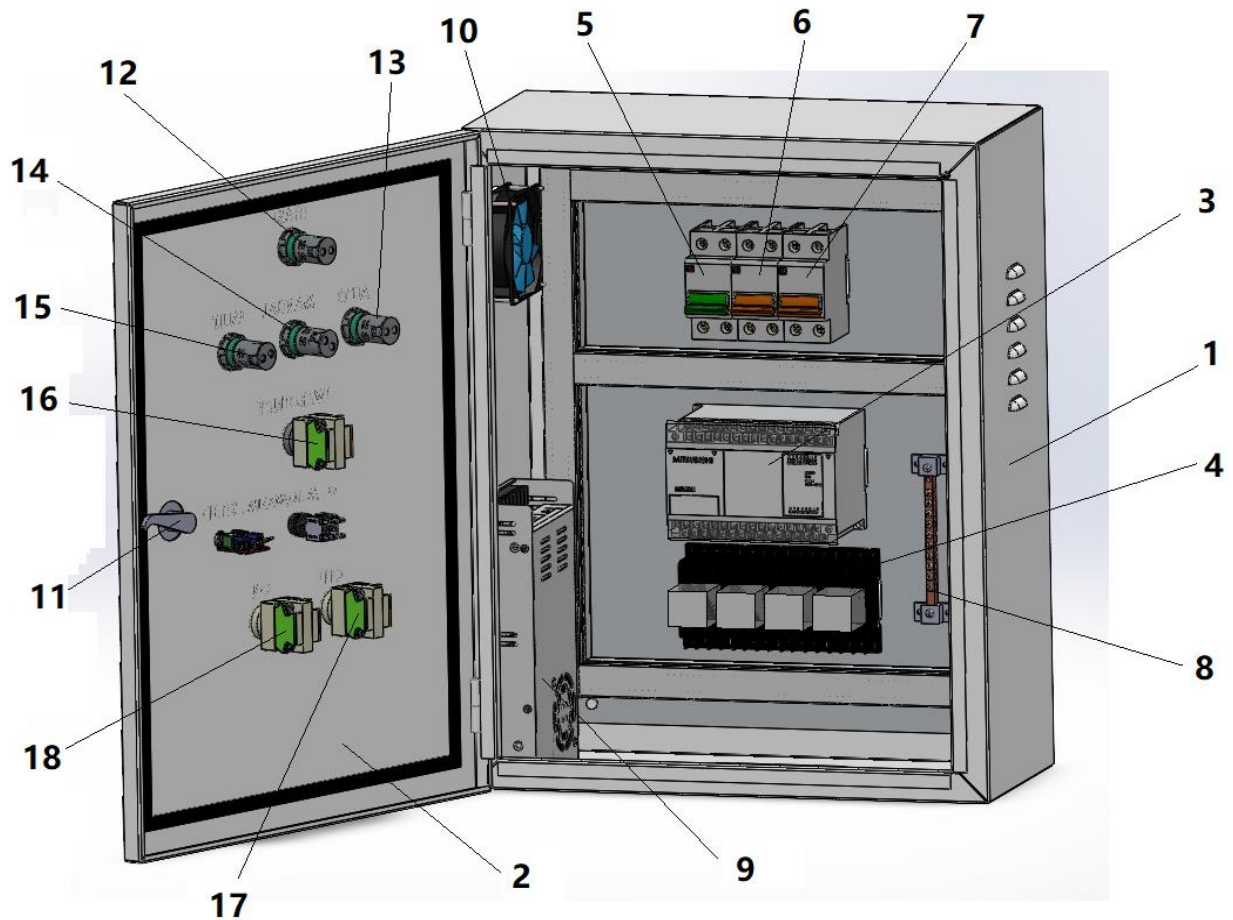


Рисунок 2.10 –Внутрішня будова конструкції пристрою для теплового захисту

Пристрій працює наступним чином. Трьох фазна мережа підключається через автоматичні вимикачі 5,6,7. Асинхронний двигун до теплового реле 4. Програма керування, що представлена у Додатку А, записується до мікропроцесорного блоку керування 3 і керує електродвигуном за допомогою регулятора 12. Стан роботи відображається на індикаторах 14,15,16. Запуск та зупинка двигуна здійснюється кнопками «Пуск» і «Стоп».

						Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ	40

У якості мікропроцесорного блок 3 обрано фірми Seamens. Пристрої SIPROTEC 5 (рис. 2.11) встановлюються в комірках розподільчих пристроїв низької та високої напруги. Модульна конструкція забезпечує узгодженість і цілісність усіх функцій. Найважливішими особливостями таких пристроїв [19-24] є: модульна структура апаратного, програмного забезпечення та зв'язку; інтеграція різних функцій, таких як керування, захист та реєстрація пошкоджень; уніфікація модулів обміну даними всіх пристроїв SIPROTEC 5; простота монтажу терміналів; взаємозамінність модулів, що гарантується Цифрові багатофункціональні пристрої захисту і керування серії SIPROTEC 5 оснащені потужним мікропроцесором. Всі завдання, від вимірювання до видачі команд для керування вимикачем, виконуються в цифровому вигляді. Вимірювальні входи отримують сигнали від ТС і ТТ і адаптовані для внутрішньої обробки SIPROTEC 5. Всі функції SIPROTEC 5 обробляються мікропроцесорною системою.



