

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка конструкції стенду для тестування електричних реле

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

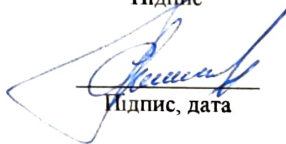
Шифр МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-22-1


Підпис

Тимченко Д.С.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Горященко С.Л.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Луканич С.В.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

24 12 2022 р.


Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

Хмельницький 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури _____

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень магістр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр і назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр і назва

Спеціалізація _____

Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

_____.2023____

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Тимченко Денис Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента .

1. Тема роботи Розробка конструкції стенду для тестування електричних реле

керівник роботи Горященко С.Л., к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 16 08 2023 р. № 30

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи Реле від 5 до 50 В _____

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

1 Огляд існуючих рішень для дослідження реле _____

2 Розробка конструкції стенду для дослідження реле _____

3 Розрахунок елементів реле _____

4 Експериментальні дослідження роботи пристрою _____

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

МРМА 23.00.00.00 ДО1, МРМА 23.00.00.00 ДО2, МРМА 23.00.00.00 Д11,
МРМА 23.00.00.00 Д2, МРМА 23.00.00.00 Д3, МРМА 23.00.00.00 В3, МРМА
23.00.00.00 Е3, МРМА 23.00.00.00 СК, МРМА 23.05.00.000 В3

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові

Тимченко Денис Сергійович

2. Тема магістерської роботи; Розробка конструкції стенду для тестування електричних реле

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Воросил Г. Р.
к.т.н., доцент

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 9 арк., сторінок записки 89

5. Захисні реле є важливою частиною системи електропостачання. Їх дії можуть змінювати топологію шляхом розмикання і замикання вимикача. Несправності в електропостачанні, перемикання режиму оператором і інші перебої в подачі електроенергії можуть привести до перерозподілу електричної і магнітної енергії, накопиченої в ємнісних і індуктивних елементах. Електромагнітні реле як і раніше дуже широко використовуються в електротехніці, особливо для автоматичного перемикання електродвигунів. Наприклад, для домашнього холодильника або пральної машини потрібно пусковий реле. У цих пристроях реле більш стійке до стрибків струму при запуску електродвигуна, особливо сильних стрибків напруги при відключенні живлення, тому воно більш стійке, ніж електронні пристрої. В магістерській роботі здійснюється розробка стенду для дослідження електромагнітних реле постійного струму, а саме тимчасових характеристик, що є актуальним для дослідження електромагнітних реле дозволяє перевірити електромагнітні реле постійного струму, що працюють на напругу від 5 В до 250 В. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики магістерської роботи, а саме існуюче обладнання для перевірки реле. В другому здійснюється розробка конструкції стенду для дослідження реле. В третьому розділі проведені розрахунки елементів реле, що перевіряється. В четвертому показано стенд та експериментальне тестування реле.

Підпис студента

"22" "12" 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол № 2 від "27" "12" 2023 р.

Оцінка проєкту ЕК

Рекомендації ЕК

добре 4,5/5

рекомендовано до впровадження у навчальний процес

Особливі відмітки



Технічний секретар

"27" "12" 2023 р.

ЗМІСТ

	стр
Вступ.....	5
1 Огляд існуючих рішень для дослідження реле.....	9
1.1 Короткі теоретичні відомості.....	9
1.2 Секундомір електричний лабораторний ПВ 53.....	14
1.3 “Вимірювач параметрів реле СНІ 2400”.....	15
1.4 Стенд “Вимірювач параметрів реле цифровий Ф291”.....	18
1.5 Електронний секундомір.....	19
1.6 Електронний секундомір “СЭЦ-10000”.....	20
1.8 Megger SMRT1.....	23
1.9 OMICRON CMC 356.....	25
1.10 SEL-751A.....	27
1.11 Висновки до першого розділу.....	28
2 Розробка конструкції стенду для дослідження реле.....	30
2.1 Розробка схеми вимірювання.....	30
2.2 Розробка електричної схеми стенду.....	33
2.4 Розробка програми вимірювання в середовищі LabView.....	37
2.5 Блок-діаграма віртуального приладу.....	39
2.6 Розробка методики вимірювання характеристик реле.....	40
2.7 Висновки до другого розділу.....	45
3 Розрахунок елементів реле.....	46
3.1 Розрахунки провідності робочого зазору.....	46
3.2 Розрахунки магнітної провідності неробочого зазору.....	49
3.3 Розрахунки провідності зазору витоку.....	53
3.4 Розрахунки коефіцієнтів розсіювання струму.....	55

МРМА 23.00.00.000ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис		Літ.	Аркуш	Аркушів
				Розробка конструкції стенду для тестування електричних реле	М	3	88
Розроб.		Тимченко Д.			ХНУ, гр. ЕТМ-22-1		
Перев.		Горященко С.Л.					
Н. контр.							
Затв.		Поліщук О.С.					

4.1 Експериментальний зразок вимірювального пристрою.....	68
4.2 Проведення експериментальних вимірювань	70
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	80
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	82
Додатки.....	86

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

ВСТУП

Захисні реле є важливою частиною системи електропостачання. Їх дії можуть змінювати топологію шляхом розмикання і замикання вимикача. Швидка ізоляція несправностей елементів енергосистеми за допомогою захисних реле має вирішальне значення для підтримки стабільності і безперебійності електропостачання практичних споживачів. З іншого боку, неправильна робота системи захисту через короточасні енергетичні події може мати шкідливі наслідки для подальшої роботи енергосистеми. Несправності в електропостачанні, перемикання режиму оператором і інші перебої в подачі електроенергії можуть привести до перерозподілу електричної і магнітної енергії, накопиченої в ємнісних і індуктивних елементах. Такий перерозподіл електроенергії не відбувається миттєво, і енергосистема повинна пройти через перехідний стан, перш ніж вона досягне нового стійкого стану. Всередині протягом перших кількох циклів після відключення електроенергії, щоб підтримувати стабільність системи і мінімізувати ступінь пошкодження обладнання, швидкодіючі реле захисту приймають рішення про наявність і місцезнаходження збоїв, більшість реле захисту приймають рішення на основі частоти 50 або 60 Гц і основна напруга поточного сигналу. Але саме в цей момент сигнали напруги і струму серйозно пошкоджуються через перехідні збої, викликані на частотах вище і нижче основної частоти енергосистеми, у вигляді експоненціально затухаючих компонентів постійного струму. Динамічні характеристики реле захисту в значній мірі залежать від принципів його конструкції.

Вирішує такі питання, як вибірковість, чутливість, безпека і надійність. Крім того, динамічні характеристики швидкодіючих реле захисту значною мірою залежать від сигналів, що генеруються вимірювальним трансформатором, які залежать від загальної перехідної характеристики вимірювального трансформатора та типу перехідного процесу, що генерується енергосистемою [1, 2].

Моделювання енергосистем було поширеною інженерною практикою у багатьох комунальних службах, дослідницьких центрах та університетах протя-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гом більше 30 років. Системні комп'ютерні моделі основних компонентів системи використовувалися в таких програмних пакетах, як програми короткого замикання, програми навантаження і стабільності, а також програми електромагнітних переходів. Нижче наведено моделювання релейної системи, що впливає на роботу та топологію енергосистеми:

Воно виконується в меншій мірі. За останні 15 років на ринок виходить все більше програм для розрахунку електромереж. Можливість їх використання для моделювання захисних реле та інших дослідження в області захисту розширюються. Модель системи захисту може бути використана для:

- вивчення і вдосконалення конструкції і алгоритмів захисту;
- вибору типу реле, відповідного для конкретного застосування;
- перевірки, повторної перевірки та коригування параметрів реле;
- вивчення поведінки реле в разі збою мережі;
- спростити і здешевити тестування конструкції і принципу дії реле за допомогою моделі реле;
- замість використання реального пристрою;
- включити автономне тестування із замкнутим контуром, тим самим знизивши витрати;
- виберіть важливі точки тестування, щоб скоротити необхідну кількість тестів з використанням реального реле.

Електромеханічні елементи (поряд з електромагнітними) є найбільш старими електричними елементами автоматики. Проте, видозмінюючись і удосконалюючись, вони успішно конкурують із відносно новими магнітними елементами.

Електромагніт – найбільш простий перетворювач електричного сигналу в механічне зусилля й переміщення. Вхідний електричний сигнал подається на обмотку електромагніту, який притягає рухому частину, називану якорем.

По роду струму в обмотці розрізняють електромагніти постійного й змінного струму. Електромагніти постійного струму підрозділяють на нейтральні й

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поляризовані. Нейтральні притягають якір при будь-якій полярності струму в обмотці. У поляризованих електромагнітах напрямок зусилля, що діє на якір, змінюється при зміні полярності струму в обмотці.

Часто електромагніти є приводними (тяговими) і служать для переміщення таких виконавчих пристроїв, як клапани, заслінки й т.п. Однак найбільше поширення одержали електромагніти, постачені контактною системою – електромагнітні реле.

Електромагнітні реле є одним з розповсюджених елементів багатьох систем автоматики, і випускається понад 200 типи тільки реле постійного струму.

Реле призначені для виконання логічних операцій і прямого управління малопотужними силовими навантаженнями, що встановлюються в низьковольтних комплексних пристроях управління промисловими об'єктами, а також в пристроях для комерційного, медичного та аналогічного обладнання. Залежно від значення вихідної потужності реле його можна розділити на високочутливе (до 10 МВт) і слабкострумове з нормальною чутливістю (до 1-5 Вт).

Реле можна розділити на так звані реле часу, які зазвичай бувають швидкодіючими і повільнодіючими, в залежності від параметрів часу.

Існують різні вимоги до електромагнітних реле, які не завжди виконуються в одній конструкції. По-перше, встановлюються вимоги до чутливості, комутації та потужності. Часто реле мають невеликі розміри, вимагають великої кількості комутаційних ланцюгів (контактів), мають тривалий термін служби, досить надійні в умовах вібрації, різких коливань температури і вологості, короткий час спрацьовування і спрацьовування може значно затримуватися.

Елементи електромагнітної автоматики широко використовуються в якості засобів автоматизації у всіх галузях промисловості, значну частку яких складають різні електромагнітні механізми. У зв'язку з цим знання теорії, практики розрахунків і основ оптимального проектування останніх незамінні для інженерів різних спеціальностей, особливо інженерів-електриків і електромеханіків.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання електромагнітних реле в електронних пристроях пред'являє багато важливих вимог до технічної документації, літературі і, в кінцевому рахунку, до знань розробників обладнання. Використання найкращого рішення, що відповідає цим вимогам, дозволяє знизити вагу і габарити, знизити витрати, підвищити стійкість до зовнішніх дестабілізуючих факторів, а також підвищити надійність і довговічність електронних пристроїв.

Електромагнітні реле як і раніше дуже широко використовуються в електротехніці, особливо для автоматичного перемикавання електродвигунів (пускові реле), а також в електричних ланцюгах транспортних засобів. Наприклад, для домашнього холодильника або пральної машини потрібно пусковий реле. У цих пристроях реле більш стійке до стрибків струму при запуску електродвигуна, особливо сильних стрибків напруги при відключенні живлення, тому воно більш стійке, ніж електронні пристрої.

Необхідно розробити стенд для дослідження електромагнітних реле постійного струму, а саме тимчасових характеристик. Час спрацьовування і час спрацьовування реле.

Стенд живиться від мережі напругою 50 В з частотою 220 Гц.

Стенд для дослідження електромагнітних реле дозволяє перевірити електромагнітні реле постійного струму, що працюють на напругу від 5 В до 50 в, використовуючи власне джерело живлення. Цей діапазон може бути значно збільшений за допомогою Джерела живлення стороннього виробника.

Реле являє собою розімкнуте, одностабільне, з 3 контактними групами, з комбінацією розмикаючих, замикаючих і перемикаючих контактів, придатне для комутації електричних ланцюгів постійного і змінного струму частотою до 400 Гц. [3]

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕ

1.1 Короткі теоретичні відомості

Як відомо, на відміну від датчиків, що безперервно та плавно реагують на зміни вхідних величин реле на такі зміни реагують стрибкоподібно. Тільки після того як величина досягне *max* або *min* значення, реле спрацьовує і відбувається увімкнення або вимкнення електричної мережі, що керується ним.

Ото ж будь який датчик може перетворитися на реле, якщо примусити його реагувати на екстремальні значення параметрів процесу. Реле побудовані на різних принципах дії бувають різної конструкції і можуть виконувати різні функції, наприклад:

1) виявляти граничні значення величин, що контролюються та фіксувати це, тобто виконувати роль звичайного датчика, наприклад, вже згадувані контактні датчики;

2) підсилювати сигнал, що поступає (проміжне реле);

3) збільшувати або зменшувати час дії сигналу, в залежності від чого вони поділяються на:

- без інерційні (час спрацювання приблизно 0,001 с);
- швидкодіючі (0,005 - 0,05 с);
- нормальні (0,15 - 0,5 с);
- уповільнені (0,15-1 с);
- реле часу;
- виконувати розгалуження одного і того ж сигналу по багатьом електричним ланцюгам;
- перемикати електричні мережі;
- виконувати вмикання та перемикання різних об'єктів.

За вхідним сигналом реле можуть бути: механічні, гідравлічні, пневмати-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чні, акустичні, магнітні, хімічні, теплові, електричні.

За характером відповіді на сигнал, що змінюється реле поділяються на: максимальної і мінімальної дії, реле часу.

За будовою сприймаючих та виконавчих органів на: контактні та безконтактні.

Залежно від призначення: реле для моніторингу, сигналізації, захисту, відключення, контролю і регулювання.

Існує 2 типи механічних реле. До першої категорії відносяться реле, в яких механічний вплив приводить в дію певні механізми. Наприклад, якщо ви кинете монетку в торговий автомат, то отримаєте склянку води. 2-й тип механічних реле-це так звані кінцеві вимикачі. У них механічний вплив викликає відключення або активацію електричних ланцюгів. Наприклад, заготівля на шліфувальному верстаті приводиться в рух електродвигуном натисканням механічного важеля, що призводить до зміни напрямку її руху.

Дія функціональних органів електромагнітного реле можна простежити за схемою, наведеною на малюнку 1.1. Приймач а добре перетворює вхідну амплітуду (напруга). $U_{вх}$, що надходить на обмотку 2 магнітопроводу 1, в проміжну величину, тобто в механічну силу якоря 3. Механічна сила якоря $F_я$ діє на контактну систему виконавчого органу В. Проміжна величина - сила якоря $F_я$, - пропорційна вхідній величиною $U_{вх}$, порівнюється із заданим значенням сили $F_{пр}$ розвивається пружиною 9 проміжного органу Б. При $U_{вх} < U_{ср}$, $F_я$.

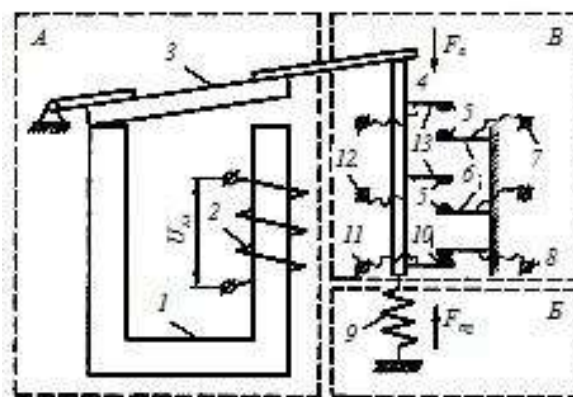


Рисунок 1.1 – Схема роботи електромагнітного реле

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі функціонування електромагнітні реле у часовому масштабі розрізняють чотири фази: період (час) спрацьовування $t_{сп}$, робочий період $t_{раб}$, період (час) відключення $t_{откл}$, період (час) спокою t_n . Залежність вихідної і вихідної величин від часу зображено на рисунку 1.2.

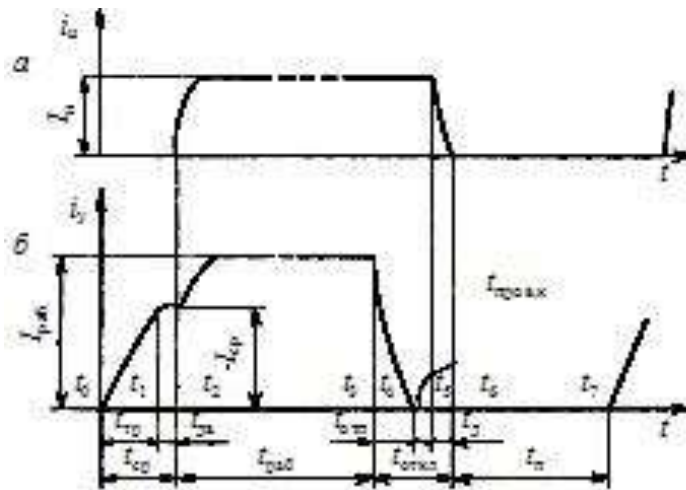


Рисунок 1.2 – Залежність вихідної (а) і вихідної (б) величин від часу

Період спрацьовування включає проміжок часу від моменту початку дії вхідного сигналу на сприймаючий орган до моменту появи сигналу в керованому ланцюзі. Цьому періоду на рисунку 1.2 (б) відповідає відрізок осі абсцис $t_{сп}=t_2-t_0$. У момент t_0 струм в обмотці реле зростає до значення, при якому електромагнітної силі F_e , що діє на якір, починає протидіяти сила пружини F_m (механічна сила) проміжного органу. Вхідна величина при цьому називається величиною рушання при спрацьовуванні.

Періоду рушання відповідає відрізок $t_{mp}=t_1-t_0$. У момент часу t_1 якір електромагніту реле починає рух. Протягом $t_{об}=t_2-t_1$ якір переміщується, долаючи протидію проміжного органу Б приводячи в дію виконавчий орган В рисунок 1.1.

В кінці ходу якоря замикаються контакти виконавчого органу, струм навантаження i_n , починає зростати від нуля до сталого значення. Вхідна величина, при якій починається управління вихідним ланцюгом, називається величиною

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спрацювання (I_{cp}). Потужність P_{cp} , відповідна I_{cp} , називається потужністю спрацювання.

Час спрацювання $t_{ср} = t_{mp} + t_{об}$.

Час спрацювання електромагнітних реле коливається від 1...2 до 20 мс. Електромагнітні реле часу забезпечують витримку до 10 с.

Для оцінки часу спрацювання реле допустимо використовувати вираз:

$$T_{ср} = t_1 \cdot k_3 - b \cdot m - a, \quad (1.1)$$

де t_1 – час спрацювання при заданому коефіцієнті запасу k_3 і коефіцієнті $m = 1$;

a, b – коефіцієнти, які визначаються в залежності від типу реле і значень k_3 і m .

