

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

Бондаренко Борис Маврович

УДК 656.25:621.318

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ РЕЛЕ
ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ ШЛЯХОМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЇХ
ДІАГНОСТУВАННЯ

05.22.20 – експлуатація і ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Разгонов Адам Пантелейович
доктор технічних наук, професор

Дніпропетровськ – 2011

Зміст

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВІРКИ ПАРАМЕТРІВ РЕЛЕ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ	12
1.1 Аналіз конструктивних особливостей основних типів реле залізничної автоматики та технології їх перевірки	12
1.2 Аналіз комутаційного зносу контактів реле	18
1.3 Аналіз методів автоматизованих вимірювань параметрів реле залізничної автоматики	25
1.4 Проблеми і завдання дослідження	33
РОЗДІЛ 2 НАУКОВІ ПОЛОЖЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЛЕ	37
2.1 Побудова математичної моделі об'єкта діагностування	37
2.2 Математичне моделювання контактної системи	42
2.3 Розробка математичної моделі підсистеми оптичного каналу вимірювання	52
2.4 Розробка математичної моделі підсистеми акустичного каналу вимірювання	62
2.5 Розробка математичної моделі підсистеми електромагнітного каналу вимірювання	70
2.6 Висновки по розділу 2	75
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ РЕЛЕ	77
3.1 Вимірювання часових параметрів у електричному каналі	77
3.2 Визначення механічних параметрів з використанням оптичного методу вимірювання	81
3.3 Індукційний метод вимірювання ходу якоря	84
3.4 Акустичний метод діагностування електромагнітного реле	90
3.5 Визначення моменту зрушення якоря та контактного тиску	94
3.6 Метод автоматизованого діагностування контактної системи шляхом оцінки якості поверхонь ковзання	102
3.7 Висновки по розділу 3	109
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПЕРЕВІРКИ РЕЛЕ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ	112
4.1 Робота структурних вузлів і блоків у каналах ВДК	112
4.2 Вимірювання та розрахунки параметрів реле	119
4.3 Діагностування реле за динамічними характеристиками каналів вимірювання	128
4.4 Порівняння з традиційними методами, переваги запропонованих рішень	134
4.5 Визначення показників надійності	136
4.6 Техніко-економічне обґрунтування впровадження вимірювально-діагностичного комплексу	140
4.7 Висновки до розділу 4	145
ВИСНОВКИ	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	150
ДОДАТОК А	166
ДОДАТОК Б	173
ДОДАТОК В	176
ДОДАТОК Г	180
ДОДАТОК Д	182
ДОДАТОК Е	183
ДОДАТОК Ж	184

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЛС – автоматична, локомотивна сигналізація
АСК – автоматизована система контролю
АТЗ – автоматика, телемеханіка та зв'язок
АЦП – аналоговий цифровий перетворювач
БН – блок навантажень
БП – блок живлення
БС – блок спряження
БУУ – блок управління і узгодження
ВАПК – вимірювальний автоматизований програмний комплекс
ВДК – вимірювальний діагностичний комплекс
Е.р.с.– електрорушійна сила
МРС – магніторушійна сила
НМШ – нейтральне, малогабаритне штепсельне
ПК – персональний комп'ютер
РЕЛ – реле електромагнітне легке
РТД – ремонтно-технологічна дільниця
СВ-СЦБ – стенд вимірювальний СЦБ
СКВ – середнє квадратичне відхилення
СЦБ – сигналізація, централізація і блокування
ТУ – технічні умови
ЦАП – цифровий аналоговий перетворювач
GSI – англ. generator of stable (генератор стабільного струму)
USB – англ. Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина)

ВСТУП

Equation Chapter 1 Section 1

В Україні і світі на залізницях в експлуатації знаходяться мільйони електромагнітних реле, у середньому на одній дистанції сигналізації і зв'язку Укрзалізниці їх майже 30 000 штук. Саме реле є найпоширенішими електромагнітними приладами в системах залізничної автоматики і телемеханіки, на перевірку та регулювання яких витрачається багато ресурсів і часу [1].

Актуальність теми.

Безпека руху на залізничному транспорті забезпечується пристроями залізничної автоматики першого класу надійності, основу яких складають електромагнітні реле, в яких ймовірність небезпечних відмов мінімізована за рахунок конструктивних особливостей. Досвід експлуатації підтверджує факт їх надійної роботи: ресурс реле типів НМШ, НР та ін. перевищує 40 років. Так частка відмов за 2006-2011 роки складає 2,5 – 3 % загальної кількості відмов приладів автоблокування й електричної централізації, які застосовуються на Укрзалізниці [1-5]. Реле першого класу надійності не мають елементів вбудованого контролю і діагностування, тому технологією передбачено обов'язковий періодичний контроль їх електричних, часових і механічних параметрів [6 -11]. При цьому, незалежно від стану та умов роботи реле в процесі експлуатації, застосовуються довготривалі ручні операції із залученням висококваліфікованих фахівців і відповідного обладнання в ремонтно-технологічній дільниці (РТД) [2,7]. Також, згідно технології, передбачається неавтоматизований вихідний контроль параметрів, який фактично повторює перелік зроблених перевірок [8]. Як наслідок, значна кількість відмов під час експлуатації реле відбувається за рахунок порушень технології регулювання реле в РТД (12 %), відсутності контакту в штепсельному рознімі (35 %) та з інших причин [3,4]. До недоліків існуючої технології слід віднести відсутність автоматизації вимірювань та призначення періодичності ремонту для всього парку реле з урахуванням найбільш важких за рівнем струму режимів роботи контактів, тоді як 70 % реле працюють в полегшеному режимі та не потребують регулювання з відкриттям герметичного кожуху [12 - 14].