Рисунок 2.11 – SIPROTEC 5

Виконуються наступні процеси: фільтрація і підготовка вимірних значень для обробки, безперервний моніторинг вимірних значень,

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

моніторинг стану відключення відповідної захисної функції, запит порогових значень і налаштування міток часу, обробка сигналів логічних функцій управління, видача рішень про відключення вимикача і команд відключення, зберігання електричних значень з повідомлень про несправності і станів несправності, Управління операційною системою і такими функціями, як зберігання даних, годинник реального часу і т.д. SIPROTEC 5 отримує інформацію від системи та інших пристроїв через цифрові входи, наприклад, команди розподільного пристрою, сигнали про нові події і зміни в умовах енергосистеми.

Схема алгоритму роботи мікроконтролера така:

1. Ініціалізація та конфігурація: налаштуйте необхідні контакти, периферійні пристрої та таймери на вашому мікроконтролері для операцій введення та виведення.

2. Зчитування датчика струму: постійно контролюйте датчик струму, підключений до двигуна, щоб виміряти струм двигуна. Використовуйте відповідні функції аналогового чи цифрового введення, які надаються мікроконтролером.

3. Set Threshold: визначте порогове значення для максимально допустимого струму. Цей поріг буде змінюватися залежно від технічних характеристик двигуна та бажаного рівня захисту від перевантаження.

4. Перевірити струм: порівняйте виміряний струм із пороговим значенням. Якщо струм перевищує порогове значення, це вказує на стан перевантаження.

5. Увімкніть механізм захисту: після виявлення стану перевантаження здійсніть відповідні захисні заходи. Це може включати активацію тривоги, надсилання сигналу для вимкнення двигуна або запуск реле для відключення двигуна від джерела живлення. Використовуйте вихідні функції мікроконтролера для керування необхідними контактами та периферійними пристроями.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

6. Затримка та скидання: щоб уникнути помилкового спрацьовування через тимчасові стрибки струму, застосовуйте затримку або період гістерезису. Після усунення стану перевантаження зачекайте певний час, щоб забезпечити стабільність, перш ніж скинути систему захисту.

7. Повторення: безперервно повторюйте процес вимірювання струму, перевірки на наявність перевантажень і вжиття захисних дій за потреби. Програма керування мікропроцесорним блоком, що представлена у Додатку А.

2.6 Висновки до другого розділу

Було проведено аналіз режимів роботи пристрою захисту. Вибрані елементи системи. Розроблено конструкцію корпусу, та визначено розташування елементів. Запропоновано обрати мікропроцесорний блок SIPROTEC 5 від Siemens для управління, контролю та захисту асинхронного електродвигуна. Розроблено алгоритм, що представлено на рис. 2.12