Для швидкодіючих реле при $k_3 = 1,5 \dots 2$ значення коефіцієнта a наближається до одиниці. Для звичайних реле при $k_3 = 1,5 \dots 3$ значення $a = 0,25 \dots 0,95$, значення коефіцієнта b знаходиться зазвичай в межах 1,4...1,6.

Робочий період включає проміжок часу $t_{раб} = t_3 - t_2$, тобто час від моменту управління вихідним ланцюгом t_2 до моменту припинення впливу на сприймаючий орган вхідного сигналу t_3 . Струм починає рости до сталого значення $I_{раб}$ (рисунк 2 б) – це робоче значення вхідної величини, яке забезпечує надійне спрацювання реле.

Відношення $I_{раб}/I_{ср} = k_3$ називається коефіцієнтом запасу по спрацюванню.

Для характеристики перевантажувальної здатності чутливого елемента реле застосовується значення вхідної величини, зване граничним значенням робочої величини $I_{раб.мах}$.

Граничне значення робочої величини – це таке її значення, яке чутливий орган витримує протягом короткого нормованого проміжку часу. Проте значення цієї величини неприпустимо при роботі реле в нормальному режимі за умовою електричної або механічної міцності або нагрівання.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для характеристики здатності навантаження виконавчого органу реле використовується поняття потужності керування P_y . Потужністю управління називається потужність у керованому ланцюзі, яку виконавчий орган може тривало пропускати.

Період відключення містить проміжок часу $t_{откл} = t_6 - t_3$, тобто час від моменту припинення впливу на сприймаючий орган t_3 до моменту зменшення струму i_n у керованому ланцюзі до нуля рисунок 1.2 (а).

У період відключення входить період відпускання $t_{отп} = t_4 - t_3$, в який реле відключається. Струм i_y в обмотці реле спадає до нуля рисунок 1.2 (б). У цей період протидіє зусилля пружини (механічне зусилля) перевищує електромагнітне зусилля, тобто $F_m > F_e$, і відбувається відпускання якоря.

Після вибору провалу контактів (проміжок $t_k = t_5 - t_4$) контакти реле розмикаються і між ними спалахує дуга, яка гасне через час $t_\delta = t_6 - t_5$. За період t_δ струм у керованому ланцюзі зменшується від I_n до нуля рисунок 2.2 (а).

Час відключення реле $t_{вимк} = t_{отп} + t_k + t_\delta$.

Період відключення характеризується коефіцієнтом повернення, які представляють відношення струму відпускання $I_{отп}$ до струму спрацьовування $I_{сп} \cdot k_B = I_{отп} / I_{сп}$.

Зазвичай для реле захисту енергосистем і реле управління, контролюючих вхідний параметр у вузьких межах, k_B повинен бути ближче до одиниці.

Період спокою - це проміжок часу $t_n = t_7 - t_6$.

Для періоду спокою характерний параметр, називається величиною неспрацьовування, яка представляє найбільше значення вхідної величини, що забезпечує відсутність як спрацьовування реле, так і утримання в робочому стані. Час неспрацьовування менше часу рушання при спрацьовуванні і часу відпускання.

Відношення потужності керування до потужності спрацьовування називається коефіцієнтом посилення, $k_y = P_y / P_{сп}$.

Число включень в одиницю часу визначається величиною, обернено про-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порційній часу циклу $f = 1/t_{\text{ц}}$.

1.2 Секундомір електричний лабораторний ПВ 53

Секундомір електричний лабораторний ПВ 53 зображено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Секундомір електричний лабораторний ПВ 53

– Секундомір PV-531, який використовується для перевірки реле, оснащених пристроями тимчасової затримки, складається з системи постійних магнітів 15, якоря 3, котушки збудження 4 і зубчастого колеса 5 з роликами. Кінематична схема показана на рис 1 [MRMA23.00.00 000 КЗ].

– Якір з обмотками збудження розміщений між полюсами постійних магнітів. Коли на обмотку збудження подається змінна напруга 50 В або 120 В з частотою 220 Гц, якір також починає вібрувати з частотою 50 Гц [13].

– Якір розташований на осі 2, на якій закріплена вилка 1. При кожній вібрації якоря вилка повертає колесо 6 на своєму кінці на 1/100 і вібрує протягом 1 секунди на 100. Колесо здійснює 1 оборот

Прилад призначений для роботи при:

- температурі від мінус 20 °С до плюс 50 °С;
- при відносній вологості до 80%;

					MRMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- номінальній напрузі 110 і 220 В;
 - допустимі коливання + 20%;
 - номінальна частота 50 Гц;
 - межа виміру малої шкали 10 с;
 - ціна поділки 1 с;
 - межа: вимірювання великої шкали 1 с;
 - ціна поділки 0,01 с;
 - Похибка при номінальній частоті струму живлення не перевищує + 0,03 с при вимірювання проміжку часу від 1 до 3 с. і + 0,05 с. при вимірюванні проміжку часу від 3 до 10с;
 - При вимірюванні сумарного часу декількох проміжків часу, похибки сумуються;
 - Міцність ізоляції перевіряється напругою 2000 В;
- Споживана потужність:
- при напрузі 110 В - 5 ВА;
 - при напрузі 220 В - 10 ВА.

1.3 “Вимірювач параметрів реле СНІ 2400”

Вимірювач параметрів реле (мілісекундомір) “ СНІ2400” зображено на рисунку 1.4 призначений для вимірювання часових параметрів реле при експлуатації та ремонті релейних систем автоматики електричних станцій і підстанцій, автоматики і телемеханіки на залізничному транспорті.

Обмотка реле підключається від зовнішнього джерела постійного або змінного струму до вимірювача, до якого підключені обмотка реле і джерело живлення реле, і при відсутності гальванічного з'єднання між аналізатором і джерелом живлення реле.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.4 – “Вимірювач параметрів реле СНІ 2400”

Обмотки реле (при підключенні обмоток реле і джерела живлення реле до лічильника) повинні харчуватися від зовнішнього джерела живлення з імпульсним джерелом живлення потужністю до 36 Вт при постійній напрузі до 220 В або від імпульсного джерела живлення потужністю до 100 ВА при змінній напрузі до 250 В.

Вимірювач СНІ2400 дозволяє виміряти наступний часовий параметр реле за 1 цикл вимірювання (включення і виключення реле підтвердження), запам'ятати і записати час наступного спрацьовування 2 контактів на дисплеї:

- час до першого спрацьовування реле;
- час до повного спрацьовування реле з урахуванням "брязкоту" контактів;
- час до першого розмикання реле;
- час, необхідний для повного обліку "брязкоту" контактів і розмикання реле;
- тривалість замикання або розмикання контактів реле;
- час між першим перемиканням однієї контактної групи та перемиканням іншої контактної групи реле;

Результат обчислення різниці одних і тих же параметрів для 2 груп контактів реле і обчислення середнього значення виміряних параметрів для заданої кількості перемикачів реле.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики вимірювача СНІ2400

Параметр	Значення
1	2
Межа виміру інтервалів часу, мс	100000
Мінімальна одиниця молодшого розряду, мс	0,1
Клас точності вимірювача	0,005 / 0,004
Напруга живлення, В	220
Споживана потужність, ВА	10
Умови експлуатації: – температура навколишнього повітря, °С – відносна вологість повітря – Габаритні розміри корпусу, мм	від мінус 10 до 55 °С до 90% при 30 °С 235 × 85 × 165
Маса, кг	1,5

Прилад СНІ2400 розроблений на заміну аналогічних приладів Ф738, Ф209, Ф291, що випускалися раніше, широко застосовуються для контролю пристроїв релейної автоматики і релейного захисту в енергетиці, релейних пристроїв СЦБ на залізничному транспорті.

Відмінності нового приладу СНІ 2400 від аналогів полягають у тому, що він дозволяє вимірювати всі характеристики реле за один цикл вимірювання, в той час як аналоги вимірюють за один цикл тільки один з параметрів. Прилад ЧИ-2400 має вихід RS232 для зв'язку з ЕОМ і дозволяє відображати результати вимірювання на моніторі. Вимірювач СНІ2400 дозволяє робити вимірювання параметрів реле за один вимірювальний цикл із запам'ятовуванням результатів для двох контактних груп реле (до 12 параметрів), виведення результатів вимірювання на індикацію та/або передачу через інтерфейс RS-232 на комп'ютер. Результати вимірювання виводяться на ПК у вигляді готового протоколу, який тут же можна роздрукувати на принтері.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.4 Стенд “Вимірювач параметрів реле цифровий Ф291”

“Вимірювач параметрів реле цифровий Ф291” (в подальшому прилад) призначений для вимірювання часових параметрів реле при живленні обмоток реле від зовнішнього джерела струму до 10 А при напрузі до 240 V; змінного струму до 6 А частотою 50 Гц при напрузі до 380 V, а також при відсутності з’єднання приладу з зовнішнім джерелом живлення обмоток реле, лицьова панель приладу зображена на рисунку 1.5 [2].



Рисунок 1.5 – Стенд “Вимірювач параметрів реле цифровий Ф291”

Умови експлуатації: температура навколишнього середовища від мінус 10 до плюс 50 °С; верхнє значення відносної вологості 90% при 30 °С та більш низьких температурах; напруга мережі змінного струму 220 V при допустимих коливаннях $\pm 10\%$; частота мережі (50 ± 1) Гц.

Область застосування:

- ремонт та експлуатація релейних систем автоматики електричних станцій та підстанцій;
- вимірювання параметрів різного роду механічних перемикачів, тумблерів, кнопок.

Технічні дані стенду:

- а) Прилад дозволяє вимірювати по першому замиканню (розмиканню) контакту перевіряємого реле наступні часові параметри при живленні обмоток реле від зовнішнього джерела струму:

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- час спрацьовування реле з замикаючим (З) або розмикаючим (Р) контактами;
- час відпускання реле з замикаючими або розмикаючими контактами;
- різниця часу спрацьовування (відпускання) будь якої комбінації двох пар контактів.

б) Прилад дозволяє вимірювати наступні часові параметри з врахуванням вібрації контакту при живленні обмоток реле від зовнішнього джерела постійного або змінного струму:

- час спрацьовування реле з замикаючим (З) або розмикаючим (Р) контактами;
- час відпускання реле з замикаючими або розмикаючими контактами.

1.5 Електронний секундомір

Генератор тактових імпульсів з частотою 10 Гц зібраний на елементах D1.1, D1.2 електричну схему зображено на рисунку 5 [МРМА 23.00.00 000 ДО1]. Частоту можна регулювати потенціометром RP1. При замиканні перемикача S2 на генератор подається напруга живлення, але генератор не працює, поки замкнута пускова кнопка S3. При цьому індикатор показує довільні цифри, оскільки лічильник на мікросхемах D3, D5, D7, D9 встановлюється в довільне стан. Для установки індикатора і лічильника в вихідний нульовий стан потрібно натиснути і відпустити кнопку S1. Секундомір включається натисненням кнопки S3. При цьому імпульси з частотою 10 Гц надходять на лічильник D3, що відлічує десяті частки секунди. Стан цього лічильника відображається на індикаторі Н4 через дешифратор семисегментного коду D4. Лічильник D5 є лічильником одиниць секунд (індикатор Н3), лічильник D7 - десятків секунд (індикатор Н2), лічильник D9-одиниць хвилин (індикатор Н1). Максимальний час вимірювань становить 9 хв. 59 с [14].

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.6 Електронний секундомір “СЭЦ-10000”

Структурна схема секундоміра наведена у графічній частині [МРМА 23.00.00 000 ДО1] на рисунку 1.4.

Таблиця 1.2 – Перелік елементів до схеми електричної принципової секундоміра електронного цифрового

Найменування	Позначення	Кількість	Примітка
A1	Пристрій живлення	1	
A2	Пристрій керування	1	
A3	Блок індикації	1	
C	Конденсатор К73П-2-400В-0.01 мкФ+10 %	1	
И	Запобіжник ВП-1-1-0,25 А	1	
T	Трансформатор живлення	1	
X2	Вилка В6,3-002	1	Допускається заміна на вилку ВД1-1
X3	Розетка РГ1Н-1-3	1	
X4	Колодка живлення	1	
X5, X6	Гніздо ГИ-1,2	2	

До складу секундоміра входять наступні пристрої: УУ; БИ, що включає в себе УУИ з індикаторами; УП з дільником вимірюваного входу та органами управління.

У режимі ручного управління інтервал часу вимірюється натисканням та відпусканням виносної кнопки ПУСК, що підключається до зовнішнього роз'єму секундоміра. Лицьова панель приладу зображена на рисунку 1.6.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Рисунок 1.6 – Секундомір “СЭЦ-10000”

У режимі автоматичного управління інтервал часу вимірюється подачею та зняттям електричного сигналу відповідно до п.1.5 на один із входів.

Кварцовий генератор ГИ виробляє імпульси стабільної частоти 32800 Гц, які в ДЧ діляться до частоти 100 Гц, 10 Гц і 1 Гц. Інтервал часу вимірюється шляхом рахунку числа імпульсів стабільної частоти, що проходять за вимірюваний інтервал часу. Протягом перших 100 секунд проводиться рахунок імпульсів частотою 100 Гц. Після закінчення 100 секунд лічильник скидається на нуль, в старший розряд записується число 1 і кома переноситься на один розряд вправо. Протягом наступних 900 секунд проводиться рахунок імпульсів частотою 10 Гц. Після закінчення 1000 секунд лічильник знову обнуляється, в старший розряд записується кількість 1 і кома переноситься на один розряд вправо. У подальшому проводиться рахунок імпульсів частотою 1 Гц.

Розглянемо перелік деяких відомих приладів для контролю роботи побутових реле від відомих виробників. Зазначте, що це не є рекламою, а лише загальним переглядом приладів, які можна знайти на ринку. Для точності та актуальності інформації рекомендується перевіряти офіційні веб-сайти виробників та інші надійні джерела.

1.7 SVERKER 750/780

Прилади випробування релейного захисту SVERKER 750/780 є інженер-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ним інструментом, що має наочну та зручну панель керування, що дозволяє користувачам розпочинати роботу негайно, не витрачаючи значного часу на підготовку обладнання (Рис.1.7). Дозволяє тестувати всі типи однофазних релейних захистів. Автономна функціональність. Міцний та зручний для роботи в польових умовах [11 Наведено у графічній частині [МРМА 23.00.00 000 ДО2]



Рисунок 1.7 - SVERKER

Прилади SVERKER 750/780 мають багато різних функцій, які дозволяють виконувати тестування реле більш ефективно. Наприклад, його потужний блок вимірювання може відображати (на додаток до часу, напруги та струму) значення Z , R , X , S , P , Q , кута зсуву фаз та $\cos \phi$. Вольтметр також може бути використаний як другий амперметр (при тестуванні, наприклад, диференціальних реле). Усі величини відображаються на одному простому для читання дисплеї. Ви також можете оперативно проводити випробування обладнання спрямованого захисту за допомогою вбудованого джерела напруги, що регулюється. У SVERKER 780 є функція безперервного фазового зсуву та регульована частота. Також легко можуть бути проведені випробування автоматів повторного включення.

Прилади SVERKER 750/780, розроблені відповідно до Європейських ста-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ндартів та інших стандартів, що стосуються безпеки персоналу та експлуатаційної безпеки, також обладнані послідовним портом для зв'язку з персональними комп'ютерами та програмним забезпеченням SVERKER Win для ПК.

Прилади SVERKER компактні, мають невелику вагу (лише 18 кг), їх легко транспортувати з об'єкта на об'єкт.

Два або більше приладу SVERKER можуть бути синхронізовані, що дозволяє користувачеві з'єднати три прилади SVERKER в базову 3-х фазну випробувальну установку.

1.8 Megger SMRT1

Мережевий інтерфейс дозволяє здійснювати випробування IEC 61850

Повністю автоматизоване тестування з використанням програмного забезпечення AVTS. Виробник: Megger (рис.1.8).

Характеристики: Тестер для реле, який дозволяє вимірювати час вимкнення, час вмикання, опір, імпеданс і багато іншого.



Рисунок 1.8 – SMRT1

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Невеликий, міцний, легкий та потужний/ Працює з комп'ютером і без нього/ Інтуїтивне ручне керування за допомогою інтерфейсу Smart Touch View. Високий струм, висока потужність (75 А при 400 ВА пор. кв. Знач.) [12]

SMRT1, як самостійний пристрій, має “інтелектуальну” комбінацію великої вихідної напруги та великого струму, яка дозволяє виконувати випробування всіх типів електромеханічних, твердотільних та мікропроцесорних реле максимального струму, включаючи реле з регулюванням напруги, з блокуванням по напрузі та спрямованих реле максимального струму, тестує реле мінімальної/максимальної напруги, однофазні імпедансні, реле напруги потужності, синхронізуючі, автосинхронізуючі, мінімальної/максимальної напруги зворотної послідовності, балансу струму, частотні, Вольт/Гц, повторного включення, теплові, та різні інші реле, див. Посібник із застосування.

Пристроєм SMRT1 можна керувати вручну за допомогою нової сенсорної панелі Smart Touch View Interface® (STVI) Megger. Панель STVI має великий кольоровий рідкокристалічний дисплей TFT високої роздільної здатності, який дозволяє користувачеві вручну виконувати випробування статичних та динамічних станів за допомогою екрана ручних випробувань, а також використовувати вбудовані попередньо встановлені процедури випробувань для найбільш поширених реле. Панель STVI усуває необхідність використання комп'ютера при тестуванні практично всіх типів реле. Екранні меню та функціональні кнопки сенсорного екрану дозволяють швидко та легко вибрати потрібну функцію тестування. Результати випробування можна зберегти у вбудованій базі даних PowerDBTM та завантажити на картку пам'яті для передачі або друкування результатів випробувань. Для виконання повністю автоматичних випробувань пристроєм SMRT1 можна керувати за допомогою програмного забезпечення Advanced Visual Test Software (AVTS) Megger. AVTS – це програмне забезпечення, сумісне з операційними системами Microsoft® Windows® XP /Vista/7, призначене для керування всіма аспектами випробувань захисних реле з використанням нової системи Megger SMRT.

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.9 OMICRON CMC 356

CMC 356 - випробувальний комплекс 6-фазного струму/4-фазної напруги та інструмент для пуско-налагоджувальних робіт. Розроблено відповідно до сучасних вимог до пуско-налагоджувальних робіт, та підтримки релейного захисту та обладнання підстанцій у робочому стані. Вирішує завдання з використанням ТТ на 5 А та для випробувань з дуже високими силовими навантаженнями. Виробник: OMICRON electronics (рис.1.8). Характеристики: Універсальний тестовий набір для випробувань захисних реле та мережевих захистів [14].

Характерними особливостями CMC 356 є потужні джерела струму з широким динамічним діапазоном, трифазні випробування електромеханічних реле високого навантаження і підтримка стандарту ІЕС 61850. Дозволяє проводити перевірки ланцюгів вторинної комутації та перевірки достовірності трансформаторів струму потужним первинним струмом.