Наразі в РТД дистанцій сигналізації і зв'язку Укрзалізниці використовують морально застаріле, дороге обладнання з низькою точністю вимірювання, що призводить до високої суб'єктивності отриманих результатів та значних затрат часу на перевірку реле. Існуючі стенди для вимірювання параметрів реле мають значну вагу й габарити, не є автоматизованими й комп'ютеризованими, потребують розкриття герметичного блока реле (незалежного від його стану) для виконання вимірювань [15]. На перевірку параметрів одного реле та запис результатів вимірювання витрачається майже 120 хвилин, при цьому журнали параметрів заповнюються уручну, що знижує об'єктивність контролю [15-17].

З іншого боку, в багатьох країнах, що використовують електромагнітні реле в залізничній автоматичній, розв'язуються питання контролю електричних і часових параметрів електромагнітних реле за допомогою різних автоматичних цифрових пристроїв і систем без відкриття герметичного кожуха із автоматизованим збереженням результатів перевірок. Але, при цьому, такими пристроями не передбачено визначення механічних параметрів реле. Існуючі розробки для визначення механічних параметрів реле без розкриття його герметичного блока, є одиничними екземплярами та не набули широкого застосування через низьку точність вимірювань, складність їх конструкцій та використання [18].

Таким чином, наразі існує потреба в удосконаленні технології обслуговування, вимірювання параметрів і оцінки стану електромагнітних реле та в розробці нових підходів зі створення автоматизованих діагностичних комплексів, що дозволить підвищити надійність реле, точність вимірювання параметрів, скоротити час перевірки, поліпшити об'єктивність контролю та знизити експлуатаційні витрати.

Тому наукова задача удосконалення технічної експлуатації електромагнітних реле залізничної автоматики шляхом автоматизації процесів їх діагностування є сучасною та

актуальною [13,18,48].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до Концепції та Програми реструктуризації залізничного транспорту України, Закону про інформатизацію, а також згідно з науково-дослідними темами: “Розробка автоматизованої системи диспетчерського контролю та діагностування пристроїв залізничної автоматики” Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, державний реєстраційний номер № 0102U005872, та “Експлуатаційні іспити симетруючих блоків для підвищення надійності рейкових кіл в умовах ожеледиці” державний реєстраційний номер № 0109U009016, за якими автор є виконавцем та співавтором звітів.

Мета й завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення технічної експлуатації електромагнітних реле залізничної автоматики під час проведенні профілактичних і ремонтних робіт шляхом автоматизації процесів їх діагностування, підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат. Поставлена мета досягається в результаті вирішення таких завдань:

- аналіз існуючої технології перевірки параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики та методів автоматизації процесів діагностування;
- розробка математичних моделей автоматизованого вимірювання параметрів реле;
- розробка дослідного зразка автоматизованого вимірювального діагностичного комплексу перевірки реле залізничної автоматики;
- проведення експериментальних досліджень автоматизації процесів вимірювання параметрів і діагностування стану реле залізничної автоматики;
- розробка пропозицій з удосконалення технічного обслуговування реле залізничної автоматики з використанням автоматизованого комплексу;
- техніко-економічне обґрунтування розробки.

Об'єкт дослідження – процес технічної експлуатації електромагнітних реле залізничної автоматики.

Предмет дослідження – автоматизація процесу діагностування електромагнітних реле.

Методи дослідження. У ході досліджень використовувалися такі методи і теорії: методи та апарат теоретичної механіки, опору матеріалів та теорія диференціальних рівнянь – для розробки математичної моделі контактної системи; теорія числових рядів – для розробки методу вимірювання за допомогою оптичного каналу; положення теорії ймовірностей і математичної статистики та метод чисельного аналізу – для розробки методу вимірювання за допомогою акустичного каналу; теорія електромагнітного поля та теорія електричних кіл – для розробки електромагнітного каналу вимірювання; експериментальні методи дослідження – для розробки методів автоматизованого діагностування; теорія цифрової обробки інформації та відповідні програмні середовища – для обробки експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено метод автоматичного діагностування електромагнітних реле залізничної автоматики, який відрізняється від відомих поєднанням діагностичної інформації від чотирьох вимірювальних підсистем: оптичної, акустичної, електричної і електромагнітної. Такий підхід збільшує інформативність, підвищує швидкість та достовірність діагностування;
- вперше розроблено метод акустичного діагностування стану рухомої системи реле, який відрізняється врахуванням розподілу ймовірностей амплітуд звукового тиску, що виникає під час роботи електромагнітного реле. Застосування методу дозволяє підвищити достовірність результатів діагностування;
- вперше розроблено математична модель оптичного вимірювання положення якоря реле на основі неруйнівного контролю, у якій враховані оптичні властивості блока реле і спотворення вимірювального променя, що підвищує точність визначення положення якоря та надає можливість автоматизувати визначення параметрів;

- удосконалено метод автоматизованого визначення контактного тиску на підставі встановлених координат якоря, який відрізняється високою точністю і меншими витратами під час технічної експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів. Удосконалена технологія контролю та вимірювання параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики шляхом розробки автоматизованого вимірювального діагностичного комплексу (ВДК), з використанням нових методів діагностування реле та автоматизації процесу вимірювання їх електричних, часових і механічних параметрів.

Розроблено та втілено в дослідному ВДК автоматизований неруйнівний контроль стану контактів реле без знімання корпусу реле. Запропоновані неконтактні методи контролю скорочують час перевірки реле на 80 %.