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

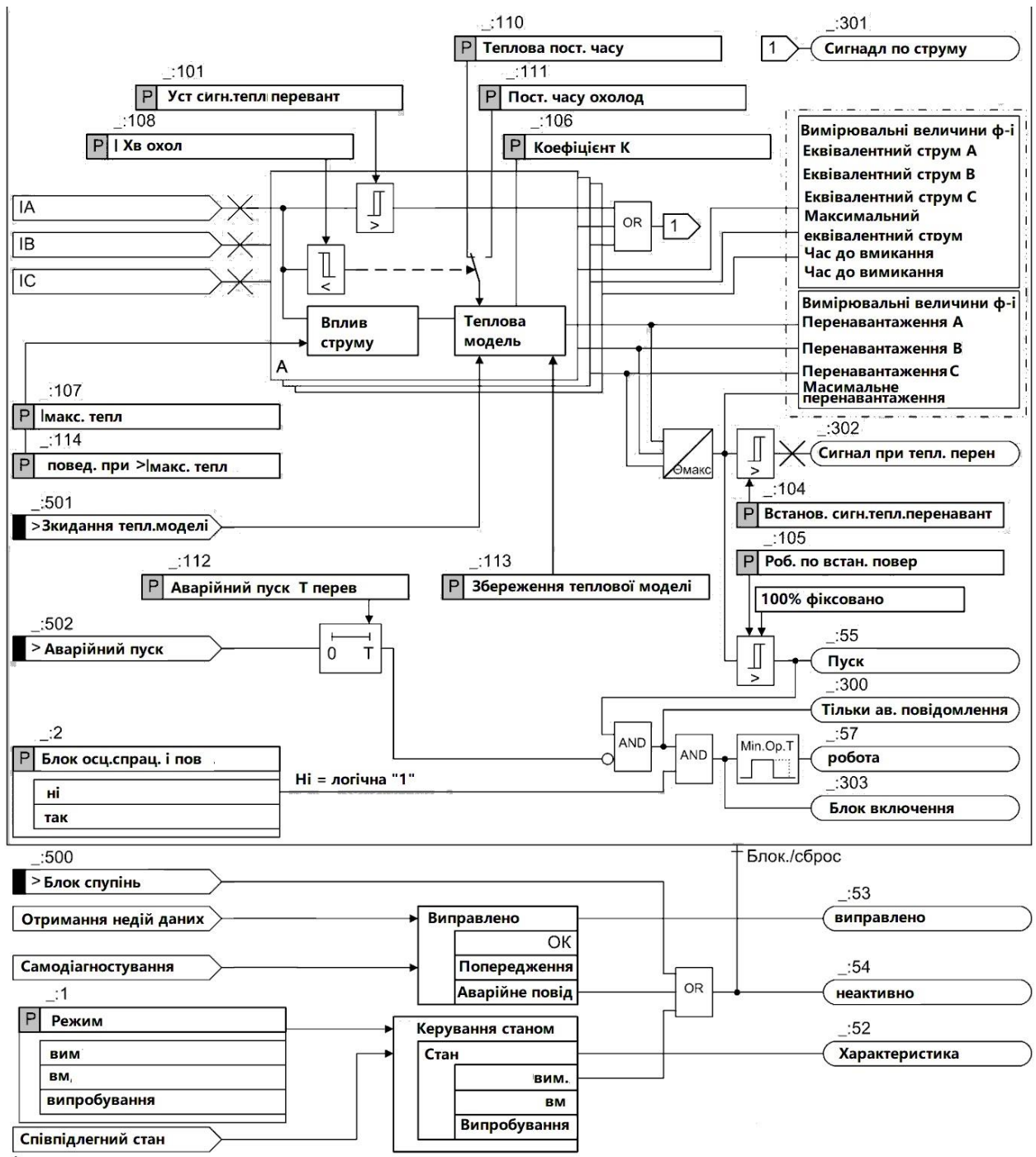


Рисунок 2.12 - Схема алгоритму роботи блоку захисту електродвигунів

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

коефіцієнту A_2 . У внутрішньому циліндрі передбачено повітря для імітації розсіювання тепла потоком повітря зсередини машини. Потужність теплового потоку від міді статора до навколишнього середовища пропорційна коефіцієнту A_1 . Теплопередача між міддю і сталлю визначається коефіцієнтом A_{12} , який моделює тепловий опір ізоляції.

Ця модель відповідає системі рівнянь [12, 13]:

$$\begin{cases} \Delta P_m = A_{12} \cdot (\Delta \theta_m - \Delta \theta_{cm}) + A_1 \cdot \Delta \theta_m + C_1 \cdot \frac{d\theta_m}{dt}, \\ \Delta P_{cm} = A_2 \cdot \Delta \theta_{cm} - A_{12} \cdot (\Delta \theta_m - \Delta \theta_{cm}) + C_2 \cdot \frac{d\theta_{cm}}{dt}. \end{cases} \quad (3.1)$$

де $\Delta \theta_{mi}$, $\Delta \theta_{st}$ представляють собою температурні перегриви міді і стали відносно температури навколишнього повітря, відповідно.

В [9] система (3.1) вирішується аналітично, і рівняння для температурної поведінки обмоток двигуна виводяться шляхом заміни рішення (3.1).

$$\theta(t) = \sum_1^6 C_{ij} \cdot e^{\lambda_i t}, \quad (3.2)$$

Рівняння, що представляє температурну поведінку обмотки двигуна, отримано шляхом аналітичного рішення (3.2) та заміни рішення (3.1), що складається з шести експонент, наближеним рішенням, що складається з двох експонентів:

$$\theta(t) = \theta_{уст} \cdot (I_i / I_n)^2 \cdot [K_n \cdot (1 - e^{-t/T_{max}}) + (1 - e^{-t/T_{min}}) \cdot (1 - K_n)], \quad (3.3)$$

де $\theta(t)$ -поточне перевищення температури обмотки;

$\theta_{уст}$ -перевищення температури встановився режимі;

I_i -поточне значення струму статора;

I_n -номінальне значення струму статора;

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

T_{\max} -максимальна константа нагріву листа магнітопроводу;

T_{\min} - мінімальне постійне нагрівання;

K_n -коефіцієнт нагріву, що враховує надлишкову складову стали вище температури обмотки.

Також принцип [13] використовується для розрахунку охолодження двигуна після відключення від електромережі. Тимчасова залежність температури при охолодженні двигуна виражається наступним рівнянням:

$$\theta(t) = \theta_{уст} \cdot [K_o \cdot (1 - e^{-t/T_{o\max}}) + (1 - e^{-t/T_{o\min}}) \cdot (1 - K_o)], \quad (3.4)$$

Де $T_{o\max}$ - максимальна постійна охолодження;

$T_{o\min}$ – мінімальна константа охолодження;

T_o - коефіцієнт охолодження.

Значення $\theta_{уст}$ визначається рішенням (3.1) встановився режимі, тобто $d\theta/dt=0$.

Фактично, у моделі [13, 14] двигун також представлений двома тілами нагрівання: обмоткою статора з мінімальною константою нагрівання T_{\min} і механічною сталлю з максимальною константою нагрівання T_{\max} . Недоліком цієї моделі є те, що не визначено початкові умови.

Найпростішою тепловою моделлю для електродвигунів є представлення одного нагрівального елемента з урахуванням [13, 18].

$$\Delta P = C \cdot \frac{d\theta}{dt} + A \cdot (\theta - \theta_c) \quad (3.5)$$

Електродвигун має нескінченну високу теплопровідність і, отже, всього об'єм має однакову температуру;

Кількість тепла, що обмінюється двигуном з навколишнім середовищем, пропорційно різниці температур між двигунами і навколишнім середовищем;

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				47

Теплові параметри двигуна і навколишнього середовища постійні і незалежні від температури двигуна (цей факт гарантує лінійність теплової моделі). У цьому випадку справедливе рівняння, що описує нагрівання двигуна:

Розв'язання цього рівняння, коли втратив двигуні $\Delta P = \text{const}$ і, отже, надмірна температура, що встановилася, стала:

$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta_{\text{уст}} + (\Delta\theta_0 - \Delta\theta_{\text{уст}})e^{-t/T_0},$$

де $\Delta\theta(t)$ -поточна надлишкова температура двигуна по відношенню до температури навколишнього середовища;

$\Delta\theta_{\text{out}}$ -надлишкова температура двигуна, що встановилася;

$\Delta\theta_0$ -початкове перевищення температури двигуна;

$T_0=C/A$ -постійна часу нагріву.