Рисунок 1.9 - OMICRON CMC 356

Випробувальні комплекси з керуванням від ПК генерують тестові сигнали відповідно до заданих цифрових значень завдяки використанню технології DSP. Крім того, використання алгоритму корекції похибки дозволяє генерувати тестові сигнали високої точності навіть у разі низької амплітуди. Схемотехніка внутрішніх підсилювачів та використання блоків живлення, що працюють в ім-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

пульсному режимі, гарантує максимальні робочі характеристики при мінімальній вазі та об'ємі. Незалежні канали з низькорівневими сигналами розташовані на задній панелі випробувальних комплектів, їх можна використовувати для керування зовнішніми підсилювачами або для реле випробувань з наявністю низькорівневого входу.

Всі канали налаштовуються безперервно і незалежно за амплітудою, фазою та частотою. Не потрібно перемикаати діапазони. Всі виходи по струму та напрузі захищені від перевантажень, КЗ, перегріву та зовнішніх високовольтних перешкод, викликаних перехідними режимами.

СМС 356 - універсальне рішення для проведення випробувань реле захисту будь-якого покоління та типу. Його сильноточні виходи (трифазний режим роботи: до 64 А/860 ВА на канал) робить його ідеальним засобом для тестування будь-яких, у т.ч. та електромеханічних реле з високими силовими навантаженнями. Інтегрований мережевий інтерфейс також дозволяє використовувати пристрій для тестування з використанням GOOSE відповідно до IEC 61850 та моделювання вибіркового значень та функцій підписки. Високі амплітуди вихідних сигналів надають безліч додаткових можливостей при пуско-налагодженні, таких як подачу сигналів первинні обмотки ТТ і ТН або перевірка полярності у вторинній обмотці.

Виходи випробувальних комплектів можна гнучко конфігурувати за допомогою програмного забезпечення для проведення випробувань OMICRON, щоб задовольнити вимоги конкретних прикладних завдань.

Наприклад, виходи струму пристрою СМС 356 можна використовувати в наступних конфігураціях:

- конфігурація 6×0...32 А, з потужністю 430 ВА на канал
- конфігурація 3×0...64 А, з потужністю 860 ВА на канал
- конфігурація 1×0...128 А, з потужністю 1000 ВА
- конфігурація 1×0...32 А, з потужністю 1740 ВА
- (з вихідною напругою блоку живлення 140 ВА) та в ряді інших

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конфігурацій.

1.10 SEL-751A

Основні функції: Захист фідерів, Захист радіальних та кільцевих розподільчих, мереж, володіючи інтегрованими можливостями захисту, включаючи МТЗ з витримкою часу, АПВ, захист відпідвищення/зниження напруги, регулювання, частоти та багато іншого, Дуговий захист. (рис.1.10)

Опціональний дуговий захист забезпечує додатковий рівень безпеки обслуговуючого персоналу. Реле захисту фідерів SEL-751A забезпечує комбіноване швидке виявлення дугового спалаху та перевантаження за струмом у разі дугового розряду і є ідеальним рішенням у плані швидкості та безпеки. Виробник: Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) Характеристики: Прилад для випробувань та контролю захисних реле [15].



Рисунок 1.10 – Реле SEL-751A

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматизація та керування. Реле SEL-751A використовується на фідерах, щоб забезпечити можливості захисту, автоматизації та управління в одному пристрої. Рівняння управління SELogic забезпечують вирішення безлічі автоматизованих задач без необхідності використання додаткових контролерів автоматизації. Настроювані кнопки на передній панелі можуть замінити звичайні елементи управління панелі та спростити загальний процес використання та прокладання проводки.

Детальні записи про події, які містять у собі осцилографічну та цифрову інформацію дозволяють проводити пост-аварійний аналіз ефективніше та спрощують пошук причини. Використання джерела сигналів тимчасової супутникової синхронізації, такого як SEL-2401 або SEL-2407®, дозволяє синхронізувати інформації про події від кількох пристроїв.

Дані вимірювань синхрофазорів IEEE C37.118 через послідовний порт дозволяють підвищити рівень поінформованості про ситуацію та ефективність використання активів. Зібрана інформація синхрофазорів системи допомагає розуміти тенденції в системі, приймати рішення, ґрунтуючись на вимірі стану, а не на його оцінці, та здійснювати пост-аварійний аналіз.

Реле SEL-751A використовуються для захисту та керування навіть у несприятливих та небезпечних умовах. Характеристики реле перевищують вимоги енергетичних компаній та промислових підприємств до таких пристроїв.

Діапазон робочих температур від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$, допуск до роботи з класу 1, зони 2; опціональне конформне покриття забезпечує роки надійної служби.

1.11 Висновки до першого розділу

Оглянувши існуючі стенди, ми прийшли до висновку, що є потреба розробити спеціалізований стенд для дослідження роботи реле, який був би здатний

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювати робочі характеристики реле, що використовуються у побутовій техніці.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						27
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІІ СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕ

2.1 Розробка схеми вимірювання

Електромагнітні реле використовуються для керування та захисту різноманітних електричних систем. Для забезпечення їхньої надійності та правильної роботи в часі, необхідно періодично проводити випробовування та діагностику. Для цих цілей використовують спеціальні прилади для випробовування електромагнітних реле.

Основні характеристики приладу:

1) Мультифункціональність: прилад повинен мати можливість випробовування різних типів електромагнітних реле, включаючи теплові, часові та інші. Це дозволяє користувачеві адаптувати випробовування до конкретного типу реле та його характеристик.

2) Регульована сила тиску: для вимірювання точних параметрів реле, прилад повинен мати систему для регулювання сили тиску на контактні елементи реле під час випробовування.

3) Зручний інтерфейс користувача: інтерфейс користувача повинен бути інтуїтивно зрозумілим та забезпечувати простий доступ до всіх функцій приладу. Це може бути сенсорний екран, кнопки або інші зручні елементи управління.

4) Автоматизація Процесу: Деякі прилади мають функцію автоматичного випробовування, що дозволяє виконати комплексні тести без необхідності постійного втручання оператора.

5) Моніторинг та запис результатів: прилад повинен мати можливість моніторингу та запису результатів випробовувань для подальшого аналізу. Це може включати в себе вимірювання часу вимкнення та вмикання, струмів, опорів тощо.

6) Безпека: прилад повинен відповідати вимогам безпеки та стандартам електротехнічної безпеки. Він повинен мати захист від перенапруг та інших не-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпек.

Блок живлення та заряджання забезпечує стабільне живлення та можливість заряджання акумуляторів. Система регулювання тиску: Гарантує належну силу тиску під час випробовування. Мікроконтролер (програмована логіка) відповідає за управління всіма функціями приладу. Сенсори для вимірювання параметрів використовуються для отримання точних даних під час випробовувань.

Запам'ятовувальні пристрої дозволяють зберігати та аналізувати результати випробовувань. Інтерфейс для підключення до комп'ютера або мережі для зручного обміну даними та можливості віддаленого моніторингу.

Враховуючи те, що електромагнітні реле використовуються для керування електричними лініями, і точне визначення часу їхнього вмикання та вимикання є важливим для забезпечення правильної роботи електричних систем. Для вимірювання цих параметрів використовують спеціальні компоненти конструкції такого приладу:

1) Таймери та запуск імпульсу. Прилад обов'язково обладнаний таймерами, які визначають час вимкнення та вмикання. Зазвичай використовуються точні кварцові таймери. Для забезпечення точного вимірювання часу використовується імпульсний генератор для запуску тесту.

2) Контроль та вимірювання сигналів. Прилад має систему для контролю та вимірювання сигналів, що входять та виходять з реле. Це може включати в себе аналіз вхідного сигналу, струму та напруги.

3) Контактні головки. Для підключення реле до приладу використовуються спеціальні контактні головки, які забезпечують надійний електричний зв'язок із реле під час тестування.

4) Важливо мати зручний графічний дисплей для відображення вимірів та параметрів реле. Це дозволяє оператору легко відслідковувати результати тесту. Інтуїтивний інтерфейс для користувача дозволяє легко вибирати тип реле, налаштовувати параметри тесту та отримувати результати.

5) Прилад повинен мати вбудовану пам'ять для зберігання результатів те-

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стування. Це дозволяє аналізувати динаміку роботи реле та слідкувати за їхньою стабільністю. Блок живлення забезпечує стабільне живлення приладу та можливість роботи в різних умовах.

б) Безпека. Важливо враховувати вимоги безпеки при використанні приладу. Це може включати в себе захист від перенапруг, тепловий захист та інші системи безпеки.

Застосування та переваги:

Тестування реле різних типів: прилад повинен бути універсальним для тестування різних типів електромагнітних реле, включаючи часові, теплові, контактні та інші.

Точність та надійність: важливо, щоб прилад був точним та надійним у вимірюваннях часу вимкнення та вмикання реле.

Зручність у використанні: прилад повинен бути зручним у використанні, з легким доступом до всіх функцій та зручним інтерфейсом для користувача.

Збереження та аналіз результатів: можливість збереження результатів та їхній подальший аналіз є важливим для моніторингу роботи реле в часі.

Прилади для визначення часу вимкнення та вмикання реле використовуються в різних галузях, включаючи електроенергетику, автомобільну промисловість.

Сенсори для вимірювання параметрів реле використовуються для отримання точних даних під час тестування. Їх вибір залежить від конкретних параметрів, які ви хочете виміряти. Типи сенсорів та їхні принципи дії:

Термопара: Два провідника з різними температурними коефіцієнтами з'єднані на одному кінці. Зміна температури вносить різницю напруг в термопару, що вимірюється для визначення температури.

Індуктивний датчик: котушка індуктивності, звичайно, з магнітним сердечником. Зміна індуктивності, яка виникає внаслідок руху металевого об'єкта, використовується для вимірювання параметрів.

Шунтовий датчик: провідник з низьким опором, підключений паралельно

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до контрольованого пристрою. Вимірювання напруги та опору шунта для визначення струму, який проходить через контрольований пристрій.

Ізольований оптронний датчик: Внутрішня оптронна пара, що складається з світловідсіченого фоторезистора та світлового діода, зміна опору фоторезистора відбувається під впливом світла від світлового діода, що дозволяє вимірювати інтенсивність світла та, отже, визначати параметри.

Датчик Холла: кристал, який генерує електричний заряд при взаємодії з магнітним полем. Зміна електричного заряду, що виникає при руху магніта, використовується для вимірювання параметрів.

П'єзоелектричний датчик: кристал, який генерує електричний заряд при механічному напруженні. Зміна електричного заряду при стисканні чи деформації, що використовується для вимірювання параметрів.

2.2 Розробка електричної схеми стенду

Структурна схема стенду для дослідження електромагнітних реле (далі прилад) зображена на [МРМА 23.00.00 000 Е1] містить блок живлення БЖ, ключ К, котушку електромагнітного реле (ЕМР), мікроконтролер МК, блок керування БК, рідкокристалічний індикатор РКІ, контактні пружини електромагнітного реле КП.

Обмотка досліджуваного реле через пусковий ключ підключається до блоку керування стендом, а досліджувані контакти реле до мікроконтролера. Після запуску програми на виконання, мікроконтролер МК програмним шляхом замикає ключ К, тим самим подає напругу на котушку електромагнітного реле ЕМР, починається відлік часу. В залежності від вибраної програми вимірювання дослід продовжується до першого замикання контактів реле або до останнього замикання. Час від моменту пуску до моменту замикання і буде часом спрацювання реле. Отриманий результат виводиться на рідко кристалічний індикатор

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РКІ.

Електрична схема стенду [МРМА 23.00.00.00.000 ЕЗ] складається з 5 блоків:

- А1 – Блок керування;
- А2 – Блок живлення;
- А3 – Кнопки керування;
- А4 – Реле, що досліджується;
- А5 – рідиннокристалічний індикатор.

Блок живлення дозволяє отримати керовану напругу від 0 до +25В живлення, що подається на роз'єкти Х1, принципова схема стенду показана на рисунку 2.1.

Керування напруги відбувається за допомогою резистора R4 разом із сигналом опорної напруги від контролера DD1. Блок живлення працює в режимі імпульсного стабілізатора наступним шляхом: якщо напруга на вході 4 DA2 більша за напругу, що знімається з подільника R12-R13, тоді відкривається транзистор VT3 і відбувається зарядка конденсатора C4. Якщо ж напруга на вході 4 DA2 (опорна напруга) стає менша за напругу з подільника R12-R13, то компаратор DA2 закриває транзистор VT3 і конденсатор C4 розряджається. Збільшення опорної напруги призводить до збільшення напруги на виході блоку живлення, зменшення опорної напруги – навпаки, до зменшення.

Контролер DD1 контролює процес вимірювання. Індикаторний ланцюг R1-VD1 призначено для відображення роботи контролера. Кола C2, C3, L1, L2 стабілізують живлення контролера. Резисторний подільник R2-R3 дозволяє отримати $\frac{1}{2}$ від напруги живлення контролера. В контролері є опорне джерело 2.56 В. Таким чином, вимірювана напруга живлення може складати до $2.56 \times 2 = 5.12$ В. Рідиннокристалічний індикатор HG1 (A5) підключено до контролера за 4-бітним інтерфейсом підключення. Порти PB0-PB3 використовується для передачі команд та даних, PB4-PB6 для формування керуючих імпульсів.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ведеться відлік часу. Кожен раз, коли контакти реле з'єднуються, вони замикаються, тому сигнал подається на вхід PDO контролера і формується в цей момент. Кожен момент спрацьовування контактів реле записується в пам'ять контролера. Через 2,0 секунди процес вимірювання завершується. Індикатор показує кількість циклів запуску і час кожного з них.

Кнопки управління SB1 - SB3 призначені для управління меню, що відображаються на індикаторах: "Пуск", "Результат", "інформація".

На додаток до вищесказаного, стенд оснащений мікросхемою інтерфейсу ЗВ'ЯЗКУ RS-232 (послідовний порт), швидкість каналу: 9600 біт/сек, 8 біт, без управління передачею. Виберіть пункт меню, запустіть вимір і виводите результати через послідовний порт на ПК при кожній дії.

Крім того, на стенді є індикатор, який блимає 15 разів. Протягом цього інтервалу можна запустити програму програматора, що дозволяє змінити програмне забезпечення мікроконтролера.

Для скидання керуючої програми є окрема кнопка (висить на дроті).

2.3 Розробка корпусу стенду

В якості матеріалу корпусу підставки було вибрано оргскло марки tosp-ГОСТ17622-72. Загальний вигляд корпусу показаний на рис. 2.2.

Цей матеріал дуже практичний. Оскільки оргскло прозоре, учні можуть вивчати конструкцію підставки, не розбираючи її. Оргскло також служить ізоляційним матеріалом для захисту від ураження електричним струмом. Цей матеріал легкий, тому підставку легко переносити.

Віртуальний пристрій (VP), передня панель якого показана на рис. 2.3, призначений для управління силовим електричним пристроєм. Кількість блоків живлення обмежена цифровим виходом пристрою обробки даних.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

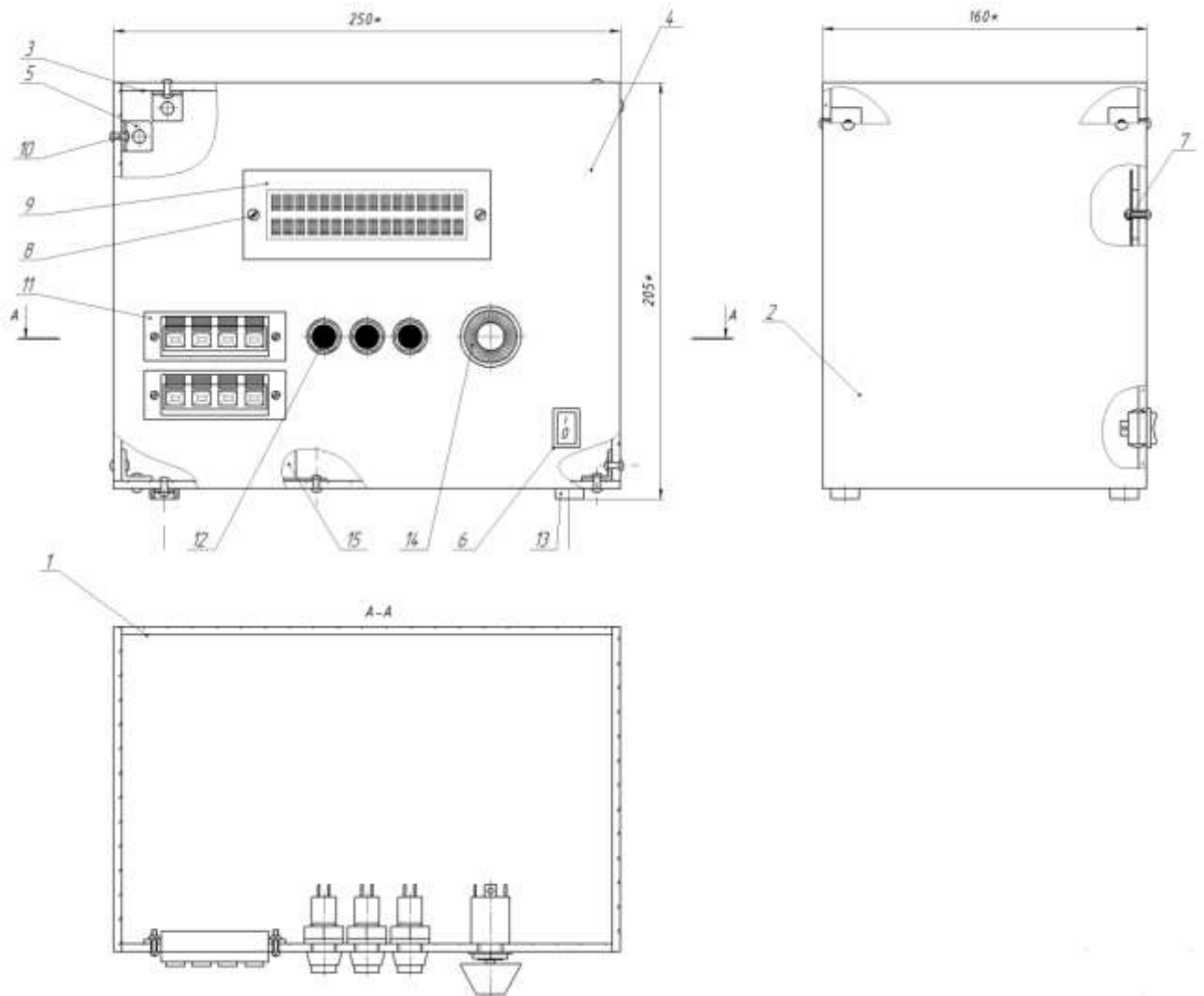


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд корпусу стенду

2.4 Розробка програми вимірювання в середовищі LabView

За допомогою цього VP можна зняти певні характеристики з самого реле або з керованого електродвигуна. Після запуску програми починається зворотний відлік, одночасно на електронний ключ передається сигнал, включається котушка електромагнітного реле, від якого реле втягує якір і замикає контактну пружину.