Результатом впровадження автоматизованого вимірювального комплексу є удосконалення технічної експлуатації електромагнітних реле, скорочення часу їх перевірки, виключення трудомістких ручних операцій, підвищення надійності обладнання, встановлення об'єктивного контролю. Результати досліджень впроваджені в 6 дистанції сигналізації і зв'язку Придніпровської залізниці (підтверджено актом від 03.11.2011) та в навчальному процесі університету (підтверджено актом від 17.11.2011).

Розроблений вимірювальний діагностичний комплекс, побудований з використанням мікропроцесорної техніки, дозволяє поступово переходити до високотехнологічного автоматизованого обладнання.

Особистий внесок здобувача. Усі положення й результати, що виносяться на захист, отримано автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, внесок дисертанта такий: у роботі [47] автором запропонована математична модель використання неруйнівного контролю механічних параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики. У роботі [48] автором розроблено алгоритм роботи вимірювального діагностичного комплексу перевірки реле залізничної автоматики. У роботі [50] автором виконані експериментальні та теоретичні дослідження сил тертя в моменти зрушення і зупинки якоря реле, що дозволило розробити методи автоматизованого контролю механічних параметрів реле. У роботі [83] автором розроблена модель одночасного використання сукупності нових методів автоматизації, які базуються на перевагах сучасних цифрових технологій. У роботах [71,76,96,146] автором виконана технічна реалізація датчиків оптичної і акустичної реєстрації роботи електромагнітного реле. У роботах [37,38,40,41,43,46,136,137], автором виконана технічна реалізація запропонованих пристроїв і способів діагностування реле залізничної автоматики. Роботи [82,95] виконані автором самостійно без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи з 2005 по 2011 роки доповідалися на дев'яти Міжнародних науково-практичних конференціях, а саме: 65 – 69 – й Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», (Дніпропетровськ, 2005 – 2009 р.);

I – IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті» (Дніпропетровськ, Місхор, Чинадієво, 2007 – 2011 р.)

X Международной научно-практической конференции: «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2010 год).

У повному обсязі робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна в 2011 році.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 36 друкованих працях: 10 науково-технічних статей у фахових журналах, що входять до переліку фахових видань, 3 патенти на винахід, 1 патент на корисну модель, 5 деклараційних патентів України, а також сімнадцять додаткових наукових праць у вітчизняних і зарубіжних наукових виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і семи додатків. Повний обсяг роботи становить 199 сторінок машинописного тексту, з яких: основного тексту – 149 сторінок, з них: ілюстровано 64 рисунками на 24 сторінках, наведено 8 таблиць на 5 сторінках, а також списку використаних джерел з 155 найменувань на 16 сторінках, додатків на 34 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВІРКИ ПАРАМЕТРІВ РЕЛЕ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

Існуюча технологія перевірки реле, особливо їх механічних параметрів, розроблена в першій половині минулого сторіччя і в основному являє собою послідовність ручних операцій. Автоматизація вимірювання параметрів реле має на меті практично повну заміну ручних операцій шляхом спрощення способу отримання робочих характеристик за допомогою сучасної технології.

Вагомий внесок у проблеми розробки, дослідження й діагностування релейної апаратури зробили такі відомі вчені, як: Аркатов В. С., Вітенберг М. І., Гордон А. В., Дмитренко І. Є., Муравін В. М., Миловзоров В. П., Пік Р. і Уейгар Г., Разгонов А. П., Сотсков Б. С., Сливинська А. Г., Сороко В. І. та ін.

Вагомими в розвитку теорії надійності, розробці систем контролю і діагностування залізничної апаратури є дослідження таких вчених як: Андреевських О. В., Байдуж А. М., Бойнік А. Б., Гаврилюк В. І., Дмитрієв В. С., Дмитренко І. Є., Кізяков В. Я., Кравцов Ю. А., Кузнецов В. Г., Профатилов В. І., Разгонов А. П., Сафарбаков А. М., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Чепцов М. М. та ін.

1.1 Аналіз конструктивних особливостей основних типів реле залізничної автоматики та технології їх перевірки

Для автоматизації перевірки реле проаналізуємо конструкцію, комутаційну систему та контакти, характеристики та параметри які перевіряються, існуючі методи перевірки у тому числі автоматизовані. При цьому слід враховувати, що реле залізничної автоматики в залежності від конструкції та властивостей розділяють:

- за принципом дії, на електромагнітні, індукційні, електронні;
- по роду струму, на постійного і змінного струму;
- по числу положень контактної системи, на дво- і трьох позиційні [20]. по номінальному навантаженню – низького, високого і проміжного. Низькими рівнями вважаються навантаження від 1 мкА до 10 мА. Проміжними навантаженнями є струми нижче за мінімум, необхідний для створення дугового розряду (50...400 мА при напрузі вище 26 В) [21].
- за часом спрацьовування (тяжіння) і відпуску якоря - на швидкодійні - до 0,03 с; нормальнодійні - з часом спрацьовування до 0,2 с; повільнодійні - з часом спрацьовування до 1,5 с.

Основні характеристики, які визначають надійність і довговічність реле, це: зносостійкість (термічна і динамічна) матеріалу контактів и стабільність магнітної системи, перехідного опору контактів і електричних характеристик спрацьовування, фізичний зазор, контактні зусилля і др. Найбільш ненадійними елементами реле є електричні контакти. Тому задача діагностування реле зводиться, в основному, до дослідження працездатності контактної системи [19].