Остання модель є досить грубим наближенням, оскільки асинхронні двигуни є складні термодинамічні системи та його теплові параметри неоднорідні.

3.2 Розрахунки режимів роботи

Моторні мікропроцесорні блоки - це термомагнітні системи (МСВ), спеціально розроблені для захисту електродвигунів [23, 24]. Вони забезпечують захист від короткого замикання (магнітна функція) і перевантаження (теплова функція) і відповідають стандартам ІЕС 60947-2 і ІЕС 60947-4-1. Як і у випадку з тепловим реле перевантаження RTX³, температурна чутливість МСВ двигуна повинна бути встановлена якомога ближче до номінального струму двигуна. Захисні компоненти також складаються з біметалевих смужок, які розширюються відповідно до сили

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

струму. Вони мають температурну компенсацію для оптимальної роботи в широкому діапазоні температур. Поріг магнітного вимикання фіксований і в 13 разів перевищує номінальний робочий струм двигуна МСВ. Вимикачі МСВ також доступні у вигляді "тільки магнітних", тобто без компонентів теплового захисту. У цьому випадку забезпечується лише захист у разі короткого замикання. Це часто використовується в системах протидимного захисту, де двигун повинен продовжувати працювати, в тому числі в разі несправності, пов'язаної з перевантаженням. Для певних режимів пуску з контакторами з тепловим захистом за допомогою теплового реле достатньо використовувати автоматичний вимикач "тільки магнітний". Цей автоматичний вимикач для електродвигунів розроблено відповідно до вимог узгодження типу 2 (згідно з ІЕС 60947-4-1), що є найсуворішим з усіх проведених випробувань. Він характеризується надзвичайною відключаючою здатністю (I_{cu}) і стандартною відключаючою здатністю (I_{cs}), які гарантують безперервну роботу після короткого замикання. ПЗВ для електродвигунів також відповідають визначенню "пускач електродвигуна", оскільки виконують дві функції: вимикання та ізоляції. Останнє особливо пов'язане з достатнім зазором між нерухомими та рухомими контактами. Крива типу відключення для моторних вимикачів показана на діаграмі нижче на рис.3.2. [24]

Автоматичні вимикачі не повинні спрацьовувати при $I \leq$ або $= 1,05 A$ (заданий струм) згідно з вимогами ІЕС 60947-4-1. При значенні вище $1,05 A$, у разі теплового перевантаження, автоматичний вимикач спрацьовує за час, обернено пропорційний струму, що протікає.

Наприклад, він повинен спрацювати менш ніж за 2 години при $I = 1,2 I_r$, менш ніж за 4 хвилини при $I = 1,5 I_r$ і менш ніж за 10 секунд при $I = 7,2 I_r$.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

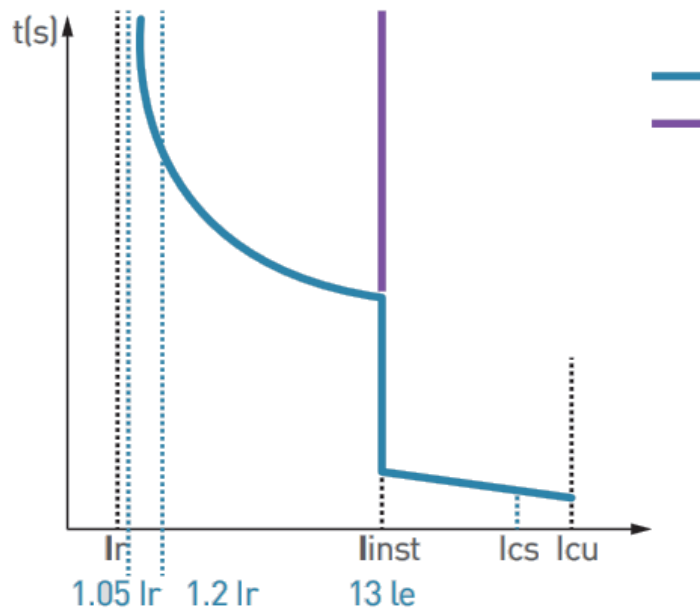


Рисунок 3.2 – Режим роботи

Саме магніти спрацьовують протягом декількох мілісекунд, коли перевищується струм, пов'язаний з коротким замиканням, що називається миттєвим спрацьовуванням. Для ПЗВ двигуна "тільки магнітний привід" немає зони теплового спрацьовування, є лише вертикальна крива миттєвого спрацьовування. Зворотний зв'язок про стан ПЗВ двигуна забезпечується допоміжними контактами, встановленими збоку або спереду. Доступні кілька типів, залежно від типу даних, що передаються (стан розмикання/замикання, відключення через магнітну помилку). МСВ двигуна також можуть бути оснащені допоміжними пристроями дистанційного керування (шунтами або роз'єднувачами напруги, доступними від 24 В до 400 В).