Час спрацьовування реле фіксується програмою, виконуються математи-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чні перетворення, оптимізація отриманих даних, фільтрація сигналу і результати відображаються на графіку. Можливість підключення термодатчика, датчика Тен, датчика Холла. Всі вимірювання відображаються у вигляді графіка в режимі реального часу, а дані записуються в таблицю, яку можна зберегти в зручному форматі, наприклад в MS Excel.

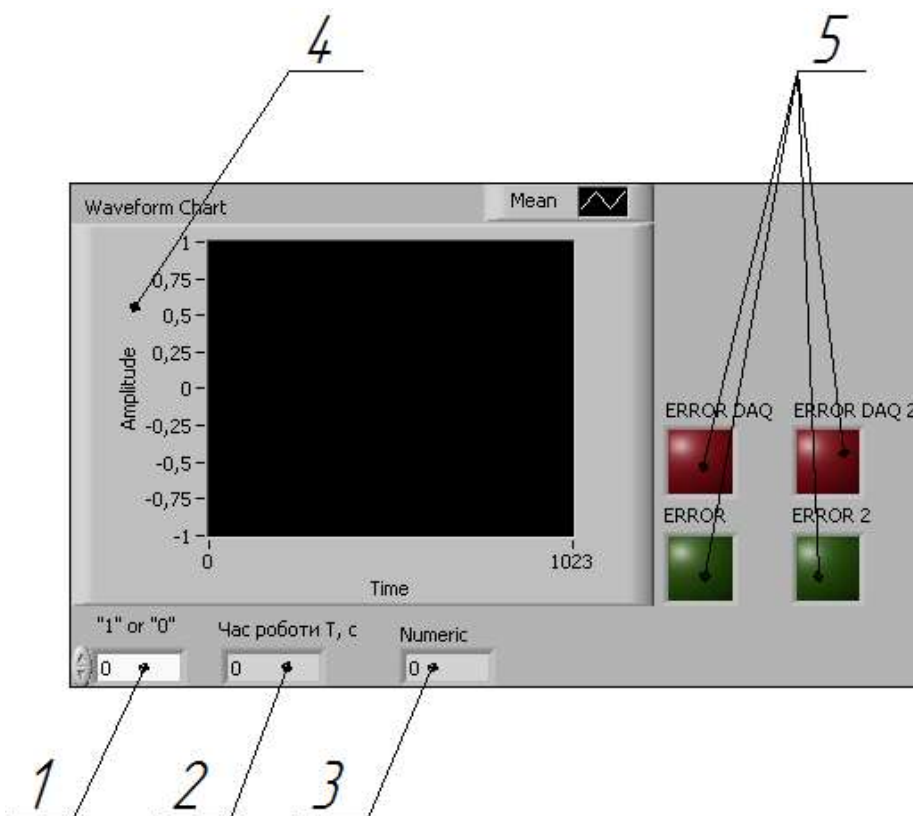


Рисунок 2.3 – Лицьова панель віртуального приладу для вимірювання параметрів електромагнітних реле. 1 – запуск зупинка програми; 2 – час спрацьовування реле; 3 – таблиця отриманих даних; 4 – графік результатів; 5 – індикатори помилок модуля DAQ

Для запуску програми необхідно записати 1 в комірку 1. В результаті чого реле замкнеться і розімкнеться, а в чарунці 2 буде відображено час в мс і буде запропоновано збереження результатів експерименту у зручному форматі (*.doc, *.txt, *.xls та інші) [5].

нал постійним і стабільним, якщо так, то програма завершує свою роботу і виводить результат на екран для розмикання електричного кола.

Коли програма завершиться, програма повинна вивести на екран повідомлення і вибрати формат для збереження отриманих даних.

2.6 Розробка методики вимірювання характеристик реле

Як відомо, при включенні і виключенні реле в ланцюзі обмотки відбувається перехідний процес. Час відпускання $t_{\text{отп}}$, як і час спрацювання реле, складається з двох складових – часу рушання при відпуску і часу руху:

$$t_{\text{ср}} = t'_{\text{тр}} + t'_{\text{дв}}, \quad (2.1)$$

де $t'_{\text{тр}}$, $t'_{\text{дв}}$ – час рушання та час руху відповідно, при спрацюванні реле.

$$t_{\text{от}} = t''_{\text{тр}} + t''_{\text{дв}}, \quad (2.2)$$

де $t''_{\text{тр}}$, $t''_{\text{дв}}$ – час рушання та час руху відповідно, при відпусканні реле.

Розглянемо перехідний процес при включенні реле. Електромагнітне реле можна представити у вигляді котушки з магнітопроводом і зобразити у вигляді послідовного з'єднання індуктивності обмотки L і активного опору R . спрощене зображення реле показано на рис. 2.5, а.

Коли вхідний сигнал крок за кроком змінюється від 0 до $I_{\text{уст}}$, робочий струм описується наступним законом:

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{уст}}(1 - e^{-t/\tau}), \quad (2.3)$$

де $I_{\text{уст}}$ – встановлене значення струму;

τ – електромагнітна постійна часу обмотки при початковому положенні

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якоря (при відпущеному якорі), $\tau = L/R$.

Рівняння є експоненціальним, графічно представлено пунктирною кривою 1, показаною на рисунку 2.5 в, і виводиться за умови, що індуктивність обмотки реле і процес приведення в дію постійні.

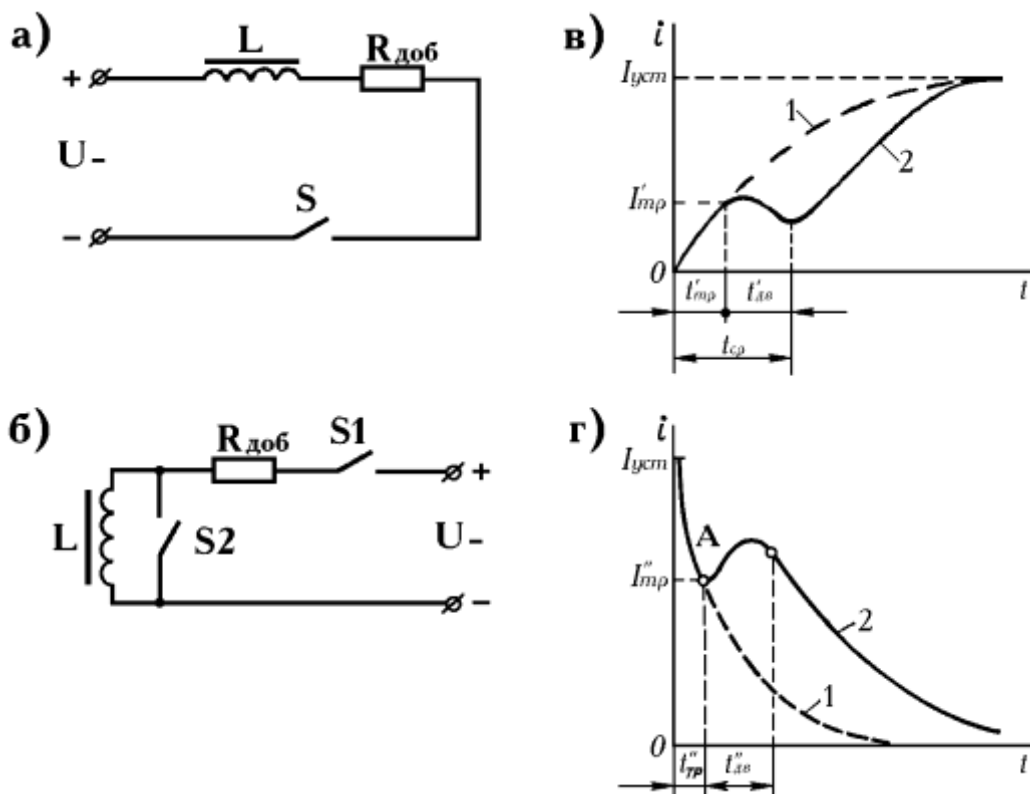


Рисунок 2.5 – Схема і перехідні процеси електромагнітних реле постійного струму. а – включення ланцюга, що містить L і R ; б – перехідна характеристика $i_{ср} = f(t)$ при включенні реле; в – відключення ланцюга, що містить L і R ; г – перехідна характеристика $i_{от} = f(t)$ при відпуску реле

Але насправді під час переміщення якоря змінюється магнітна провідність повітряного зазору, тому змінюється і індуктивність обмоток, і вона не є статичною. Зміна струму в реальних умовах показано на безперервній кривій 2, рис. 2.5. Починаючи з точки А (початок переміщення якоря), струм I змінюється не експоненціально, а за іншими законами, оскільки індуктивність обмотки починає збільшуватися. Невелике зменшення струму після початку руху поясню-

ється збільшенням зустрічної електрорушійної сили, викликаного зміною індуктивності обмоток. Після закінчення руху якоря струм продовжує збільшуватися до свого стабільного значення $I_{уст}$ знову по експоненті, але з іншого (більшої) постійної часу. При досягненні струмом деякого значення починається рух якоря: час, що минув від моменту включення, відповідає часу рушання $t'_{ТР}$, с, розраховують за формулою:

$$t'_{ТР} = \tau_1 \ln \frac{i_{уст}}{i_{уст} - i'_{ТР}}. \quad (2.4)$$

Зазвичай час руху якоря значно менше, ніж час рушання, $t'_{руш}$ і може бути прийнято постійним для реле даного типу ($t_{ДВ} = (0,1 \dots 0,4) t'_{ТР}$). Тому час спрацювання реле в основному залежить від часу зрушення $t'_{ТР}$ і формулу (2.4) можна представити так:

$$t'_{ТР} = t_{СП} = \tau_1 \ln \frac{i_{уст}}{i_{уст} - i'_{ТР}} = \tau_1 \ln \frac{k_{з.спр}}{k_{з.спр} - 1}, \quad (2.5)$$

де $k_{з.спр}$ – коефіцієнт запасу при спрацюванні, $k_{з.спр} = i_{уст}/i_{СП}$.

Перехідний процес при відключенні реле розглянемо також з моменту рушання. Відпускання якоря реле може бути викликано або відключенням напруги живлення U від обмотки за допомогою вимикача В1, або замиканням цієї обмотки на коротко вимикачем В2 зображено на рисунку 2.3 в). Для того, щоб уникнути короткого замикання джерела живлення U (другий випадок), у схемі передбачається резистор $R_{доб}$. У першому випадку при відключенні напруги живлення U рисунок 2.5, в струм в обмотці практично миттєво зменшується від $i_{уст}$. При нульовому значенні рис. 2.5, г являє собою пунктирну лінію. Проте, слід зазначити, що при розмиканні вимикача В1 енергія, накопичена в магнітному полі обмоток, підтримує струм протягом деякого часу за рахунок дугового

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розряду між контактами реле, створюючи короточасний перехідний процес. У цьому випадку вся енергія, що зберігається в магнітному полі, перетворюється в тепло. Враховуючи, що тривалість цього процесу невелика, можна припустити, що час початку. $t_{ТР} \approx 0$ при відпусканні приблизно дорівнює нулю рисунок 2.5г.

При відпусканні реле шляхом замикання обмотки на коротко рисунок 2.5, г струм перехідного процесу:

$$i_{OT} = i_{уст} \cdot e^{-i/\tau_2}. \quad (2.6)$$

На рисунку ця залежність представлена показником ступеня 1 (рис. 2.5). Якір реле починає відходити від сердечника відразу ж, як тільки тягове зусилля стає менше протидіючого. Струм, при якому якір починає відходити від наконечника, відповідає пусковому струму. $i_{ТР}$. Якщо в (2.6) замість струму i_{OT} підставимо його значення $i_{OT} = i_{ТР}$, то отримаємо вираз для визначення часу рушання при відпусканні:

$$t''_{ТРОТ} = \tau_1 \ln \frac{i_{уст}}{i_{ТР}}, \quad (2.7)$$

де $\tau_2 = L / R$ – електромагнітна постійна часу;

L - індуктивність обмотки при притягнутому якорі.

На рис. 2.5 крива 2 показує зміну струму в обмотці реле з моменту початку переміщення якоря (точка А) до закінчення перехідного процесу. Тут, як і при спрацьовуванні, крива 2 (перенапряга) трохи відхиляється від показника 1, оскільки індуктивність обмоток змінюється від максимальної до мінімальної. Після того, як якір залишає сердечник, струм продовжує експоненціально зменшуватися в порівнянні з його попередньою постійною величиною (як у вихідному положенні якоря). $\tau_1 = L/R$. Час спрацьовування при відпуску визначається таким же чином, як і при спрацьовуванні реле. Оскільки неможливо точно визначити

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

індуктивність обмоток, важко розрахувати робочий момент реле, використовуючи рівняння (2.5). L ; крім того, при обчисленні t_{CP} не враховуються похибки, які виникають через вплив вихрових струмів. Більш точні результати визначення t_{CP} дають експериментальні методи.

Час спрацьовування і спрацьовування реле може бути змінено як в схемі, так і конструктивно. Ви можете використовувати схемотехнічні методи для зміни тривалості процесу переходу. Зверніть увагу, що цей тип реле має свої обмеження. $i_{CP} = const$, з формули (2.5) випливає, що змінювати величину t_{CP} можна, змінюючи $i_{уст}$ або τ_1 . Так, наприклад, збільшення сталого значення $i_{уст}$ призводить до зменшення t_{CP} , а збільшення постійної часу τ_1 – до збільшення t_{CP} . Однак, практичні можливості тут обмежені, а саме: при збільшенні $i_{уст}$ може відбутися перегрів обмотки, а зменшення $i_{уст}$ призводить до зменшення коефіцієнта запасу при спрацьовуванні k_3 . $CP = i_{уст}/i_{CP}$.

Розглянемо схемні методи прискорення спрацьовування реле, що зображені на рисунку 2.6. На рис. 2.6, б крива 1 характеризує перехідний процес в обмотці реле без примусового прискорення спрацьовування реле, при цьому час спрацювання реле позначено, як. Включення послідовно з обмоткою реле додаткового активного опору $R_{доб}$ (рисунок 2.6, а) призводить до зменшення постійної часу ланцюга, тобто до зменшення часу спрацьовування реле t_{CP} (крива 2, рисунок 2.4б). У цьому випадку постійна часу ланцюга буде:

$$\tau = L_{об}/(R_{об} + R_{доб}), \quad (2.8)$$

де $L_{об}$ і $R_{об}$ – відповідно індуктивність та активний опір обмотки реле;
 $R_{доб}$ – додатковий опір резистора, включеного з обмоткою.

Ще більшу швидкодію (у 5...10 разів) можна отримати, включивши паралельно $R_{доб}$ ємність C (рисунок 2.6, а, штрихова лінія). При замиканні вимикача B , струм перехідного процесу $i_{пер}$ проходить через C в обхід $R_{доб}$, тому що єм-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нісний опір конденсатора C значно менше $R_{\text{доб}}$. Зарядний струм конденсатора різко збільшується до значної величини, тому струм в обмотці реле швидше досягає значення струму спрацьовування i , отже, $T_{\text{СР}}''$ стає менше крива 3, рисунок 2.6, б.

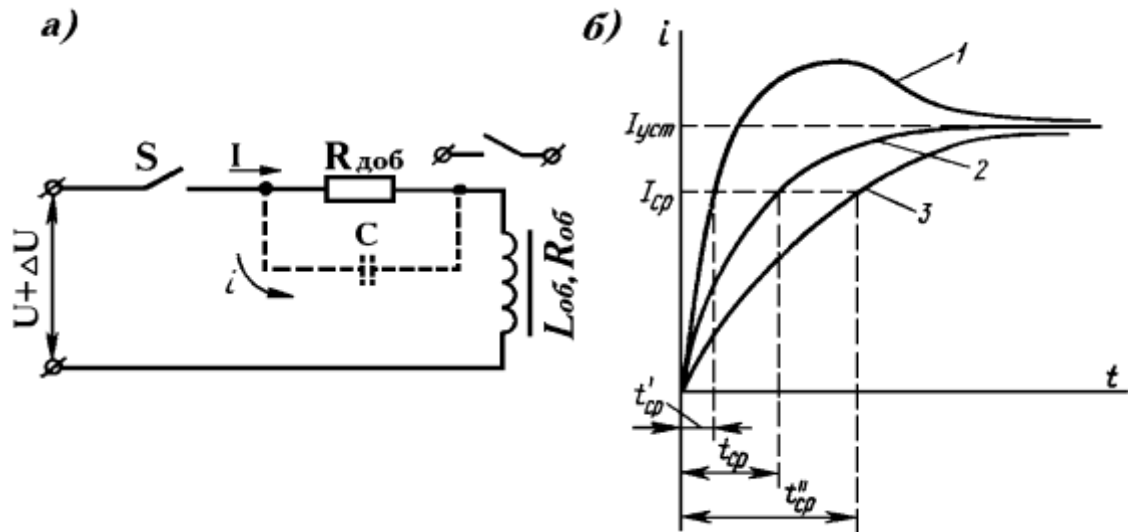


Рисунок 2.6 – Схема прискорення спрацьовування реле (а) і залежність зміни струму в котушці реле при спрацьовуванні реле (б).

За малий проміжок часу існування струм перехідного процесу не встигає перегріти обмотку реле. У сталому режимі струм $I_{\text{уст}}$ проходить через резистор $R_{\text{доб}}$ (тому що конденсатор не пропускає постійний струм), і тому величина його буде значно менше в порівнянні з кидком струму. Отже, перегріву обмотки в цьому випадку не буде.