Із переліченого різноманіття конструкцій у пристроях автоматики і телемеханіки застосовуються електричні реле і прилади релейної дії, в яких входними і вихідними величинами є струм і напруга.

Під час автоматизації процесу слід враховувати допуски вимірювань, для різних класів реле. Звісно всі реле по надійності підрозділяються на реле другого класу (полегшеного типу) і першого класу надійності. У реле другого класу надійності повернення якоря в <0> стан забезпечується, як правило, під дією реакції контактних пружин, тому вони застосовуються в схемах, не пов'язаних безпосередньо із забезпеченням безпеки руху потягів. При використанні цих реле (дешифратори автоблокування, автоматична локомотивна сигналізація АЛС, шляхові

реле та ін.) передбачається динамічний схемний контроль. Тому допуски на номінальні параметри повинні встановлюватись в залежності від типу і класу реле [22,23,24].

Реле першого класу надійності, мають додаткові властивості, що забезпечують високу надійність їх дії:

- неможливість зварювання фронткових контактів, для цього фронткові контакти виготовляють з графіту з домішкою срібла;
- виключення злипання якоря, що забезпечується наявністю антимагнітного бронзового штифта на якорі та противаги для його відпадання замість пружин [1,29,30].

Відзначною властивістю реле першого класу є масивна металева складова елементів конструкції (осердя, якір, обмотки, втулки), що забезпечує неможливість спрацювання від наведених електрорушійних сил (е. р. с.) контактної мережі. Це пояснюється потужною екрануючою дією вихрових струмів в суцільних осердях і мідних втулках. Цю властивість можна використовувати для здійснення автоматичних вимірювань електромагнітних полів і наведених струмів для визначення параметрів безконтактними методами. Така конструкція забезпечує захист від потужних імпульсних завад, електромагнітних, грозових (блискавичних) розрядів, в силу того, що енергія спрацювання значно перевищує енергію імпульсу. Наприклад, енергія спрацювання реле НМШ2-1800 в разів перевищує енергію спрацювання інтегральних метал – оксид – напівпровідникових (МОН) - структурних схем [31,32]. З цього факту варто очікувати, що реле першого класу надійності і в подальшому будуть використовуватися у відповідальних колах та в пристроях взаємодії систем залізничної автоматики і телемеханіки, особливо в пристроях спряження цифрової техніки та об'єктів управління, тому залишається важливим завданням автоматизація їх перевірки.

В даний час на залізницях знаходяться в експлуатації реле першого класу надійності чотирьох поколінь: реле групи НР, НШ, НМШ і РЕЛ, а також реле полегшеного типу: КДР, КДРШ, РЕМ і РЕМШ [1,33].

Проаналізуємо конструкцію реле НМШ на предмет можливості застосування зовнішніх датчиків для автоматизації вимірювань (рис.1.1).

Рис.1.1 Конструкція реле типу НМШ

Магнітопровід реле НМШ складається з якоря 1, осердя 2 і Г-подібного ярма 3, які виготовляють із сталі марки ГОСТ 20832 або 20880, з обмотками 4 з міді. Якір скріплюється з масивним вантажем 5 з немагнітного (цинкового) сплаву, його рух обмежується скобою 6. На якорі укріплений антимагнітний штифт 7 з бронзи заввишки 0,1 - 0,2 мм. Контактна система і якір зв'язані тягою 8. Фронткові контакти 9 виготовляють з графітно-срібної суміші, а загальні 10 і тилові контакти 11 - з срібла. Контактні пружини виконані з фосфорної бронзи, ліві кінці упорних пружин 12 служать контактними ножами 13 і вставляються в гнізда штепсельної розетки. Пружини ізольовані прокладками 14. Всі деталі реле кріплять на пластмасовій платі. 15. Прозорий ковпак 16 з органічного скла захищає реле від зовнішніх дій, надає можливість візуального контролю контактів, та є важливою особливістю для використання оптичних датчиків під час автоматизації вимірювань.

На початку 80-х років було розроблено і впроваджується в системах автоматики реле 3 покоління першого класу надійності – РЕЛ. В порівнянні з реле НМШ у цих реле розміри зменшені в 1,7 рази, а маса – в 1,5 рази; скорочена витрата срібла і міді; підвищена вібробостійкість; комутаційний ресурс збільшений до 107 спрацьовувань; виключено «потрійне» замикання одночасно фронткового, загального і тилового контакту при зварюванні двох останніх. Відзначною особливістю РЕЛ є – якір, два осердя, чотири котушки, два вантажі. Рухоме кріплення вантажів якоря підвищує вібробостійкість реле.

Аналіз показав, що 8-трійникове реле першого класу надійності, підлягає перевірці за 56

вимірами різних параметрів, при чому кожен параметр повинен бути відображений у протоколі перевірки за підписом контролера [34]. Наявність прозорого кожуха дозволяє реалізувати ідею автоматичної оптичної реєстрації динаміки комутаційних процесів. Полімерний, прозорий кожух надає можливість реєстрації електромагнітних полів крізь кожух реле та вимірювання динаміки зміни повітряного зазора між якорем і полюсним наконечником. Одна робоча обмотка може бути використана для вимірювання магнітної індукції всередині системи.

Характеристики електромагнітних реле які підлягають перевірці можна розділити на три типи:

- електричні, до числа яких відносяться: напруга (струм) спрацьовування та відпускання реле, опір обмоток, ізоляції та перехідний опір контактів реле;
- часові: час спрацьовування реле і час уповільнення при відпусканні реле;
- механічні: висота антимагнітного штифта; хід якоря; міжконтактний зазор; контактний тиск; неодночасність замикання або розмикання контактів; сумісний хід (ковзання) контактів; фізичний зазор між якорем і сердечником реле [35,36].