Захист від відключення та короткого замикання в такі спосіб: - Магнітний захист лінії та приймача від перенапруг короткого замикання (наприклад, крива D) Керування: - Увімкнення приймача - Вимкнення приймача Тепловий захист: - Захист приймача від тривалих перенапруг (перевантаження) - Додатковий захист у разі виходу з ладу двигуна Стрибки струму нижче 10 В спричинені значним дисбалансом між фазами або втратою однієї з фаз, або незвично довгим часом запуску (надмірний момент опору);

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				50

стрибки струму між 10 і 50 В зазвичай пов'язані з пробоем ізоляції двигуна; стрибки струму вище 50 В часто пов'язані з короткими замиканнями між фазами через випадкові причини (ремонтні роботи, тощо). Стандарт ІЕС 60947-4-1 вимагає проведення декількох випробувань струмом короткого замикання для встановлення координації типу 2.

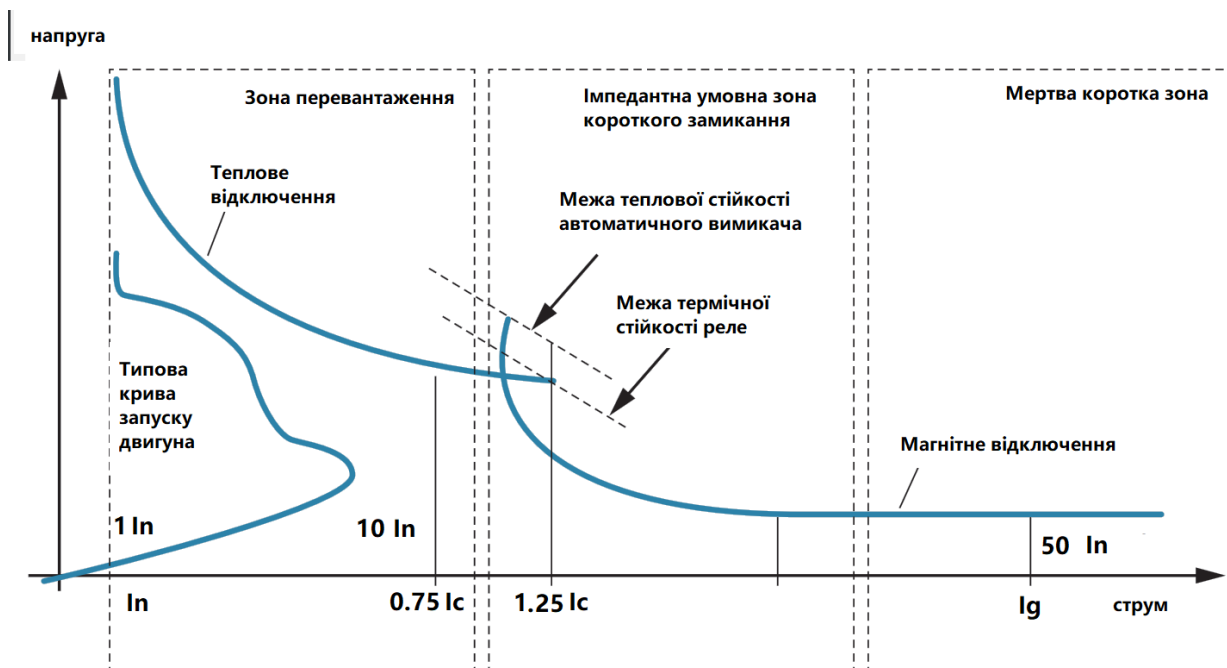


Рисунок 3.3 – Графік режиму роботи та захисту від перевантаження

У зоні перевантаження теплове реле має бути захищене магнітним вимикачем. Його крива граничної напруги повинна бути нижчою, ніж у автоматичного вимикача та пов'язаних з ним провідників. У зоні короткого замикання, з іншого боку, автоматичний вимикач захищає теплове реле. Значення струму встановлюється відповідно до характеристик джерела живлення (потужність, вихідний опір, площа поперечного перерізу провідника тощо). У номінальній зоні імпедансного короткого замикання необхідно дотримуватися особливої обережності, щоб забезпечити сумісність між захисними пристроями. Це точка, де перетинаються довготривалі перевантаження і малозначні короткі замикання. Внутрішні несправності в

двигунах можуть переходити від перевантаження до короткого замикання, оскільки ізоляція поступово руйнується. Щоб контактор був захищений, його межа теплового напруження повинна бути вищою за граничну криву теплового захисту. Модель для розрахунків показана на рис.3.4.