2.7 Висновки до другого розділу

Розроблено електричну схему пристрою, спроектовано корпус пристрою. Проведено математичні моделювання режиму спрацювання пристрою для тесту реле.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ РЕЛЕ

3.1 Розрахунки провідності робочого зазору

Розрахунки магнітного ланцюга зводяться до обчислення магнітної провідності робочого й неробочого повітряних зазорів, провідності втрати, коефіцієнта розсіювання потоку й похідної провідності робочого зазору для декількох положень якоря.[10]

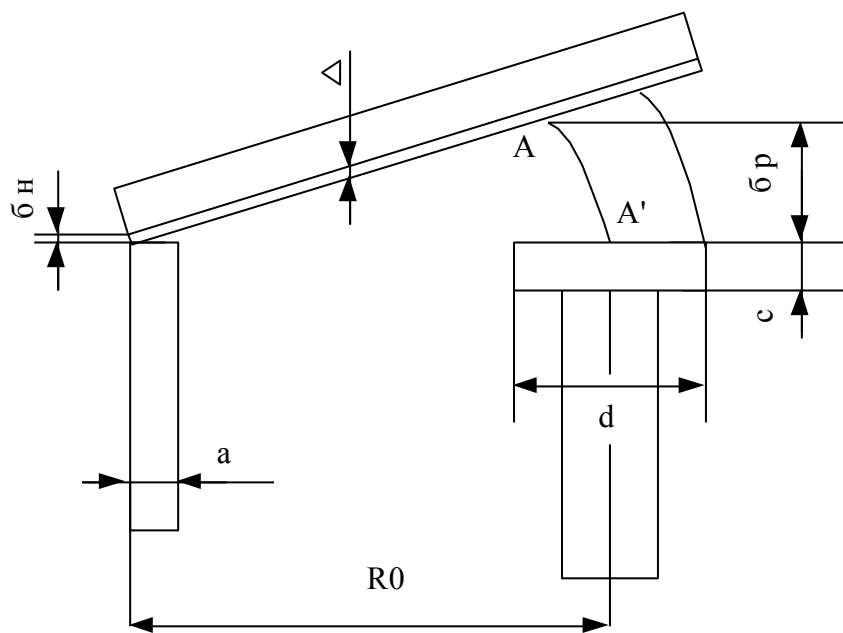


Рисунок 3.1 – Ескіз повітряних зазорів

Вихідні дані:

- ширина полюсного наконечника $d=0,017\text{ м}$;
- товщина полюсного наконечника $c=0,00005\text{ м}$.
- відстань від осі обертання якоря до осі симетрії сердечника магнітної системи $R_0=0,01425\text{ м}$;
- товщина немагнітної прокладки $\Delta=0.001\text{ м}$;
- товщина скоби $a=0,003\text{ м}$.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункова формула для провідності має вигляд:

$$G_p = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} K + \frac{\pi d}{0,69\delta/c + 0,63} + 0,96d \right), \quad (3.1)$$

де δ – величина робочого повітряного зазору;

$\eta_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна;

де K – коефіцієнт, що враховує нерівномірність магнітного поля

$$K = 2\rho(\rho - \sqrt{\rho^2 - 1}) \approx 1,109, \quad \rho = 2R_0/d = 1,68;$$

де R_p – магнітний опір робочого повітряного зазору, Гн⁻¹;

Потім розрахуємо магнітний опір робочого повітряного зазору R_p по формулі:

$$R_p = \frac{1}{G_p}; \quad (3.2)$$

Похідна магнітної провідності має вигляд:

$$\frac{dG_p}{d\delta} = -\mu_0 \left(\frac{\pi d^2 K}{4\delta^2} + \frac{0,69\pi d}{c(0,69\delta/c + 0,63)^2} \right). \quad (3.3)$$

Обчислення магнітної провідності проводяться для трьох значень робочих повітряних зазорів: $\delta_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_3 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Отримані значення магнітної провідності й похідної магнітної провідності зводимо в таблиці 3.1.

при $\delta_{p1} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м:

$$G_{p1} = 4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{\pi \cdot (17 \times 10^{-3})^2}{4 \cdot 0,5 \times 10^{-3}} \cdot 1,109 + \frac{\pi \cdot 17 \times 10^{-3}}{0,69 \cdot 0,5 \times 10^{-3} / 1,5 \times 10^{-3} + 0,63} + 0,96 \cdot 17 \times 10^{-3} \right) =$$

$$= 7,305 \times 10^{-7} \text{ Гн,}$$

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{p1} = \frac{1}{7,305 \times 10^{-7}} = 0,1369 \times 10^7 \Gamma_H^{-1},$$

$$\frac{dG_{p1}}{d\delta_{p1}} = 4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{\pi \cdot (17 \times 10^{-3})^2}{4 \cdot (0,5 \times 10^{-3})^2} \cdot 1.109 + \frac{0,69 \cdot \pi \cdot 17 \times 10^{-3}}{1,5 \times 10^{-3} \left(\frac{0,69 \times 0,5 \times 10^{-3}}{1,5 \times 10^{-3} + 0,63} \right)^2} \right) = 12,98 \times 10^{-4} \frac{\Gamma_H}{\text{м}}$$

при $\delta_{p2} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$:

$$G_{p2} = 4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{\pi \cdot (17 \times 10^{-3})^2}{4 \cdot 1 \times 10^{-3}} \cdot 1.109 + \frac{\pi \cdot 17 \times 10^{-3}}{0,69 \cdot 1 \times 10^{-3} / (1,5 \times 10^{-3} + 0,63)} + 0,96 \cdot 17 \times 10^{-3} \right) = 3,98 \times 10^{-7} \Gamma_H.$$

$$R_{p2} = \frac{1}{3,98 \times 10^{-7}} = 0,2513 \times 10^7 \Gamma_H^{-1},$$

$$\frac{dG_{p2}}{d\delta_{p2}} = 4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{\pi \cdot (17 \times 10^{-3})^2}{4 \cdot (1 \times 10^{-3})^2} \cdot 1.109 + \frac{0,69 \cdot \pi \cdot 17 \times 10^{-3}}{1,5 \times 10^{-3} \left(\frac{0,69 \times 1 \times 10^{-3}}{1,5 \times 10^{-3} + 0,63} \right)^2} \right) = 3,419 \times 10^{-4} \frac{\Gamma_H}{\text{м}}$$

при $\delta_{p3} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$:

$$G_{p3} = 4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{\pi \cdot (17 \times 10^{-3})^2}{4 \cdot 1,5 \times 10^{-3}} \cdot 1.109 + \frac{\pi \cdot 17 \times 10^{-3}}{0,69 \cdot 1,5 \times 10^{-3} / (1,5 \times 10^{-3} + 0,63)} + 0,96 \cdot 17 \times 10^{-3} \right) = 2,82 \times 10^{-7} \Gamma_H,$$

$$R_{p3} = \frac{1}{2,82 \times 10^{-7}} = 0,355 \times 10^7 \Gamma_H^{-1},$$

$$\frac{dG_{p3}}{d\delta_{p3}} = 4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{\pi \cdot (17 \times 10^{-3})^2}{4 \cdot (1,5 \times 10^{-3})^2} \cdot 1.109 + \frac{0,69 \cdot \pi \cdot 17 \times 10^{-3}}{1,5 \times 10^{-3} \left(\frac{0,69 \times 1,5 \times 10^{-3}}{1,5 \times 10^{-3} + 0,63} \right)^2} \right) = 1,572 \times 10^{-4} \frac{\Gamma_H}{\text{м}}$$

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Эмн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Таблиця 3.1 – Значення магнітної провідності й похідної магнітної провідності.

$\delta_p \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	0,5	1,0	1.5
$G_p \cdot 10^{-7}, \text{ Гн}$	7,305	3,98	2,82
$R_p \cdot 10^{-7}, \text{ Гн}^{-1}$	0.1369	0.2513	0.355
$\left \frac{dG_p}{d\delta} \right \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/м}$	12.98	3.419	1.572

Побудуємо графік залежності магнітної провідності від величини повітряного зазору $G_p=f(\delta_p)$.

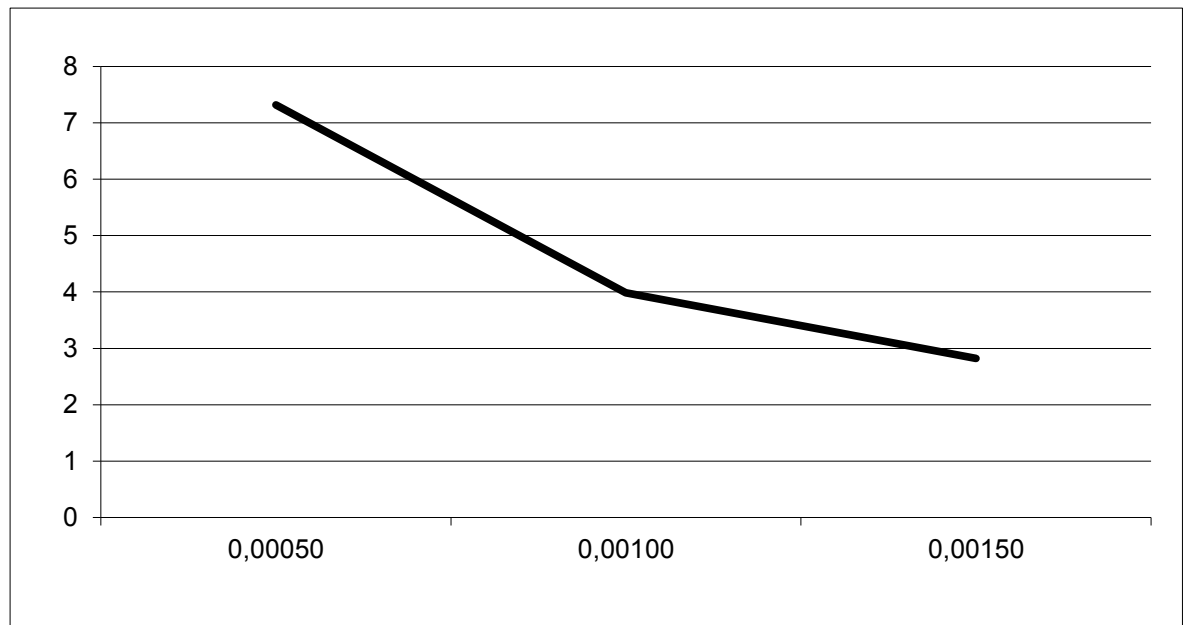


Рисунок 3.2 – Графік залежності $G_p=f(\delta_p)$

3.2 Розрахунки магнітної провідності неробочого зазору

Розрахуємо магнітну провідність неробочого повітряного зазору, який перебуває між прямокутним якорем, розташованим під кутом, і прямокутною ско-

бою. При цьому ухвалюємо наступні допущення:

- зазор утворено двома паралельними площинами;
- крайові потоки дорівнюють нулю й магнітна провідність визначається по спрощеній формулі:

$$G_n = \frac{\mu_0 S_n}{\delta_n}, \quad (3.4)$$

де G_n – магнітна провідність неробочого зазору, Гн;

S_n – площа неробочого зазору, м²;

δ_n – величина неробочого зазору, м.

- значення неробочого зазору визначається посередині скоби магнітної системи.

Вихідні дані:

товщина скоби $a = 0.003$ м;

ширина скоби $b = 0,0155$ м;

постійна частина неробочого повітряного зазору $\Delta = 0,00005$ м.

Неробочий зазор складається з нестійкої частини, що залежить від величини робочого зазору й постійної частини, обумовленою немагнітною прокладкою:

$$\delta_n = \delta_n' + \Delta \quad (3.4)$$

де δ_n' – мінлива частина неробочого зазору, м.

$$\delta_n' = \frac{\delta_p \cdot 0.5 \cdot a}{R_0} \quad (3.5)$$

Відповідно до прийнятих значень робочого повітряного зазору розрахуємо значення неробочого повітряного зазору по (3.5), його магнітну провідність по (3.4) і магнітний опір по (3.2).

при $\delta_{pl} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м:

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta'_{n1} = \frac{0,5 \times 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 3 \times 10^{-3}}{14,25 \times 10^{-3}} = 5,263 \times 10^{-3} \text{ м},$$

$$\delta_{n1} = 5,263 \times 10^{-5} + 3 \times 10^{-5} = 10,263 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$G_{n1} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 46,5 \times 10^{-6}}{10,263 \times 10^{-5}} = 5,69 \times 10^{-7} \text{ Гн},$$

$$R_{n1} = \frac{1}{5,69 \times 10^{-7}} = 0,176 \times 10^7 \text{ Гн}^{-1}.$$

при $\delta_{p2} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$:

$$\delta'_{n2} = \frac{1 \times 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 3 \times 10^{-3}}{14,25 \times 10^{-3}} = 10,53 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\delta_{n2} = 10,53 \times 10^{-5} + 5 \times 10^{-5} = 15,53 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$G_{n2} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 46,5 \times 10^{-6}}{15,53 \times 10^{-5}} = 3,761 \times 10^{-7} \text{ Гн},$$

$$R_{n2} = \frac{1}{3,761 \times 10^{-7}} = 0,2659 \times 10^7 \text{ Гн}^{-1},$$

при $\delta_{p3} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$:

$$\delta'_{n3} = \frac{1,5 \times 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 3 \times 10^{-3}}{14,25 \times 10^{-3}} = 15,79 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\delta_{n3} = 15,79 \times 10^{-5} + 5 \times 10^{-5} = 20,79 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$G_{n3} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 46,5 \times 10^{-6}}{20,79 \times 10^{-5}} = 2,809 \times 10^{-7} \text{ Гн},$$

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{n2} = \frac{1}{2.809 \times 10^{-7}} = 0,356 \times 10^7 \text{ Гн}^{-1}.$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків.

$\delta_p \cdot 10^{-3}, \text{м}$	0.5	1.0	1.5
$\delta'_{нз} \cdot 10^{-3}, \text{м}$	0,1026	0,1553	0,2079
$G_H \cdot 10^{-7}, \text{Гн}$	5,69	3,761	2,809
$R_H \cdot 10^7, \text{Гн}$	0,176	0,2659	0,356

Розрахуємо магнітну провідність неробочого повітряного зазору між прямокутною скобою й основою циліндричного сердечника (зазор обумовлений наявністю немагнітного покриття цих деталей і нещільністю їх прилягання). Магнітну провідність розрахуємо без обліку крайових потоків по формулі (3.6).

$$G_{нс} = \frac{\mu_0 \pi d_c^2}{4\delta_{нс}}. \quad (3.6)$$

Вихідні дані:

- прийmemo зазор рівним $\delta_{н1} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$;
- діаметр сердечника $d_c = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$G_{нс} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot \pi \cdot (9 \times 10^{-3})^2}{4 \cdot 15 \times 10^{-6}} = 53,24 \times 10^{-7} \text{ Гн}.$$

Магнітний опір цього зазору:

$$R_{нс} = \frac{1}{53,24 \times 10^{-7}} = 18,78 \times 10^4 \text{ Гн}^{-1}.$$

3.3 Розрахунки провідності зазору витоку

Обчисліть магнітну провідність зазору витоку, утвореного паралельним циліндричним сердечником і прямокутною схемою кронштейна рисунок 3.4.

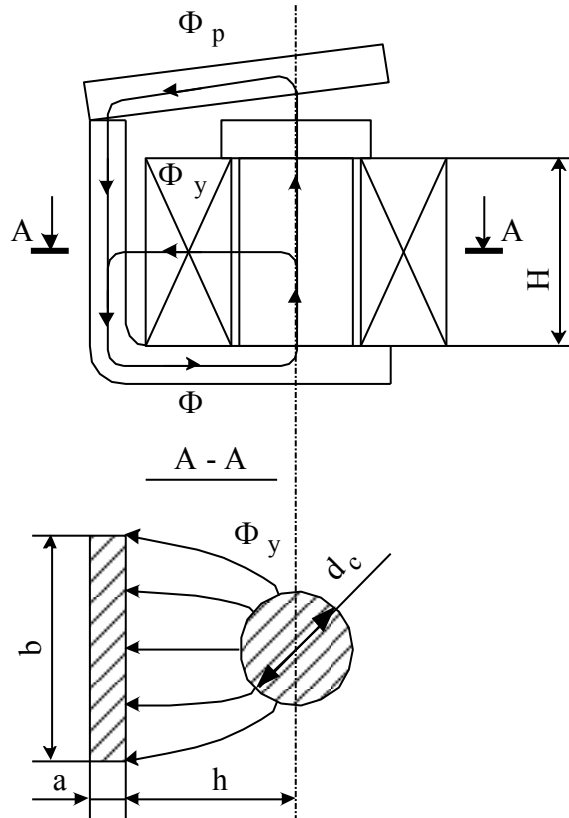


Рисунок 3.4 – Спрощене зображення магнітного поля

Потік втрат (розсіювання) замкнутий, за винятком зазорів в робочій зоні. Розсіяний струм розподіляється всередині і зовні контуру муздраттеатру і замикається. При розрахунку враховуйте тільки той магнітний потік, який замкнутий в контурі муздраттеатру. Припустимо, що висота зони розсіювання дорівнює висоті електромагнітної котушки.

Питома магнітна провідність зазору витоку визначається за формулою..
(3.7).

$$\lambda = K\mu_0 \frac{2\pi}{\ln(2n + \sqrt{4n^2 - 1})}, \quad (3.7)$$

де $K=0.87$ – коефіцієнт, що залежить від співвідношення b і h .

$$n = \frac{h}{d_c}, \quad (3.8)$$

Повна провідність зазору витоку:

$$G_y = \lambda H, \quad (3.9)$$

де H – висота котушки, м.

Наведену магнітну провідність повітряного зазору для потоку розсіювання визначимо по формулі (4.10).

$$G_{yn} = \frac{G_y}{2}, \quad (3.10)$$

Виходячи з вищенаведених формул, визначимо питому й наведену магнітну провідність зазору витоку.

Вихідні дані:

відстань від сердечника до прямокутної скоби $h=11,25 \cdot 10^{-3}$ м;

висота котушки $H=47 \cdot 10^{-3}$ м.

$$n = \frac{11,25 \times 10^{-3}}{9 \times 10^{-3}} = 1.25,$$

$$\lambda = 0.87 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \cdot \frac{2\pi}{\ln(2 \cdot 1.25 + \sqrt{4 \cdot 1.25^2 - 1})} = 4.38 \times 10^{-6} \frac{\Gamma_H}{\text{м}},$$

$$G_y = 4.38 \times 10^{-6} \cdot 47 \times 10^{-3} = 2.06 \times 10^{-7} \Gamma_H,$$

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$$G_{yn} = \frac{2.06 \times 10^{-7}}{2} = 1.03 \times 10^{-7} \text{ Гн.}$$

Наведений магнітний опір зазору втрати:

$$R_{yn} = \frac{1}{1.03 \times 10^{-7}} = 0,971 \times 10^7 \text{ Гн}^{-1}.$$

3.4 Розрахунки коефіцієнтів розсіювання струму

Коефіцієнт σ розсіювання потоку визначається через магнітні провідності по формулі (3.11).

$$\sigma = 1 + G_{yn} \cdot \frac{G_p + G_n}{G_p \cdot G_n} \quad (3.11)$$

Підставимо в (3.1) значення провідності робочого й не робочого зазорів і провідність витоку:

$$\sigma_1 = 1 + 1.03 \times 10^{-7} \cdot \frac{7,305 \times 10^{-7} + 5,69 \times 10^{-7}}{7,305 \times 10^{-7} \cdot 5,69 \times 10^{-7}} = 1,322,$$

$$\sigma_2 = 1 + 1.03 \times 10^{-7} \cdot \frac{3,98 \times 10^{-7} + 3,761 \times 10^{-7}}{3,98 \times 10^{-7} \cdot 3,761 \times 10^{-7}} = 1,592,$$

$$\sigma_3 = 1 + 1.03 \times 10^{-7} \cdot \frac{2,82 \times 10^{-7} + 2,809 \times 10^{-7}}{2,82 \times 10^{-7} \cdot 2,809 \times 10^{-7}} = 1,732.$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.3

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків

$\delta_p \times 10^{-3}, м$	0,5	1,0	1,5
σ	1,322	1,592	1,732

3.5 Моделювання в середовищі Solid Works

Моделювання контактів електричного реле виявляється важливим завданням у сучасних дослідженнях та розробках у галузі електротехніки та автоматики з наступними ключовими обґрунтуваннями:

Динаміка і перехідні процеси: Моделювання контактів дозволяє аналізувати динаміку їхньої роботи та перехідні процеси при включенні та вимиканні. Це є важливим для оптимізації роботи реле та мінімізації впливу перехідних явищ на систему.