Електричні і часові характеристики реле залізничної автоматики і телемеханіки при відносній вологості повітря до 90% і температурі +20°C приведені в [35].

Напруга або струм повного тяжіння якоря, заміряні при зворотній полярності на котушках реле, не повинні перевищувати напругу або струм, заміряні при прямій полярності, більш ніж на 20%.

Перевірку струмів або напруги тяжіння і відпуску проводять приладами класу точності 1,0.

Відхилення дійсного значення опору обмоток реле постійного струму (перераховане для температури +20°C) від номінальних значень не повинно перевищувати $\pm 5\%$ для реле Нмшм2-1,7, Нмм2-1,7, Нмш4-3,4 і $\pm 10\%$ для решти всіх реле [35].

Перевірку опору обмоток постійному струму проводять методами, які ґрунтуються на законі Ому, з похибкою вимірювання не більш $\pm 1\%$.

Перехідний опір замикаючих (фронтних) контактів (срібло – вугілля) без контактів штепсельної розетки має бути не більше 0,25 Ом, з контактами розетки – не більше 0,30 Ом.

Перехідний опір тильових контактів (срібло – срібло) без контактів штепсельної розетки – не більше 0,03 Ом, з контактами розетки – не більше 0,08 Ом.

Перелічені параметри та відхилення необхідно врахувати при розробці автоматизованого комплексу перевірки реле, під час зняття динамічних характеристик [37-41].

Роботу реле, як відомо, визначають дві характеристики - механічна і тягова [21,42].

Механічна характеристика реле НМШ (лінія abcd, рис.1.2), може бути побудована експериментально або в результаті розрахунку, та сумісно із тяговою характеристикою використовуватись при автоматизованому визначенні параметрів реле. Тяжінню якоря перешкоджають маса якоря і вантажу Q, опір пружних контактних пружин і сили тертя.

Рис.1.2 Тягова і механічна характеристики реле

Тягова характеристика реле є функцією від значення повітряного проміжку $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$. При цьому рух системи реле визначається як:

$EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$, $MACROBUTTON MTPlaceRef \{* MERGEFORMAT SEQ MTEqn \h \{* MERGEFORMAT \S (SEQ MTEqn \c \{* Arabic \{* MERGEFORMAT \mu 1 \S) \S$

де m_1 – приведена маса рухомих частин реле; $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ – переміщення якоря; $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ – питома сила опору руху якоря і рухомих частин реле; $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ – приведена жорсткість контактних і поворотних пружин; $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ – початкове значення електромагнітної протидіючої сили; $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ – сила тяжіння, що діє на якорі [21].

Сила тяжіння електромагніту зворотно-пропорційна квадрату значення повітряного зазора, тому графік тягової характеристики має вигляд гіперболи (рис.1.2) [21].

Точка дотику виступу механічної характеристики і кривої називається критичною точкою

(точка b, рис.1.2), яка у динаміці характеризується розмиканням останнього тилового контакту, а відповідна МРС - критичною МРС або МРС спрацьовування.

Для автоматичної побудови тягової і механічної характеристик реле необхідно мати динамічні значення зміни повітряного зазора, часові точки розмикання і замикання контактів та відповідну ним МРС. Побудова цих характеристик надає можливість автоматизації визначення необхідних механічних параметрів реле, як контактний тиск, неодноразовість комутації груп контактів, міжконтактні зазори при перельоті контактів, без зняття захисного кожуха.

При розробці автоматизованого комплексу для побудови обох характеристик реле були використані способи автоматичного визначення фізичного зазора [43,44]. Для забезпечення надійної роботи реле необхідна його перевірка через певний період часу (), де особливе значення має знос контактів реле за визначений період в умовах експлуатації.

1.2 Аналіз комутаційного зносу контактів реле

Тертя, забруднення та термічне плавлення поверхні контактів реле в основному породжується під час комутації струмів і веде до їх фізичного зносу. Забруднення контактів у існуючій технічній документації і технологічних картах досі не нормується будь якими параметрами і не вимірюється за допомогою будь яких приладів, а визначається на око механіка за допомогою серветки. З метою автоматизації визначення чистоти контактних поверхонь, проаналізуємо знос контактів, який веде до їх забруднення.

Навантаження, які комутуються контактами реле, по ступеню їх ерозійної дії на контакти реле умовно поділимо на чотири види: А - лампове навантаження і релейне з малим опором обмоток (реле НМШ – 3.4, НШ 1-2 і ін.); Б – повільнодійні реле до 100 Ом і індуктивністю вище 200 Гн; В - нормальнодійні реле з опором обмоток (); Г – контрольний режим при якому контакти комутують кола без струмового навантаження (рис.1.3). Встановлено, що близько 70% контактів реле працюють в режимі Г, 18% - в режимі Б-В, і лише 6-7% в найбільш навантаженому режимі А [32,50].

На рис.1.3 представлені залежності зносу фронтових контактів реле НМШ, які дозволяють розрахувати періодичність профілактики по комутаційному ресурсу, тобто диференціювати терміни ремонту, що дозволить значно скоротити об'єм роботи в ремонтно-технологічній дільниці.

Рис.1.3 Залежність лінійного зносу контактів реле від циклів спрацьовування

Дослідження показують, що найбільша швидкість зниження сумісного ходу фронтових контактів спостерігається при навантаженнях виду «А» і «Б» і числі циклів . При подальшому збільшенні числа циклів швидкість зносу стає постійною. Максимальний лінійний знос тилових контактів спостерігається і при замиканні ламп потужністю 25 Вт [32,50].