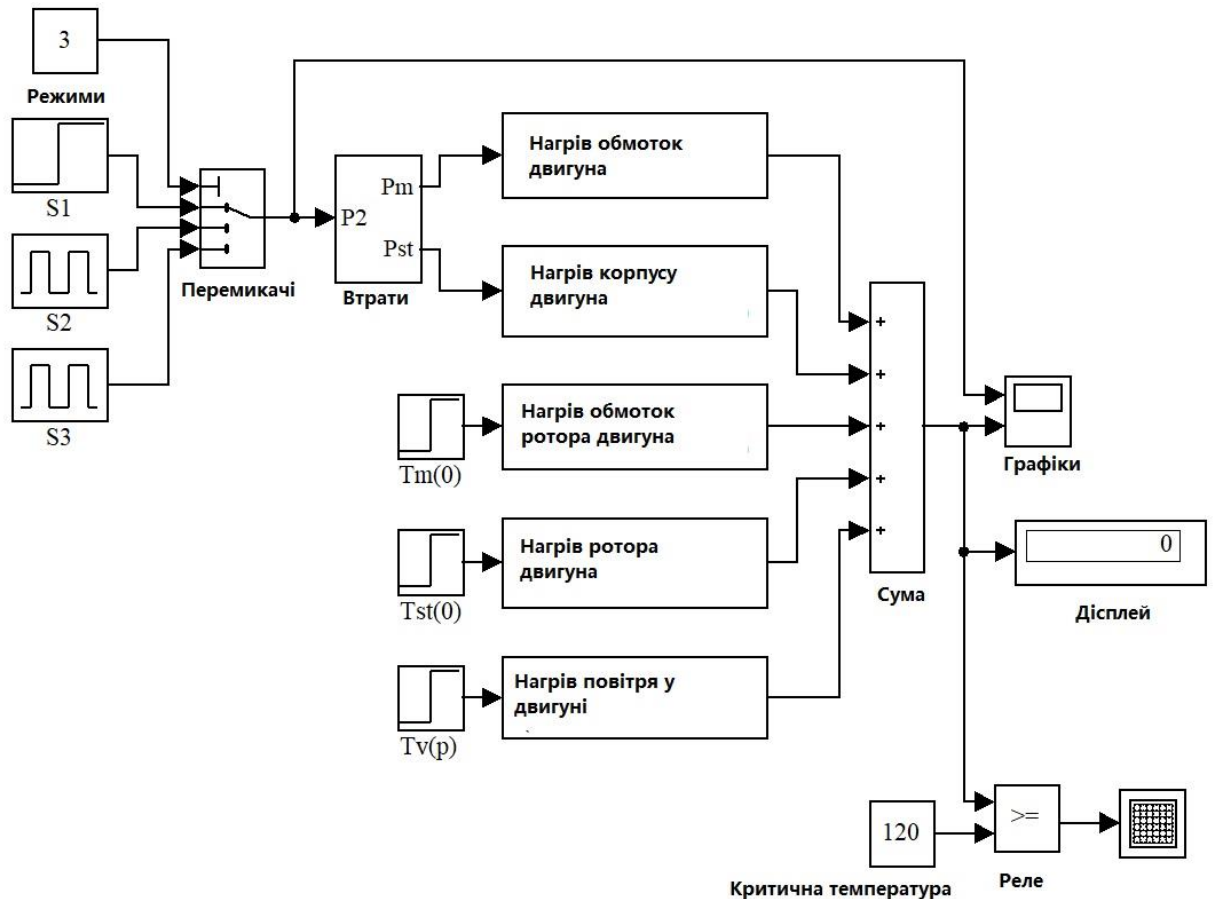


Рисунок 3.4 – Структурна схема моделі для визначення температури

3.3 Висновки до третього розділу

Проведені розрахунки показали можливість застосування обраних елементів для теплового захисту електродвигуна. Отримані графіки навантаження та температур міді та сталі обмоток та корпусу електродвигуна представлені на рис.3.4.