Вплив зносу та старіння: Контакти електричного реле піддаються зносу та старінню з часом. Моделювання дозволяє визначити та оцінити вплив цих факторів на роботу реле, що важливо для прогнозування терміну його служби та визначення оптимальних інтервалів обслуговування.

Велика кількість варіантів роботи: Електричні реле застосовуються в різних галузях, і вони можуть включати різноманітні типи контактів. Моделювання надає можливість досліджувати різні конфігурації реле та їхніх контактів для підбору оптимальних рішень для конкретних застосувань.

Ефективність та енергоефективність: Моделювання дозволяє визначити оптимальні параметри роботи контактів, що впливає на ефективність використання енергії та може призвести до розробки реле з покращеною енергоефективністю.

Уникнення електричних перегрузок: Реальні умови експлуатації можуть включати електричні перегрузки та нестабільність напруги. Моделювання дозволяє визначити, як реле реагує на такі умови та розробити заходи для запобі-

гання електричним перегрузкам.

Таким чином, моделювання контактів електричного реле визначається як важливий інструмент для оптимізації та покращення їхньої роботи, що має значення для багатьох галузей техніки та автоматизації.

На основі отриманих даних реле було змодельовано в програмі Solid Works і за допомогою програми PhotView360 зображенню було надано реалістичний вигляд фотографії. Реле показано на рисунку 3.1.

Модуль моделювання використовувався для розрахунку напруги, що виникає на контактній пружині при спрацьовуванні реле. Результати розрахунків показані на рисунку 3.2.



Рисунок 3.1 – Модель реле отримана в Solid Works

З рисунку видно, що межа плинності не досягнута, тому Контактна пруж-

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

жина змодельована правильно.

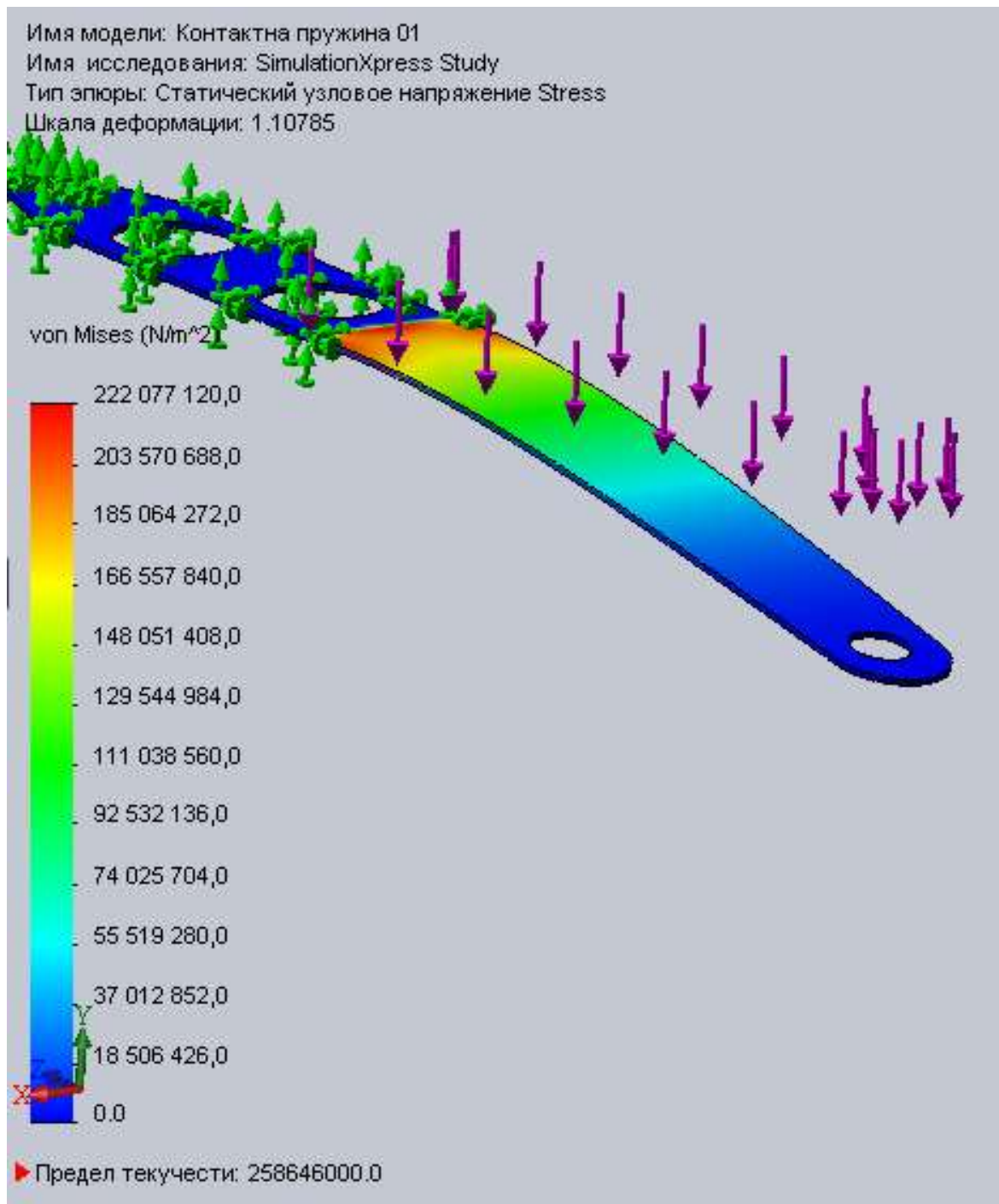


Рисунок 3.2 – Напряження в контактній пружині

На рисунку 3.3 зображено переміщення контактної пружини внаслідок дії сили.

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Имя модели: Контактна пружина 01
Имя исследования: SimulationXpress Study
Тип эюры: Статическое перемещение Displacement
Шкала деформации: 1.10785

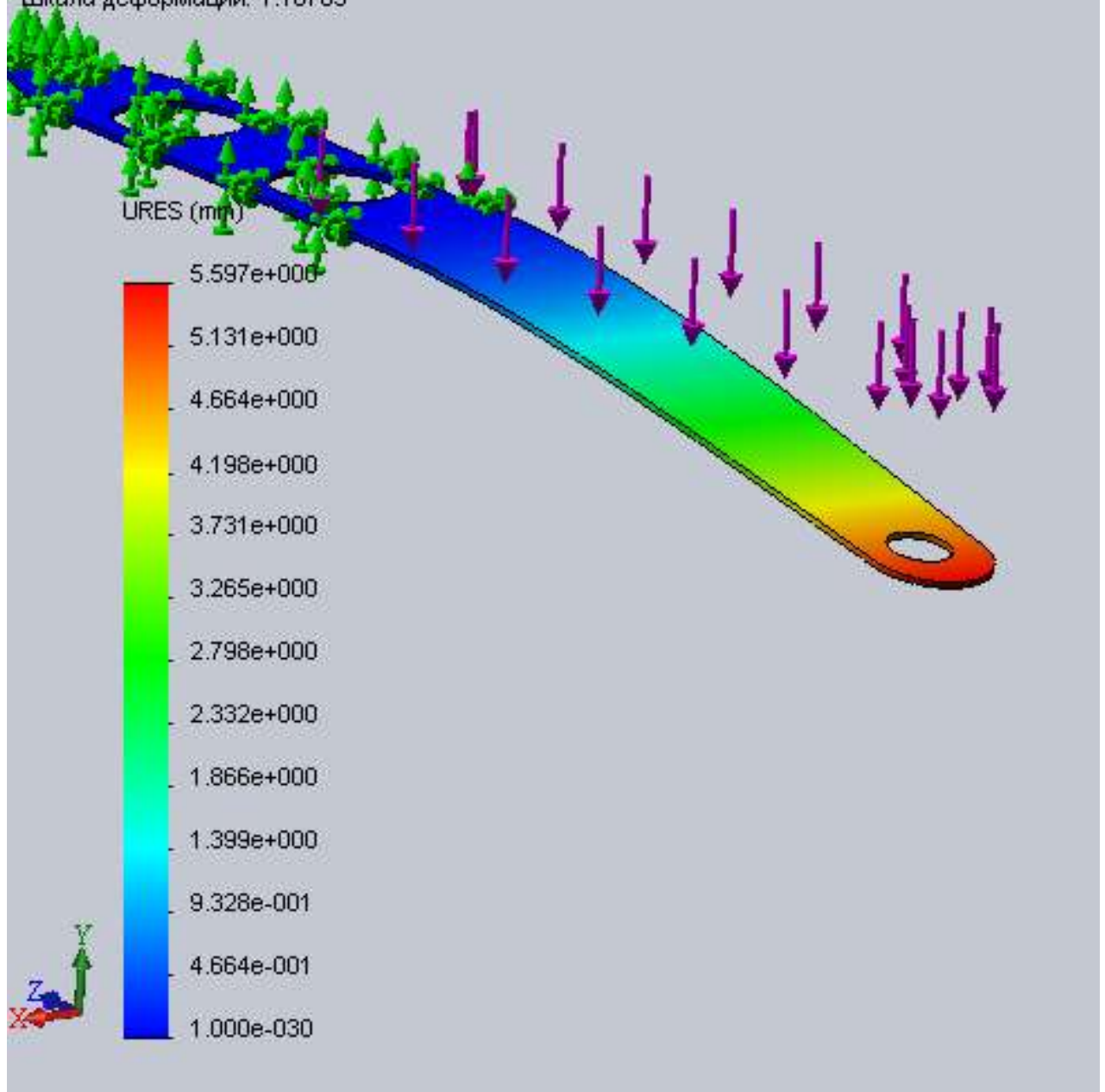


Рисунок 3.3 – Переміщення внаслідок дії сили на контактну пружину

3.6 Моделювання роботи контактів

Описана тут модель реалізована у вигляді відповідної комп'ютерної програми. У програмному поданні Модель реле приймає форму підпрограми, яка

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

моделює деякі частини або всі реле. Мета полягає в моделюванні обчислювальних алгоритмів та частин апаратних компонентів, які впливають на них (в основному, схеми вимірювання та ізоляції).

В даний час існує безліч комп'ютерних програм, які можуть виконувати детальне і високоточне моделювання систем первинної енергетики. Такі програми, включаючи моделі компонентів енергосистеми, можуть забезпечити чудові результати для основних систем та пристроїв управління.

Процедура розрахунку може також включати конкретну модель реле в ЕМТР, використовуючи програми електромагнітного переходу, такі як ЕМТР (програма електромагнітного переходу), спеціалізовані мови, такі як TACS (аналіз системи управління перехідними процесами), або користувачів, визначених у реальних функціях FORTRAN, використовуючи моделі, придатні для моделювання алгоритмів реле. [23], [24], [25]. Аналогічний підхід може бути реалізований в інших типах програм електромагнітного переходу, таких як PSCAD/EMTDC, Netomac, Morgat, Microtran і т.д. 1. Іншою можливістю є моделювання реле за допомогою більш поширеної платформи програмування, такої як Matlab/Simulink. У цьому випадку вхідний сигнал може бути надісланий у вигляді файлу, що містить записані дані, або безпосередньо з програми електромагнітних переходів, такої як PSCAD/EMTDC, через відповідний інтерфейс [10], [22].

Інтегрована Модель реле складається з модулів, що представляють різні частини оригінального реле. Сучасні системи проектування та оцінки реле засновані на концепції інтегрованого середовища моделювання. Такі системи розробляються для використання в програмах аналізу електромагнітних перехідних процесів, які тестують нові алгоритми ретрансляції і програмні моделі реле WG B5.17. Ця концепція може бути реалізована на різних програмних і апаратних платформах. Деякі особливості таких систем отримані з використанням [17], [26]:

- інтерактивне програмне забезпечення, зручне для користувача і містить

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більшість існуючих алгоритмів і моделей ретрансляції;

- різні завдання можуть бути налаштовані і оцінені в ієрархії середовища моделювання;

- динамічна взаємодія між енергосистемою і моделлю захисту;

- гнучке управління моделлю та даними.

Середовища моделювання можуть бути реалізовані в програмному забезпеченні, орієнтованому на моделювання, такому як MATLAB/SIMULINK. Такий універсальний інструмент створює дружню і відкриту систему. Передове програмне забезпечення імітує загальну філософію використовуваної платформи моделювання. Відповідний інтерфейс дозволяє підключати Модель реле до програм моделювання перехідних процесів [14], [20].

Ви можете запустити моделювання реле в режимі розімкнутого або замкнутого контуру. Що для цього потрібно

Модель реле повинна бути представлена у вигляді [14]:

1) Моделі, підготовлені для моделювання з розімкнутим контуром.

2) Моделі, підготовлені для моделювання із замкнутим контуром.

Модель реле, оцінена за відтвореною формою сигналу при моделюванні з розімкнутим циклом, не впливає на енергосистему, в якій приймається вхідний сигнал. Тому вихідні та проміжні сигнали зберігаються для подальшого аналізу. В цьому випадку модель може являти собою повне реле або тільки окремий блок.

При оцінці замкнутого циклу моделі реле необхідно включити Модель реле в загальну модель системи захисту. Крім того, симулятор переходу повинен приймати оригінальну інформацію з моделі реле та використовувати цю інформацію в поточному моделюванні (інтерактивний режим). В цьому випадку модель реле повинна являти собою повноцінне реле з вихідним блоком і будь-яким можливим каналом зв'язку. Використовуваний тип повинен бути відрегульований для імітації релейної системи. Моделі, засновані на сталому режимі, використовуються в програмних пакетах для вибору відповідних налаштувань для

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сталої роботи реле перенапруги і відстані[11].

Модель реле перехідних процесів може бути використана для більш складної оцінки релейних систем для вирішення типових проблем, таких як, який тип компаратора слід вибрати для відповідної програми і який тип фільтра після обробки слід використовувати перед остаточним методом стиснення. Відповіді на такі питання даються інженеру для того, щоб краще вибрати реле і його налаштування.

3.7 Розробка моделі дослідження реле

Розробка моделей реле для використання в електромагнітній перехідній програмі включає кроки, проілюстровані на рис. 3.4. Процес є ітеративним. Перший крок - визначити компоненти реле, що слід моделювати, залежно від досліджень, які слід зробити. Питання та процедури, що беруть участь у моделюванні різних компонентів, обговорюються в наступних розділах. Після того, як модель буде розроблена, вона повинна бути підтверджена, щоб підтвердити, що вона може представляти поведінку модельованої реле в умовах, які слід вивчити. У розділі 7 цього звіту обговорюються різні методи перевірки реле моделі. Якщо розроблена модель відповідає вимогам, процес моделювання завершений. Однак, якщо цього немає, компоненти, які потрібно переробити, або будь-які додаткові компоненти, які необхідно додати, повинні бути ідентифіковані та повинна бути розроблена переглянута модель. Ця переглянута модель знову повинна бути підтверджена. Цей процес продовжується до досягнення відповідної моделі.

Струм і напруга, що подаються на твердотільні і мікропроцесорні реле в разі збою, містять високочастотні компоненти .

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

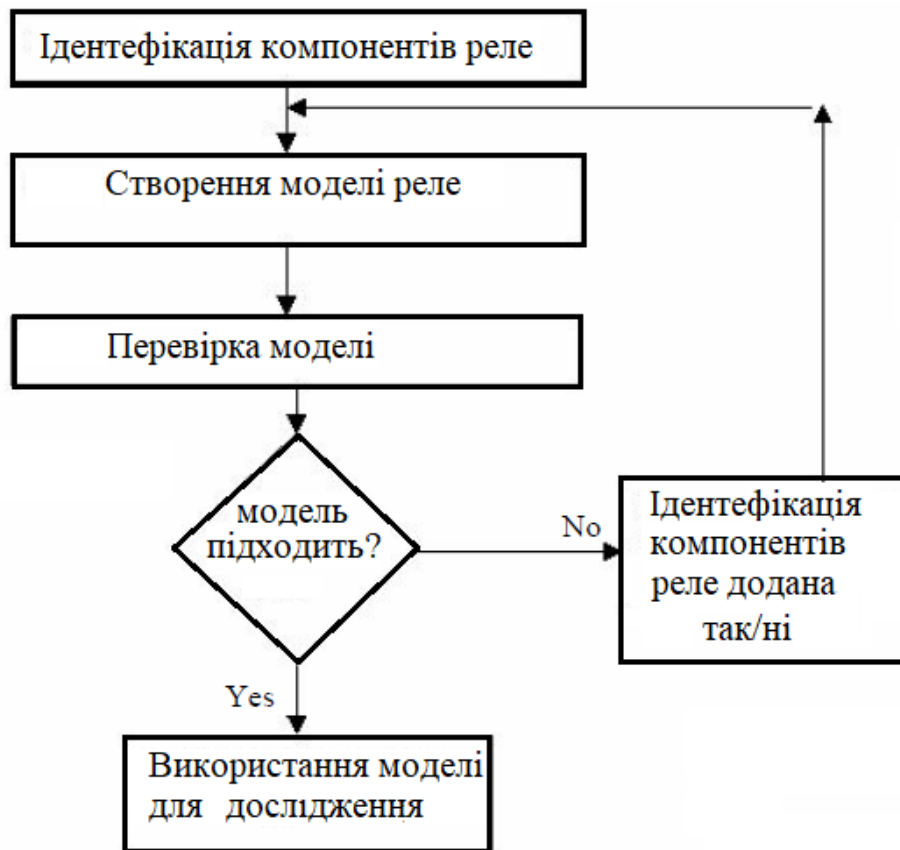


Рисунок 3.4 – Алгоритм розробки моделі дослідження реле

При проектуванні схеми твердотільного реле передбачається, що подається сигнал має основну частоту. Більшість мікропроцесорних алгоритмів ретрансляції негативно впливають на високочастотні компоненти. Деякі високочастотні компоненти можуть стати основною частотою, можливо, через псевдоніми. Тому в твердотільних і цифрових реле використовуються фільтри нижніх частот. Ці фільтри є аналоговими пристроями [18].