Рис.1.4 Гістограми розподілу сумісного ходу фронтових і тилових контактів

На рис.1.4 представлені експериментальні гістограми розподілу випадкових величин сумісного ходу фронтових і тилових контактів реле, випущених з РТД після ремонту. Гістограми добре апроксимуються нормальними законами до відповідних параметрів (Табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Математичне очікування і дисперсія параметрів

Параметри

Математичне очікування

мм

Дисперсія

Сумісний хід фронтних

0,96

0,3

Сумісний хід тилових

0,92

0,28

Видно, що середній сумісний хід контактів нейтральних реле типа НМШ перевищує встановлену норму (0,9 мм). Це створює певний запас по ресурсу контактів реле. Також видно, що розкид ходів досягає більше 25% від математичного очікування, а такий результат свідчить про те, що якість профілактики вимагає поліпшення.

Надійність реле, як вказувалось, забезпечується комутаційній спроможністю електричних контактів реле, до яких пред'являються наступні основні вимоги: дуже малий і постійний по величині перехідний опір, мала схильність до ерозії і корозії, велика зносостійкість, відсутність вібрації контактів і великий термін служби [23,24].

Аналіз зміни опору контактів було враховано під час створення ВДК, при цьому були використані емпіричні формули для визначення радіусу площі дотичних контактних півсфер і :

$$, \quad (1.2)$$

де σ - модулі пружності матеріалів півсфер. P – питомий тиск на контактної площі. При цьому максимальна напруга в матеріалі контактів дорівнює: [45].

Звичайно вважають, що повний опір контакту оцінюється по емпіричній формулі:

$$, \quad (1.3)$$

де: σ , μ , r - постійні, які залежать від матеріалу, форми і розмірів контакту. Для лінійних контактів μ , такі як у реле НМШ: [19].

Проаналізуємо причини зносу контактів (втрату або перенесення матеріалу контакту з одного елементу на інший) в процесі комутації кіл, особливо з реактивним навантаженням. Знос відбувається під дією основних фізико-хімічних факторів: а) механічного – внаслідок тертя при ковзанні, вібрації і ударах контактних поверхонь; б) хімічної корозії, пов'язаної з окисненням і іншими реакціями при високих температурах; в) фізичної ерозії, при замиканні контактів, внаслідок холодної емісії, яка викликає іскру.

Наприклад, комутація кіл при замиканні ємності дає розряд через контакти у формі короткої дуги тривалістю в декілька мікросекунд, тому при індуктивному навантаженні термін служби контактів різко зменшується унаслідок збільшення тривалості горіння дуги [19].

Працездатність контактів реле в РТД визначається величиною і характером їх ерозії, а від зносу контактних поверхонь залежить величина контактного тиску [21]. На даний час ерозію контактів визначають вручну, тому при створенні ВДК існує необхідність автоматичного діагностування контактних поверхонь.

Дослідження показали, що навіть при значному зносі і забрудненні вуглецевими відкладеннями електричні параметри контактів відповідають вимогам ТУ. Проте продовження збільшення забруднень на контактній поверхні може привести до раптової відмови [3,4,14].

Для автоматичної перевірки працездатності контактів реле важливо знати ступінь зносу і

забруднення поверхонь ковзання контактів без зняття корпусу реле. Ці дані повинні зберігатися у банку даних до чергового діагностування ВДК.

Для автоматичного визначення забруднення контактів доцільно вимірювати міжконтактний опір, як при номінальних, так і при мінімальних навантаженнях, а також контактний тиск. Для цього були запропоновані аналітичні методи, алгоритми розрахунків та способи діагностування на підставі даних перехідного опору під час сумісного ходу контактів [46,50,48].

Рис.1.5 Залежності напруг підйому і відпадання якоря реле НМШ від величини сумісного ходу фронтних і тильових контактів

На рис.1.5 представлені експериментальні дослідження залежності напруг підйому і відпадання якоря реле НМШ від величини сумісного ходу контактів. Залежності представлені по узагальненому параметру магніторушійної сили магнітного кола реле.

Із залежності можна визначити допуск на граничні значення сумісного ходу по напругах спрацьовування (). При цьому критерієм нижнього допуску служить допустимий струм витоку 1мА в обмотці реле (по опору ізоляції, монтажу). Із залежності можна визначити робочі області зміни електричних параметрів реле і допуски на них при сумісних ходах в межах 0,3...3,0 мм. Проаналізуємо існуючі методи вимірювання контактного тиску. Для вимірювання контактного тиску використовують застарілі методи, де похибка вимірювання складає до 30%. При спрацьованні реле електромагнітна сила тяжіння, як правило, рівномірно розподіляється на фронтних контактах. Контактний тиск визначається виключно регулюванням контактної системи. Недосконалість методу вимірювання контактного тиску проілюстрована на рис.1.6. Після регулювання контактної системи електромеханік повинен виконати наступну технологічну послідовність: «...Вмикають живлення реле. При притягнутому якорі грамометром вимірюють тиск на фронтному контакті до появи просвіту між упорною пластиною і фронтним контактом. Якщо тиск на кожний з фронтних менше 30 гр. – підгинають фронтні контактні пружини.» [49].

Рис.1.6 Перевірка контактного тиску на фронтному контакті

Оскільки тиск забезпечується рухомим и фронтним контактами, то правильним визначенням контактного тиску було б його вимірювання окремо для кожного з двох контактів, для чого необхідно було б використовувати одночасно два грамометра: одним грамометром тримати від зрушення рухомий контакт, а іншим відтягувати до розмикання фронтний контакт (рис.1.7).