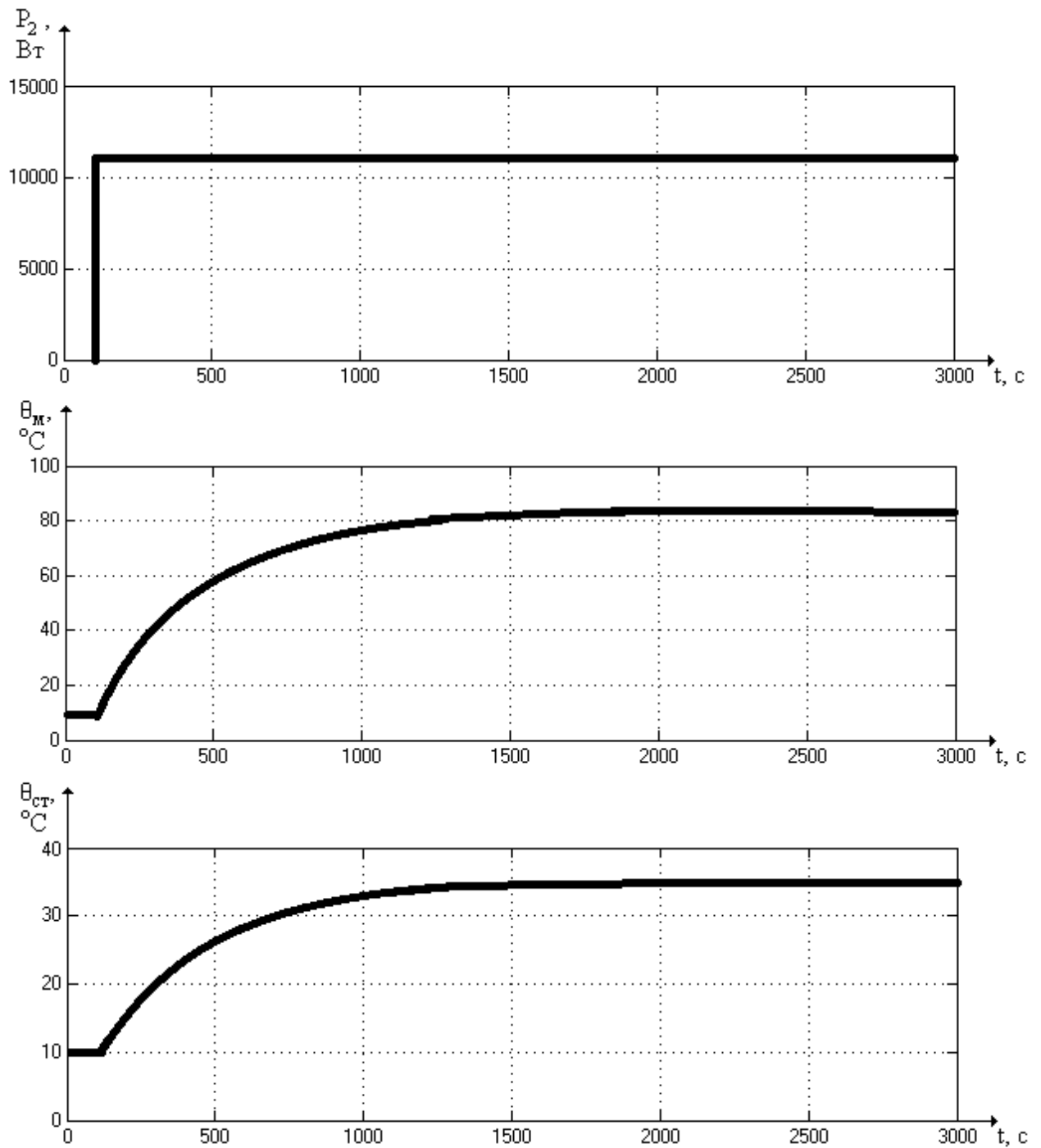


Рисунок 3.6 - Графік зміни навантаження та температур міді та сталі в режимі S1

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу та розрахунків розроблено пристрій теплового захисту електродвигунів від перенавантажень на основі SIPROTEC 5 від Siemens. Пристрій призначено для узгодження функцій автоматичного керування, частотного регулювання, повного захисту та енергозбереження обладнання на лініях автоматизації промислових підприємств напругою живлення 3x220/380 В з трифазними асинхронними двигунами, насосами, вентиляторами, компресорами, підйомно-транспортним обладнанням, потужністю від 0,25 до 630 кВт.

Розроблений пристрій - це сучасні, економічно ефективні рішення, які дозволяють встановити повністю автоматичний режим керування приводом з дистанційним вимірюванням параметрів, аналізом режимів, записом і зберіганням параметрів технологічного циклу; переглядати поточні вимірні значення в будь-який час на місці і на комп'ютері за допомогою телевізійних вимірювань; і використання оперативної та збереженої інформації з СУБД для розробки найбільш ефективного режиму роботи для оптимізації моторесурсів, енергоспоживання та роботи персоналу; виконувати (некомерційні) вимірювання енергоспоживання та передавати телеметричні сигнали до технічних вимірювальних систем вищого рівня; та виконувати функції локальної автоматизації технологічних процесів; передавати сигнали тривоги до АСУ ТП вищого рівня; отримувати та обробляти сигнали керування від АСУ ТП вищого рівня; відображення електричних параметрів, стану навантаження та часу роботи; можна дистанційно налаштовувати та керувати з віддаленої робочої станції; віддалений термінал на дверцятах шафи; вбудований послідовний порт RS485 для підключення до протокольної шини Modbus RTU.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пристрої захисту асинхронних електродвигунів від аварійних режимів. Електронний ресурс, Режим доступу: https://elearn.nubip.edu.ua/pluginfile.php/600318/mod_assign/intro/1.%20D0%97%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96%20D0%B2%D1%96%D0%B4%20_%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D1%82.pdf

2. Пристрої захисту асинхронних електродвигунів. Режим доступу: <https://ukrspecavtomat.com.ua/products/ustroystva-zashchity-asinhronnyh-elektrovdigatelyey>

3. Protection and control of three-phase asynchronous motors/ Global Specialist In Electrical And Digital Building Infrastructures// EXB19046 - October 2022, 66 p.

4. Експериментальна установка для реалізації складних високоточних алгоритмів керування електроприводом змінного струму – І.В.Сметана, асп. – Вісник Вінницького політехнічного університету, 2005 - №5, с.22 - 25

5 Патент України № 64316, Пристрій для захисту асинхронного електродвигуна по мережі живлення/ Дубовник В. Г., Лебедев Л. М., Пилипчук А. О. // Оpubліковано 10.11.2011, Бюл.№ 21, 2011 р.

6. Патент України №36420, Пристрій для захисту трифазного електродвигуна В.Ф. Короля/ В.Ф. Король// Оpubліковано 16.04.2001, Бюл. № 3, 2001

7. Інтелектуальне електронне пристрій АВВ диференціальної захисту шин REB 670. Керівництво по експлуатації продукту 1.1. редакція а. Дата випуску: березень 2007. – 58с.

8. Інтелектуальне електронне пристрій АВВ диференціальної лінії захисту RED 670. Керівництво по експлуатації продукту 1.1. редакція а. Дата випуску: березень 2007. – 92с.