Чисельні дані, отримані в рамках дослідження аналізу перехідних процесів, були застосовані до моделі реле. Ви можете використовувати процедури, описані в цьому розділі, для моделювання фільтра низьких частот для налаштування сигналу даних. Зверніть увагу, що в модельованому реле використовується фільтр нижніх частот 4-го порядку. Продуктивність фільтра, що використовується для обробки даних аналізу перехідних процесів, повинна бути сумісна з продуктивністю аналогового фільтра, що використовується в реле. Функція пе-

редачі аналогового фільтра наступна.

$$H(s) = \left[\frac{k}{s+k} \right]^4, \quad (3.12)$$

Вихід цього фільтра на частоті відсічення повинен бути на рівні -3 дБ. Тому слід задовольнити наступне рівняння:

Якщо частота відсічення становить 600π г/с (300 Гц), k працює 4333. Частота відсічення цифрового фільтра дещо відрізняється від частоти відсічення аналогового фільтра через ефект викривлення.

Частота відсічення аналогового фільтра для вибраної частоти відсічення цифрового фільтра задається:

$$\left| \frac{k}{j\omega_c + k} \right|^4 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (3.13)$$

У цьому рівнянні ΔT - це час між двома послідовними зразками. Якщо перехідна програма є

$$\omega_c = \frac{2}{\Delta T} \tan \left[\frac{\Omega_c \Delta T}{2} \right], \quad (3.13)$$

Обчислення даних 11,520 разів в секунду, а частота відсічення цифрового фільтра повинна бути 600π г/с (300 Гц), ω_c має бути 1889,2 г/с. Функція передачі аналогового фільтра четвертого порядку цієї частоти відсічення:

$$H(s) = \left[\frac{4343}{s + 4343} \right]^4, \quad (3.14)$$

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для отримання функції передачі в домені Z може бути застосовано білінеарне перетворення. Процедура складається з заміни:

$$s \text{ with } \frac{2}{\Delta T} \left[\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right], \quad (3.15)$$

Зробивши цю заміну в рівнянні 6.4 та використовуючи вибране значення Δt , отримується наступне рівняння:

$$H(z) = \left[\frac{0.15859 (1+z^{-1})}{1-0.6828 z^{-1}} \right]^4, \quad (3.16)$$

Заміна $\frac{Y(z)}{X(z)}$ розширення правої частини рівняння та перестановки забезпечує таке рівняння:

$$\begin{aligned} Y(z)(1-2.731z^{-1}+2.797z^{-2}-1.273z^{-3}+0.2173z^{-4}) = \\ X(z)[6.326 \cdot 10^{-4}(1+4z^{-1}+6z^{-2}+4z^{-3}+z^{-4})] \end{aligned}, \quad (3.17)$$

Заміна операторів Z на затримки часу забезпечує наступне рівняння:

$$\begin{aligned} y(n\Delta T) = 6.326 \cdot 10^{-4} \left\{ \begin{aligned} &x(n\Delta T) + 4x(n-1)\Delta T + 6x(n-2)\Delta T \\ &+ 4x(n-3)\Delta T + x(n-4)\Delta T \end{aligned} \right\} \\ + 2.731y(n-1)\Delta T - 2.797y(n-2)\Delta T \\ + 1.273y(n-3)\Delta T - 0.2173y(n-4)\Delta T \end{aligned}, \quad (3.18)$$

У багатьох ситуаціях моделювання динаміки реле є простою процедурою. Наприклад, команда на відключення повинна бути видана, коли явний імпеданс лінії менше, ніж налаштування першої зони реле. У цьому випадку моделювання складається з: • порівняння розрахованого імпедансу з заданим значенням і • ви-

дачі команди, якщо розрахований імпеданс менший за налаштування. В інших ситуаціях слід включити відповідну затримку часу. Якщо затримка часу фіксована, моделювання залишається простим процесом. Процедура складатиметься з наступних кроків:

1. Запустіть таймер, коли вказано команду відключення.
2. Перевірте критерії відключення після наступної ітерації, виконаної програмою аналізу.
3. Збільште таймер, якщо критерій відключення задовольняється.
4. Якщо критерії відключення не задовольняються, зменште таймер або скиньте його. Рішення має базуватися на тому, для чого призначене реле, яке моделюється.
5. Перевірте, чи минув бажаний час затримки.
6. Якщо є, змодельуйте спрацьовування відповідних автоматичних вимикачів. В іншому випадку поверніться до кроку 2.

Інша ситуація полягає в моделюванні затримок із зворотним часом, наприклад, у реле надструму з зворотним часом. Моделювання цих електромеханічних, числових і дистанційних реле описано в наступному розділі.

Моделювання електромеханічних реле максимального струму з зворотним часом. Електромеханічні реле максимального струму з зворотним часом не приймають рішення про відключення під час існування перехідних компонентів несправностей. Тому доцільно моделювати ці реле за допомогою векторів. Якщо таке реле присутнє в дослідженні перехідних електромагнітних процесів, перехідні дані, що представляють форми хвиль, повинні бути спочатку перетворені у векторну форму за допомогою одного з алгоритмів обробки сигналів.

Робоча характеристика та характеристика скидання реле максимального струму з зворотним часом може бути виражена такими математичними рівняннями:

$$t(I) = \left(T_0 + \frac{K}{M^p - 1} \right) , \quad (3.19)$$

$$t(I) = \left(\frac{t_r}{M^2 - 1} \right) , \quad (3.20)$$

У цих рівняннях $t(I)$ – час спрацьовування в рівнянні 3.20 і час скидання в рівнянні 3.19, t_r – час скидання для $M = 0$, M – струм реле, кратний налаштуванню відводу, а K , T і P – константи, які описують робочу характеристику реле, яке моделюється. Фактор струму обчислюється на основі даних, наданих програмою аналізу перехідних процесів. Номінальний струм і налаштування відводу реле відомі. Тепер можна розрахувати час поїздки $t(I)$. Одним із способів прийняття рішення про поїздку є застосування наступного рівняння:

$$\int_{\tau=0}^T \frac{1}{t(I)} d\tau = 1 , \quad (3.21)$$

Інтеграція оцінюється після завершення кожної ітерації аналізу. Команда відключення генерується, як тільки інтегрування стає рівним або більшим за одиницю.

Реле максимального струму з інверсним часом призначені для використання в системах живлення, які мають електромеханічні аналоги. Таким чином, робочі характеристики числових реле максимального струму подібні до характеристик їх електромеханічних аналогів.

Оскільки струм у ланцюзі може змінюватися під час виникнення несправності, рівняння 3.21 має бути реалізовано за допомогою процедури інтегрування. Одним із можливих підходів є перевизначення процесу рівнянь 3.19 і 3.21.

$$(M^P - 1) \geq \frac{K}{t(I) - T_0} , \quad (3.22)$$

Рівняння 3.22 можна переписати так:

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\int_{\tau=0}^T (M^P - 1) d\tau \geq \frac{1}{t(I) - T_0} \int_{\tau=0}^T K d\tau, \quad (3.23)$$

Ліву частину рівняння 3.23 можна обчислити за допомогою правила трапеції. Права частина – інтегрування констант. Інтегральне рівняння можна записати у вигляді підсумовування для лівої частини та обчисленого порогу для правої частини таким чином:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} [M^P(\tau = 0) - 1] + \left\{ \sum_{n=1}^{N-1} [M^P(\tau = n\Delta T) - 1] \right\} \\ & + \frac{1}{2} [M^P(\tau = N\Delta T) - 1] \geq \frac{N\Delta T}{N\Delta T - T_0} \left(\frac{K}{\Delta T} \right), \end{aligned} \quad (3.23)$$

Ліву сторону слід оцінювати, починаючи з початку помилки. Праву частину слід оцінювати після того, як мине мінімальний час T_0 . Нерівність слід перевіряти в кінці кожної ітерації, щоб визначити, минув необхідний час чи ні. Інший підхід до моделювання чисельних реле максимального струму з оберненим часом полягає в реалізації нерівності:

$$\int y(\tau) d\tau \geq K', \quad (3.22)$$

У цьому рівнянні:

$y(\tau) = 0$, коли струм менший або дорівнює значенню підйому;

$y(\tau) = \frac{K'}{t(I)}$, - коли струм більший за вартість підйому.

Це рівняння можна записати у формі чисельного інтегрування наступним

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЧИНОМ:

$$\sum_{n=1}^N X_n \geq K' \quad , \quad (3.23)$$

$X_n = 0$, коли струм менший або дорівнює значенню спрацювання.

$X_n = \frac{K' \Delta T}{t(I)_n}$, коли струм більший за значення спрацювання.

$\frac{K' \Delta T}{t(I)_n}$ можуть бути розраховані для вибраної характеристики в робочому діапазоні реле та можуть бути збережені в пошуковій таблиці. Використання таблиці пошуку має перевагу, оскільки забезпечує гнучкість моделювання характеристик неправильних форм. Значення X_n обчислюється на кожній ітерації, а нерівність, визначена рівнянням 3.23, перевіряється, щоб підтвердити, чи потрібно реалізувати операцію реле. Ця процедура впровадження подібна до процедури, рекомендованої в посиланнях [18] і [19].

3.8 Висновки до третього розділу

Проведені розрахунки режимів роботи пристрою для контролю роботи реле. Змодельовано роботу контактів. Розроблена методика визначення часу спрацювання.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ

4.1 Експериментальний зразок вимірювального пристрою

Головною задачею даної роботи є розробка приладу, який дозволить проводити швидкі вимірювання електричних параметрів електромагнітних реле. При виробництві електромагнітних реле, не завжди їхні параметри відповідають номіналу, тому на відповідальні вузли необхідно ставити такі реле, які будуть відповідати номінальним, а саме потрібним значенням. Великою перевагою даного приладу є те, що він універсальний.

Вимірювальна станція є компактним та універсальним пристроєм, призначеним для вимірювання та тестування різних типів реле, а також для отримання вольт-амперних характеристик.

Основні характеристики: забезпечує точне вимірювання часу вимкнення та вмикання реле для різних типів.

Можливість вимірювати вольт-амперні характеристики реле під різними навантаженнями.

Вбудований інтерфейс для контролю над навантаженням, що дозволяє встановлювати різні режими та значення струму та напруги.

Є екран для відображення результатів та налаштувань.

Вбудований засіб для вимірювання опору та внутрішніх опорів реле.

Можливість підключення до комп'ютера для збереження результатів вимірювань та подальшого аналізу.

Функції автоматизації для виконання стандартних тестів без необхідності постійного втручання оператора.

Цей пристрій призначений для виробників реле, сервісних центрів, інженерів та техніків, які працюють з реле в електроенергетичних та автоматизованих системах.

Загальна Безпека: пристрій обладнаний заходами безпеки, включаючи за-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

канню реле. Час спрацювання відображається на РК індикатор 10. Натискаючи кнопку 6 відбувається другий тест по замиканню реле. Час спрацювання відображається на РК індикатор 10.

4.2 Проведення експериментальних вимірювань

План експериментів: перевірка роботи реле.

Мета: Визначення точності та ефективності роботи реле з використанням реле-тестера та вимірювальної станції.

Крок 1: Налаштування приладу. Ввімкнення пристрою та перевірка його налаштувань. Вибір типу реле та його характеристик у меню приладу.

Крок 2: Вимірювання часу реакції реле. Підключення реле до приладу.

Задання тестового сигналу та вимірювання часу вимкнення та вмикання реле. Проведення серії тестів для різних значень струму та напруги.

Крок 3: Вимірювання вольт-амперних характеристик. Підключення реле до вимірювальної станції. Встановлення навантаження та вимірювання вольт-амперних характеристик реле під різними умовами. Фіксація даних та побудова графіків.

Крок 4: Перевірка функціональності. Виконання тестів на функціональність реле під різними умовами. Запуск автоматизованих тестів та перевірка реакції реле на різні сценарії.

Крок 5: Аналіз Даних. Обробка та аналіз отриманих даних. Порівняння результатів з технічними характеристиками реле. Визначення точності та надійності роботи реле.

Крок 6: Заключні Висновки та Рекомендації, Підведення підсумків експериментів. Формулювання рекомендацій щодо оптимальних умов використання реле.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2.1 Розробка плану експериментів

Для визначення впливу сили струму на час спрацювання реле фактори занесені у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Рівні факторів

Фактор А: час Спрацювання (ms)	Фактор В: Сила Струму (Ампери)
Рівень 1: 5 мс	Рівень 1: 5 А
Рівень 2: 10 мс	Рівень 2: 10 А
Рівень 3: 15 мс	Рівень 3: 15 А

Кожну комбінацію рівнів факторів треба повторювати двічі для отримання надійних результатів. Створимо плани експериментів та занесемо у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 - Експериментальні плани

Експеримент 1	Рівень А1 (5 мс) + Рівень В1 (5 А) Рівень А2 (10 мс) + Рівень В2 (10 А) Рівень А3 (15 мс) + Рівень В3 (15 А)
Експеримент 2	Рівень А1 (5 мс) + Рівень В2 (10 А) Рівень А2 (10 мс) + Рівень В3 (15 А) Рівень А3 (15 мс) + Рівень В1 (5 А)
Експеримент 3	Рівень А1 (5 мс) + Рівень В3 (15 А) Рівень А2 (10 мс) + Рівень В1 (5 А) Рівень А3 (15 мс) + Рівень В2 (10 А)
Експеримент 4	Рівень А1 (5 мс) + Рівень В2 (10 А) Рівень А2 (10 мс) + Рівень В1 (5 А) Рівень А3 (15 мс) + Рівень В3 (15 А)
Експеримент 5	Рівень А1 (5 мс) + Рівень В3 (15 А) Рівень А2 (10 мс) + Рівень В2 (10 А) Рівень А3 (15 мс) + Рівень В1 (5 А)

Електромеханічні реле пропускної здатності реалізовані у вигляді амплітудного і фазового компараторів, які можна визначити наступними математичними рівняннями:

$$\left| I_L \frac{Z_R}{2} \right| > \left| V_L - I_L \frac{Z_R}{2} \right| + k \quad (4.1)$$

$$\left| I_L Z_R - V_L \right| \cos(\varphi) > k \quad (4.2)$$

V_L вектор напруги реле,

I_L – вектор струму реле,

Z_R - налаштування імпедансу,

k — крутний момент, що обумовлений обмежувальною пружиною,

$Z I$ – робочий сигнал,

$I_L \frac{Z_R}{2}$ – сигнал стримування,

$V_L - I_L \frac{Z_R}{2}$ – робочий сигнал,

$I_L Z_L - V_L$ – поляризаційний сигнал і φ - фазовий кут робочого сигналу.

Твердотільні реле не працюють з векторами напруг і струмів. Вони приймають рішення на основі співвідношення форм сигналів напруги та струму. Наприклад, форми поляризаційного та робочого сигналів у рівнянні 4.2 можуть бути такими, як показано на рис.4.2. Реле спрацьовує, якщо збіг більше ніж 90° .

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комбінація забезпечує вихід, пропорційний члену $i_L Z_R$.

Застосування білінійного перетворення до рівняння 4.5 забезпечує:

$$H(z) = - \left[\frac{2}{\omega_c \Delta T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) + 1 \right] , \quad (4.6)$$

$$Y(z) = - \left[\frac{2}{\omega_c \Delta T} + 1 - \left(\frac{2}{\omega_c \Delta T} - 1 \right) z^{-1} \right] X(z) - z^{-1} Y(z) . \quad (4.7)$$

Якщо фазовий кут імпедансу реле дорівнює 75° , а програма аналізу обчислює напруги та струми до 520 разів на секунду, Рівняння 4.7 забезпечує наступне для розрахунку вихідного сигналу схеми на рисунку .

4.2.2 Результати експериментів

Експеримент 1: Вимірювання часу спрацювання реле

Таблиця 1 –Результати дослід з визначення характеристик реле

i_L, A	1,803	1,807	1,805	1,804	1,802
$I_{нов}, A$	1,434	1,436	1,435	1,434	1,431
$k_{нов}$	0,796	0,798	0,794	0,795	0,795

Визначимо залежність часу спрацювання реле, результати зведено в табл.2. Крива залежності наведена на рис.4.2.

Рівняння отриманої регресії:

$$v_{out}(n\Delta T) = 229.1v_{in}(n\Delta T) - 227.1v_{in}((n-1)\Delta T) - v_{out}((n-1)\Delta T)$$

де, T - час спрацювання реле; I - сила струму.

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2–Залежність часу спрацювання

№ Експерименту	Час спрацювання		Теоретичне значення часу	Похибка
	Мін	Макс		
1	17.2	18.5	18.1	0.0
2	18	19.4	19.7	0.3
3	17.5	19	19.7	0.7
4	16.7	18.7	18.0	0.0
5	15.9	17.7	17.2	0.0
6	16.1	17.3	17.2	0.0
7	16	18	18.8	0.8
8	15.6	17.1	17.2	0.1
9	18.1	19.8	18.1	0.0
10	18.5	19.6	18.1	0.4
11	18.6	20.5	19.7	0.0
12	18	20	19.7	0.0
13	16.6	17.9	16.4	0.2
14	17.2	18.6	18.1	0.0
15	17	18.8	18.0	0.0
16	16.5	17.7	16.3	0.2
17	15.7	17	15.6	0.1
18	15.5	16.7	15.6	0.0
19	16.1	18.6	18.8	0.2
20	14.9	17	17.2	0.2

Метод найменших квадратів дає оцінки параметрів рівняння регресії. Але тільки в тому випадку, якщо виконуються певні умови щодо випадкового члена (ϵ) і незалежної змінної (x).

Формально критерій МНК можна записати так:

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = \sum(y_i - y^*_i)^2 \rightarrow \min$$

Система нормальних рівнянь.

$$a \cdot n + b \cdot \sum x = \sum y,$$

$$a \cdot \sum x + b \cdot \sum x^2 = \sum y \cdot x.$$

Для розрахунку параметрів регресії будемо розрахункову таблицю

Таблиця 4.3 – Розрахункові значення для параметрів регресії

x	ln(y)	x ²	ln(y) ²	x*ln(y)
1	2.8449	1	8.0935	2.8449
2	2.8904	4	8.3542	5.7807
3	2.8622	9	8.1922	8.5866
4	2.8154	16	7.9265	11.2616
5	2.7663	25	7.6525	13.8316
6	2.7788	36	7.7218	16.6729
7	2.7726	49	7.6872	19.4081
8	2.7473	64	7.5475	21.9782
9	2.8959	81	8.3863	26.0632
10	2.9178	100	8.5134	29.1777
11	2.9232	121	8.5449	32.1548
12	2.8904	144	8.3542	34.6845
13	2.8094	169	7.8927	36.5222

Продовження таблиці 4.3

14	2.8449	196	8.0935	39.8287
15	2.8332	225	8.0271	42.4982
16	2.8034	256	7.8588	44.8538
17	2.7537	289	7.5826	46.8122
18	2.7408	324	7.5122	49.3351
19	2.7788	361	7.7218	52.7976
20	2.7014	400	7.2974	54.0272
210	56.3707	2870	158.9606	589.1199

Для наших даних система рівнянь має вигляд;

$$20a + 210 \cdot b = 56.371,$$

$$210 \cdot a + 2870 \cdot b = 589.12.$$

Домножимо рівняння системи, отримаємо систему, яку вирішимо методом алгебраїчного складання.

$$-210a - 2205b = -591.892,$$

$$210 \cdot a + 2870 \cdot b = 589.12.$$

Отримуємо:

$$665 \cdot b = -2.772.$$

Звідки $b = -0.00417$.