Рис.1.7 Перевірка контактного тиску на фронтному контакті з урахуванням пружності двох контактів

Але таке вимірювання не варто застосовувати за низькою точністю кожного з двох грамометрів, та за неможливістю його виконати одному механіку. Тому розробка автоматизованого ВДК з новими методами вимірювання контактного тиску дозволить вирішити це завдання [48,51].

1.3 Аналіз методів автоматизованих вимірювань параметрів реле залізничної автоматики

Автоматизація діагностування реле має на меті практично повну заміну ручних операцій за допомогою сучасної техніки і технології.

Методи вимірювань характеристик реле можна було б поділити на контактні (прямі) та безконтактні (непрямі). Контактні методи виконуються шляхом механічного з'єднання вимірювальної системи і реле, що перевіряється. Зараз всі механічні характеристики реле в РТД

отримують тільки з використанням ручних операцій [6,17].

Вперше проблема автоматизованої оцінки параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики за допомогою безконтактних датчиків була піднята в Уральському відділенні Центрального науково-дослідного інституту Міністерства шляхів сполучення у 70 – х роках минулого сторіччя [14].

Безконтактні методи дозволяють вимірювати механічні характеристики реле без фізичного контакту вимірювального приладу з механічною системою реле за допомогою безконтактних датчиків.

Безконтактні датчики можна поділити на: ємкісні, ультразвукові, індукційні, оптичні, магнітні та інші [52]. На основі деяких з цих датчиків були створені автоматизовані стенди, у тому числі й для перевірки параметрів реле [53-60]. Але до серійного зразка дійшли тільки автоматизовані стенди для вимірювання електричних та часових характеристик реле [62-65]. Основною проблемою при використанні безконтактних датчиків для перевірки механічних параметрів реле є мала точність вимірювання, яка залежить головним чином від якості датчика, його розташування і калібрування, тобто проблема контролю достовірності отриманих результатів продовжує існувати.

Проблема автоматичного діагностування працездатності реле в цілому безпосередньо пов'язана з можливістю вимірювання ходу якоря в процесі роботи реле. Розробка нових методів автоматичного діагностування реле повинна використовувати досвід попередніх дослідників [53,54].

Відома розробка автоматизованого вимірювального комплексу АВК розробленого на кафедрі АТЗ ДНУЗТ, в якому використані методи автоматизованого визначення положення якоря по значенню магнітного опору повітряного зазора між якорем і осердям, і по значенню індуктивності обмотки реле [61]. Але ці рішення неможливо застосувати для визначення механічних параметрів повільнодійних реле і реле з малим опором обмоток (які складають до 40% від загального числа реле), за неможливістю використання у вихідних даних динаміку зміни значення струму в обмотці реле під час руху якоря, через прямокутну форму кривої струму.

Зі всіх відомих методів вимірювання повітряного зазора між якорем і полюсним наконечником тільки спосіб на базі оптичних засобів вимірювання з використанням фотометричних датчиків є прямим і тому найбільш точним способом вимірювання [55,66].

Проаналізуємо і обґрунтуємо використання оптичного способу вимірювання зазора між якорем і полюсним наконечником реле. Джерело випромінювання оптичного каналу призначене для створення вимірювального світлового променя або поля яскравості. Існуючі прилади для випромінювання діляться на: лампи розжарювання, дугові ліхтарі, ртутні і металогалогенні лампи, плазмові панелі, лазерні і світлодіодні випромінювачі та ін. [67].

До оптичного каналу пред'являються такі вимоги, як: стабільність характеристик джерел випромінювання, малі розміри, довговічність, швидкодія, сучасна технологія виготовлення [28,68].

Фотоприймачі в оптичному каналі повинні відповідати таким вимогам, як: узгодження спектральних характеристик з випромінювачем, мінімум втрат при перетворенні світлового сигналу в електричний, висока фоточутливість, швидкодія, оптимальні розміри фоточутливого майданчика, надійність і низький рівень шумів. Але їх головне призначення – перетворення світлового випромінювання в електричний сигнал.

Існуючі фотоприймачі, як і випромінювачі, діляться на безліч видів: відикони, сканістори, фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори, фотопомножувачі, фотодіодні лінійки і матриці, прилади із зарядним зв'язком і інші елементи, тому необхідно визначити їх потрібні характеристики перед вибором конкретного типу фотоприймача.

В загальному вигляді фотострум приймача

, (1.4)

де – фотострум; – чутливість фотодіоду; – освітленість [69]. При цьому чутливість кожного приймача залежить від довжини хвилі випромінювання. Поріг чутливості - найменша яскравість або освітленість об'єкту, на яку реагує приймач. Недостатня чутливість приймача створює несприятливі умови, при яких оптичний сигнал реєструється на нелінійній (початковій) ділянці світлової характеристики в умовах зниження контрасту. Крім того, різко знижується відношення сигналу до шуму, що підвищує похибку вимірювань. Вибір оптичних елементів в пристрої вимірювання надає можливість уникнути або зменшити недоліки. Відомий спосіб безконтактного визначення розмірів і положення предмету, полягає у отриманні тіньової проекції предмету на фотоперетворювачі [70].

Під час використання способу тіньової проекції, випромінювачі виконують одну з головних функцій – створення паралельного рівномірного світлового пучка. У цьому і аналогічних пристроях, які використовують когерентні пучки, промінь лазерного випромінювача колімується об'єктивом [54]. При розміщенні об'єкту в області колімованого пучка зображення об'єкту формується телецентричною оптичною системою на лінійці фотоприймачів приладів із зарядовим зв'язком або на окремому напівпровідниковому кристалі. По положенню тіньової межі (меж) процесор розраховує положення (розмір) об'єкту.