										Арк.
										55
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ					

9. АВВ Інтелектуальне електронне пристрій дистанційної захисту лінії REL 670. Керівництво до експлуатації продукту 1.1. редакція а. Дата випуску: березень 2007. – 91с.

10. АВВ Інтелектуальне електронне пристрій дистанційного захисту трансформатора. Керівництво по експлуатації. RET 670. Версія продукту 1.1. редакція а. Дата випуск: березень 2007. – 119с

11. Яндульський О . С. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. С. Яндульський, О. О. Дмитренко ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані . – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 103 с.

12. Кідиба В . П Релейний захист електроенергетичних систем Навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. 504 с.

13. Колісник, М.О. Надійність програмних засобів мікропроцесорних пристроїв управління системою телекомунікації: навч. посібник / М.О. Колісник, І.В. Піскачова. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 167 с.

14. Електропривод постійного струму. Авторське свідоцтво №4618, кл. Н 02 Р 5/06, 1993. Авт.: Сокорченко М.І.

15. Електропривод. Авторське свідоцтво №6184, кл. Н 02 Р 5/00, 1993. Авт.: Богданов І.К., Гольц М.Є., Литвин М.С., Прокопенко О.А.

16. Пристрій для керування електродвигуном. Авторське свідоцтво №4618, кл. Н 02 Р 6/00, 2003. Авт.: Пасмурських О.О., Долженко В.В., Дубовський Є.В.

17. Цифрові системи регулювання електроприводу з комбінованим керуванням. Автореф. дис. кандидата техн. наук 30.09.1999 Мінтус А.М. Донецький державний технічний університет Д., 1999 – 14с.

18. SIEMENS SIPROTEC 5 Пристрій підключення високої напруги 6MD 85/86 V6.00 і вище. Керівництво по експлуатації. C53000-G5056-C015-4.- 1006с.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

19. SIEMENS SIPROTEC 5 ДЗ, ДЗЛ, МТЗ для 3-х фазного відключення. 7SA82, 7SD82, 7SL82, 7SA84, 7SD84, 7SA86, 7SD86, 7SL86, 7SJ86. V6.00 і вище. Керівництво по експлуатації. C53000-G5056-C010-6.-1690с.

20. SIEMENS SIPROTEC 5 ДЗ, ДЗЛ 1- і 3-х фазне відключення вимикачів. 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK87. V6.00 і вище. Керівництво по експлуатації. C53000-G5056-C011-6.-1682с.

21. SIEMENS SIPROTEC 5. МТЗ. 7SJ82/7SJ85. V6.00 і вище. Керівництво по експлуатації. C53000-G5056-C017-5.-1470с.

22. SIEMENS SIPROTEC 5. Захист електродвигуна 7SK82, 7SR85. V6.00 і вище. Керівництво по експлуатації. C53000-G5056-C024-3.-1454с

23. SIEMENS SIPROTEC 5. Пристрій захисту збірних шин. 7SS85. V6.00 і вище. Керівництво по експлуатації. C53000-G5056-C019-3.- 634с

24. SIEMENS SIPROTEC 5. Диференціальна захист трансформатора. 7UT82, 7UT85, 7UT86, 7UT87. V6.00 і вище. Керівництво по експлуатації. C53000-G5056-C016-5.- 1582с.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Код програми для мікроконтролерного пристрою теплового захисту
електродвигуна

```
// Include necessary libraries and header files
#include <siemens_library.h>

// Define pin numbers for current sensor, alarm, and motor control
const int currentSensorPin = 1;
const int alarmPin = 2;
const int motorControlPin = 3;

// Define threshold value for maximum allowable current
const float currentThreshold = 10.0; // Adjust this value according to your motor's specifications

void setup() {
    // Initialize pins and peripherals
    pinMode(currentSensorPin, INPUT);
    pinMode(alarmPin, OUTPUT);
    pinMode(motorControlPin, OUTPUT);

    // Additional setup if required for your specific Siemens microcontroller
}

void loop() {
    // Read current sensor value
    float current = readCurrentSensor();

    // Check for overload condition
    if (current > currentThreshold) {
        // Activate protection mechanism
        activateAlarm();
        shutDownMotor();
    } else {
        // Reset protection mechanism
        deactivateAlarm();
        powerOnMotor();
    }

    // Add delay or hysteresis if necessary to avoid false triggering

    // Repeat the loop
}

float readCurrentSensor() {
```

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

```

// Code to read the current sensor and return the current value
// Use appropriate Siemens microcontroller functions to read the sensor

// Replace this with actual code for reading the current sensor
return 0.0;
}

void activateAlarm() {
// Code to activate the alarm
// Use appropriate Siemens microcontroller functions to control the alarm pin

// Replace this with actual code for activating the alarm
}

void deactivateAlarm() {
// Code to deactivate the alarm
// Use appropriate Siemens microcontroller functions to control the alarm pin

// Replace this with actual code for deactivating the alarm
}

void shutDownMotor() {
// Code to shut down the motor
// Use appropriate Siemens microcontroller functions to control the motor control pin

// Replace this with actual code for shutting down the motor
}

void powerOnMotor() {
// Code to power on the motor
// Use appropriate Siemens microcontroller functions to control the motor control pin

// Replace this with actual code for powering on the motor
}

// Additional functions or code as required for your specific implementation

```

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59