Тепер знайдемо коефіцієнт «а» із рівняння (1):

$$20a + 210 * b = 56.371.$$

$$20a + 210*(-0.00417) = 56.371.$$

$$20a = 57.246.$$

$$a = 2.8623.$$

Отримуємо емпіричні коефіцієнти регресії: $b = -0.00417$, $a = 2.8623$

Рівняння регресії (емпіричне рівняння регресії):

$$y = e2.8623041421216e-0.00417x = 17.50181e-0.00417x$$

Параметри рівняння регресії :

$$x = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{210}{20} = 10.5,$$

$$y = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{56.371}{20} = 2.819,$$

$$xy = \frac{\sum x_i y_i}{n} = \frac{589.12}{20} = 29.456$$

Вибіркові дисперсії:

$$S(x)^2 = \frac{\sum x_i^2}{n} - x_i^2 = 33.25$$

$$S(y)^2 = \frac{\sum y_i^2}{n} - y_i^2 = 0.0039$$

Середньоквадратичне відхилення

$$S(x) = \sqrt{S(x)^2} = 5.766$$

$$S(y) = \sqrt{S(y)^2} = 0.0624$$

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Коефіцієнт кореляції b можна знаходити за формулою

$$b = \frac{xy - x \cdot y}{(x)^2} = -0.00417$$

Отже:

$$a = y - b \cdot x = 2.819 - (-0.00417) \cdot 10.5 = 2.8623$$

Вивчено залежність Y від X . На етапі специфікації було обрано парну експоненційну регресію. Оцінено її параметри методом найменших квадратів:

$$y = 17.502 e^{-0.00417x}$$

Статистична значущість рівняння перевірена за допомогою коефіцієнта детермінації та критерію Фішера. Встановлено, що у досліджуваній ситуації 13.76% загальної варіабельності Y пояснюється зміною X . Встановлено також, що параметри моделі статистично значимі. Отримані оцінки рівняння регресії дають змогу використовувати його для прогнозу.

Аналіз коефіцієнта еластичності свідчить про несуттєвому впливі X на Y .

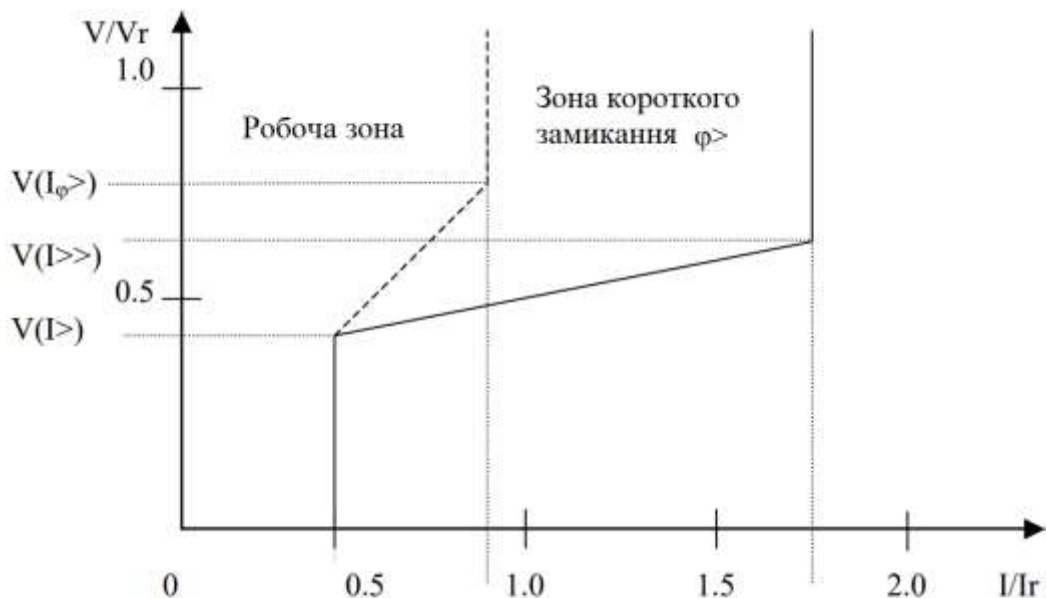


Рисунок 4.3 - Вольт-амперних характеристика тестування реле

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

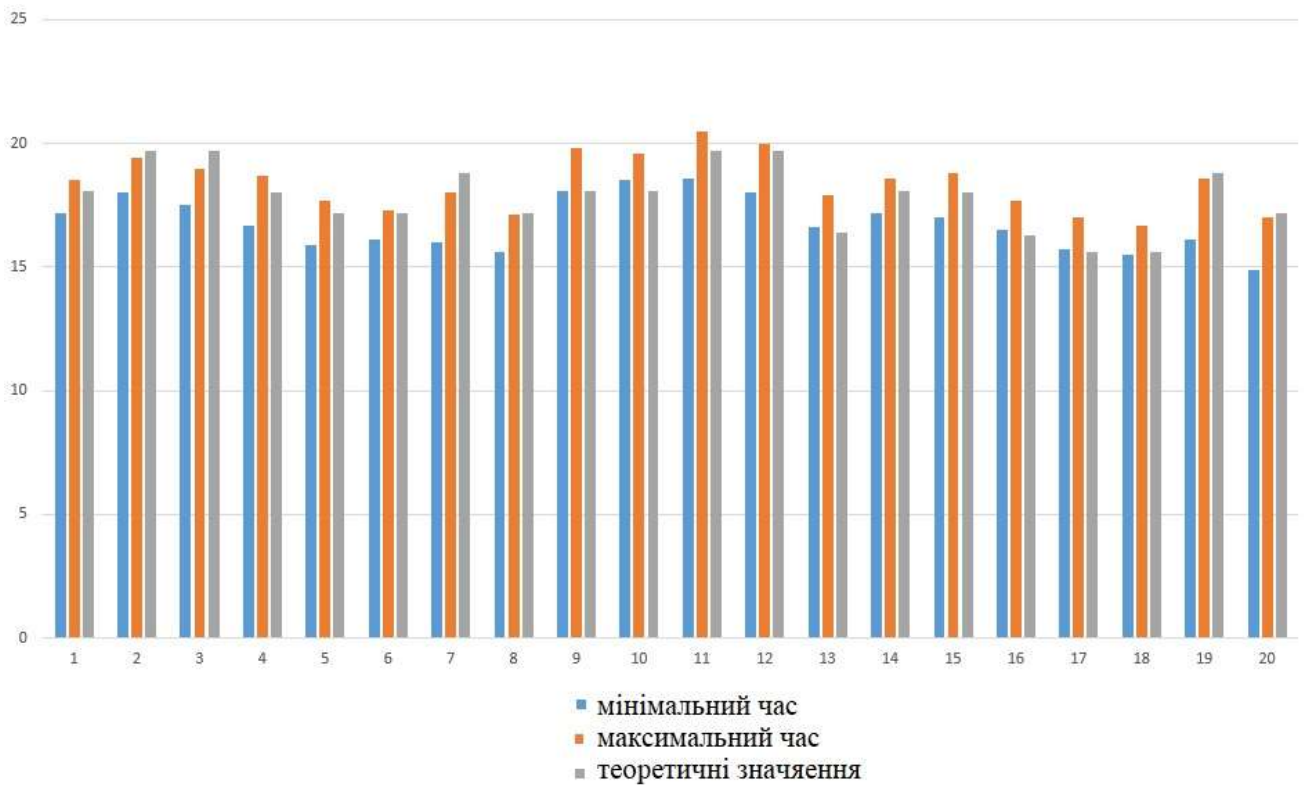


Рисунок 4.4 – Експериментальні значення характеристик спрацювання реле

4.3 Висновки до четвертого розділу

Було виготовлено зразок пристрою для тестування реле. Складено план проведення експериментальних досліджень. Проведено серію експериментів та отримані графічні залежності часу спрацювання від вольт-амперних характеристик.

Значення помилки апроксимації (4.84%) говорить про хорошу якість знайденої моделі. Коефіцієнт регресії, що вказує, наскільки змінюється час при зміні сили струму. Проведена серія експериментів, де фіксується час спрацювання реле при різних значеннях сили струму прийнятна.

ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської роботи був проведений аналіз роботи стенду для вивчення роботи реле. Визначено основні особливості роботи реле і причини його виходу з ладу.

На основі цього аналізу запропоновано новий стенд для вивчення поведінки реле. Розроблена електрична схема на основі мікроконтролера виробництва AVR. Спроектований основний корпус стенду з оргскла. Розроблено метод визначення параметрів реле на розробленому стенді. Розроблено схеми вимірювання та електрична схема стенду. Створена програми вимірювання в середовищі LabView. Розроблена методика вимірювання характеристик реле.

Проведено розрахунки провідності робочого зазору, провідності зазору витоку та коефіцієнтів розсіювання струму.

Цей розрахунок дозволив спроектувати реле для конкретних завдань. Модель реле була розроблена в SolidWorks, а її працездатність була протестована в COSMOSWorks. Проведено моделювання роботи контактів.

Виготовлено зразок стенду для тестування реле. Проведено тестування реле. Отримані значення часу спрацювання. Результати були порівнянні з розрахунковими даними, отриманими при певних характеристиках стенду.

Даний стенд впроваджується в навчальний процес, і буде використовуватися для лабораторних робіт за курсом "Електричні апарати".

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технічні характеристики реле РПУ-2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://neonzpp.com.ua/home/relepru2.html> (дата звернення 03.01.2011 р.)
2. Дж. Трєвис, Дж. Кринг. LabVIEW для всех – М.: ДМК Пресс, 2008 – 892 с.
3. IRLZ34 datasheet. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/L/Z/IRLZ34N.shtml (дата звернення 11.04.2009 р.)
4. Морозов, Г. Л. Віброшумова діагностика електромагнітного реле [Текст] / Г. Л. Морозов, А. П. Разгонов, Б. М. Бондаренко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – № 32. – Д. : ДНУЗТ. – С. 206–211.
5. Разгонов А. П., Андрєєвських О. В., Бондаренко Б. М., Безрукавий Д. А. Патент України на винахід № 70568 від 25.04.2007 року Бюл. №5 «Пристрій для вимірювання переміщення якоря електромагнітного реле».
6. Бондаренко, Б. М. Автоматизоване діагностування контактної системи електромагнітних реле // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2013. - № 33. – С. 61-68.
7. Dengel D. Wichtige Gesichtspunkte fur die Hartemessung nach Vickers und nach Knoop im Bereich der Kleinlast – und Mikrohartemessung / D. Dengel – Z.f. Werkstoff - technik 4 (1973), PP. 292-298.
8. Keefer H. J. Relay Contact Behaviour under Non Eroding Circuit Conditions. N. Y., BSTJ / H. J. Keefer, K. H. Gumley — 1958, vol. 37, № 3, PP. 777-814.
9. Bykov N. M. Development of effective strategy of pattern recognition / N. M. Bykov, I. V. Kuzmin, A. I. Yakovenko // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4225. – P. 76–83.
10. Ковтун В. В. Вибір інформативних ознак в задачі ідентифікації дик-

					МРМА 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тора // Матеріали Міжнародної конференції з індуктивного моделювання. – Львів, 20–25 травня 2002 : в 4 т. – Львів : ДНДІ, 2002. – Т. 1. – Ч. 2 – С. 280–287.

11. В. І. Струков, "Електричні апарати", видання 3-е, Київ: Техніка, 2008.

12. П. С. Широков, "Методи дослідження електромагнітних реле", Київ: Технічна література, 2005.

13. 12. SVERKER 780 [Електронний ресурс] // Megger Ltd. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://megger.com/relay-test-sets-sverker750/780>.

14. 13. SMRT1 [Електронний ресурс] // Megger Ltd. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://megger.com/automatic-single-phase-relay-test-set-smrt1-and-smrt1d>

15. Omicron CMC 356 [Електронний ресурс] // OMICRON electronics. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://hantek.com.ua/sms-356-basic>

16. Simple Overcurrent Application for Replacing an Electromechanical Relay With an SEL-751A Feeder Protection Relay [Електронний ресурс] // Simple Overcurrent Application for Replacing an Electromechanical Relay With an SEL-751A Feeder Protection Relay. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://selinc.com/api/download/105932/>

17. CIGRE Working Group C4.307, “Transformer Energization in Power Systems: A Study Guide,” CIGRE Technical Brochure, Feb 2014.

18. G. Sybille, M. M. Gavrilovic, J. Belanger, and V.Q. Do , “Transformer Saturation Effects on EHV System Overvoltages,” Power Appa Technical Instructors Training Institute ratus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-104, pp. 671 – 680 , 1985 . Google Scholar

19. L. F. Blume, G. Camilli, S. B.Farnham, and H. A. Peterson, “Transformer magnetizing inrush currents and influence on system operation,” American Institute of Electrical Engineers , Transactions of the, vol. 63, pp. 366 – 375 , 1944. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1944.5058946> Google Scholar Crossref

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

20. R. A. Turner and K. S. Smith , “ Transformer Inrush Currents ,” Industry Applications Magazine , IEEE, vol. 16 , pp. 14 – 19 , 2010 .
<https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.937440> Google Scholar Crossref

21. J. Peng , “ Assessment of Transformer Energisation Transients and Their Impacts on Power Systems ,” PhD Thesis, The University of Manchester , 2013 .

22. R. Zhang, “Transformer modelling and influential parameters identification for geomagnetic disturbances events ,” PhD Thesis, The University of Manchester, 2012

23. P. Bandyopadhyay and A. Begum, “Impact of energization of large power transformer from weak source through ICT,” in 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE), 2013 , pp. 1 – 6

24. L. Guasch, F. Corcoles, J. Pedra, and L. Sainz, “Effects of symmetrical voltage sags on three-phase three-legged transformers” Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 19, pp. 875 – 883, 2004 .
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.825306>

25. G. R. Slemon, “Equivalent circuits for transformers and machines including non-linear effects” Proceedings of the IEE - Part IV: Institution.

26. S. J. Chapman, Electric machinery Fundamentals, Fourth Edition ed.: McGraw Hill, 2005 . Monographs, vol. 100 , pp. 129 – 143 , 1953.

27. Shivam Verma (2023). Model of a Digital relay. (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/96018-model-of-a-digital-relay>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved December 9, 2023.

28. Power System Relaying Committee WG C-5, "Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp.62-72.

29. Demetrios A. Tziouvaras et al, "The effect of conventional instrument transformer transients on numerical relay elements," 28th Western Protective Relaying Conference, Spokane, Washington, October 21-24, 2001.

30. Joe Mooney et al, "Computer-based relay models simplify relay-

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

application studies," 20th Western Protective Relaying Conference, Spokane, Washington, October 19-21, 1993.

31. R. J. Martilla, "Directional characteristics of distance relay mho elements: Part I - a new method of analysis, " IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, No. 1, January 1981, pp 96- 112.

32. R. J. Martilla, "Effect of transmission line loading on the performance characteristics of polyphase distance relay elements, " IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1466-1474.

33. K. Zimmerman, J. Mooney, " Comparing ground directional element performance using field data," 20th Western Protective Relaying Conference, Spokane, Washington, October 19-21, 1993.

34. M. Hoffman, J. N. Nordstrom, "Using digital simulations of power system faults to verify relay performance," Fifty-Third Meeting of the American Electric Power Conference, Chicago, IL, April 29 - May 1, 1991.

35. P.G. McLaren et al, "A real time digital simulator for testing relays," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 207-213.

36. Power System Relaying Committee C-1, "Software models for relays", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001, pp. 238-245.

					MPMA 23.00.00 000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

Програма тестування реле

```

% General S-function template.
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = RelayDecisionBlock(t,x,u,flag,n,k,ires0,iop0)
%TIMESTWO S-function whose output is two times its input.
% This MATLAB file illustrates how to construct an MATLAB file S-function that
% computes an output value based upon its input. The output of this
% S-function is two times the input value:
%
%     y = 2 * u;
%
% See sfuntmpl.m for a general S-function template.
%
% See also SFUNTMPL.

% Copyright 1990-2009 The MathWorks, Inc.
%
% Dispatch the flag. The switch function controls the calls to
% S-function routines at each simulation stage of the S-function.
%
switch flag,
    %%%%%%%%%%%
    % Initialization %
    %%%%%%%%%%%
    % Initialize the states, sample times, and state ordering strings.
    case 0
        [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
        %%%%%%%%%%%
        % Outputs %
        %%%%%%%%%%%
        % Return the outputs of the S-function block.
    case 3
        sys=mdlUpdate(t,x,u,n,k,ires0,iop0);
        %%%%%%%%%%%
        % Unhandled flags %
        %%%%%%%%%%%
        % There are no termination tasks (flag=9) to be handled.
        % Also, there are no continuous or discrete states,
        % so flags 1,2, and 4 are not used, so return an empty
        % matrix
    case { 1, 2, 4, 9 }
        sys=[];
        %%%%%%%%%%%
        % Unexpected flags (error handling)%
        %%%%%%%%%%%
        % Return an error message for unhandled flag values.
    otherwise
        DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
% end timestwo

```

```

%
%=====
% mdlInitializeSizes
% Return the sizes, initial conditions, and sample times for the S-function.
%=====
%
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = mdlInitializeSizes()
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = -1; % dynamically sized
sizes.NumInputs = -1; % dynamically sized
sizes.DirFeedthrough = 1; % has direct feedthrough
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
str = [];
x0 = [];
ts = [-1 0]; % inherited sample time
% specify that the simState for this s-function is same as the default
simStateCompliance = 'DefaultSimState';
function sys = mdlUpdate(t,x,u,n,k,ires0,iop0)
n=100;
k=0.7;
ires0=1.2;
iop0=1.9;
I11= [u(1) u(2) u(3)];% Primary Side Power Transformer Currents
I22= n*[u(4) u(5) u(6)];%Secondary Side Power Transformer Currents
Iop = abs(I11-I22); % Relay Operating Current
Ires = abs(I11+I22)/2; % Relay Restraint Current
for i = 1:3
    if (Iop(i) > iop0) && ((Ires(i) <= ires0) || (Iop(i) > k*(Ires(i)-ires0) +
iop0)) && (Ires(i) > ires0)
        x = 0; % Open related C.Bs
        break
    else
        x =1; % Close related C.Bs
    end
end
sys = x;
sys=[];

```