Такий спосіб має ряд особливостей: точність вимірювання залежить, перш за все, від точності визначення меж контуру об'єкту, при чому дифракційні ефекти приводять до того, що перехід від світла до тіні на фотоприймачі характеризується певною протяжністю, яка для фотоприймачів із зарядовим зв'язком складає, як правило, декілька пікселів. Більш того розмитість межі між світлом і тінню знижує точність визначення розмірів об'єкту, особливо з меншим розміром. Тому, дифракція когерентного випромінювання по контуру об'єкту вимірювання вимагає точного визначення порогового значення сигналу, та ускладнює конструкцію і процес аналізу. До того ж, реєстрація і аналіз складного процесу руху якоря реле по одному кадру, навіть з експозицією 0,1 мкс неможливі. А створення швидкісного цифрового відеозапису процесу стає економічно недоцільним. Використання об'єктивів як коліматорів світлового пучка ускладнює конструкцію і вимагає не тільки автоматизації позиціонування повітряного зазора реле напроти датчиків, але і підстроювання оптичної системи.

У відомому стенді не розраховується зазор по одержаним фотометричним даним з урахуванням форми коліматора випромінювача [55,59]. Але використання лазерного променя без його обґрунтованого геометричного формування коліматором відомих розмірів, приведе до значних помилок вимірювання [76]. Покажімо це на геометричній моделі вимірювання повітряного зазора між якорем і полюсним наконечником реле променем круглого перетину (рис.1.9).

На рис.1.8 приведена схема реле типу НМШ, що пояснює розташування елементів реле і фотометричних датчиків вимірювання повітряного зазора.

Рис.1.8 Схема розташування елементів реле і фотометричних датчиків: 1 - прозорий кожух; 2 - фронтіві контакти; 3 - загальні контакти; 4 - тиліві контакти; 5 - протипага; 6 - полюсний наконечник; 7 - якір; 8 - фотоприймач; 9 - обмотка реле; 10 - оптичний випромінювач

На рис.1.9 представлена геометрична модель використання відомого променя круглого перетину, де – висота полюса котушки, – відстань на якій проводяться вимірювання, – різні радіуси променя, – різні вимірювальні площі, і – вимірювальна і нижня (максимальна) відстань між якорем і полюсним наконечником, – кут ходу якоря. На рис.1.9 показано, якщо діаметр променя менше вимірювальної відстані, то таке вимірювання не реєструє кінцевих положеннях якоря, де закінчуються контури променя. Якщо радіус променя перевищує товщину якоря – , а центр променя знаходиться на відстані , то площа вимірювання виходить за межі якоря – , створюючи додаткове засвічення фотоприймача, під час вимірювання – .

Рис.1.9 Вимірювання променем круглого перетину: 1 - якор, 2 – повітряний зазор, 3 – полюсний наконечник

Якщо промені будуть радіусами або , то похибка вимірювання буде тим більше, чим менше радіус променя, за рахунок збільшення кривизни дуг b–c і d–e, які обмежують вимірювальну площу. Кривизну двох дуг, які обмежують вимірювальну площу зверху і знизу, при трьох невідомих: , та можливо розрахувати, тільки апроксимуючи їх кривизну до форми трапеції з відомою похибкою, але це не враховувалось у попередніх дослідженнях, тому вимірювання не були точними [71].

Крім цього у відомій роботі [59] під час оптичних вимірювань червоним лазерним променем не враховується дифракція на щілини, так звана дифракція Фраунгофера [72,73].

Згідно принципу Гюйгенса кожна точка площини щілини розміром , до якої дійшло світлове збурення, стає джерелом вторинних хвиль, що розповсюджуються на всі боки під різними кутами дифракції. Дифракційні пучки когерентні і можуть інтерферувати при накладенні. Результат інтерференції у вигляді періодичного розподілу інтенсивності спостерігається на екрані (рис.1.10). Аналітичний розрахунок розподілу інтенсивності світла при дифракції на щілині приводить до умов спостереження максимумів і мінімумів [68,74].

За результатами моделюванні оптичного каналу (параграф 2.3) проведені експерименти доказали інтерференцію когерентного променя у зазора між якором і полюсним наконечником реле, у вигляді періодичного розподілу інтенсивності, який добре спостерігається на екрані з молочного скла, розташованому на відстані від реле (рис.1.10). Аналітичний розрахунок розподілу інтенсивності світла при дифракції на щілині наданий [135].

Рис.1.10 Результат інтерференції променя, який пройшов крізь зазор між якором і полюсним наконечником реле

З цього аналізу видно, що при дифракції на щілині між якором і полюсним наконечником реле основна частина енергії світлової хвилі зосереджена в межах нульового максимуму полю яскравості, а решта може розподілятися за межі фотоприймача, що обмежує можливість застосування когерентних випромінювачів для вимірювання способом тіньової проекції. Також, дифракція світла, як хвилеве явище, зникаюче в межі , залежить від довжини хвилі світла . Червоне світло сильніше дифрагує на щілині (у повітряному зазорі між якором і полюсом), ніж фіолетове, але менше у призмі [75]. У прозорому кожуху реле вимірювальний промінь проходить крізь дві скляні стінки, тому переходів повітря скло і навпаки – чотири. Тобто розкладання білого світу в спектр, викликане дифракцією у повітряному зазорі реле має зворотну послідовність кольорів в порівнянні з тією, що виходить при розкладанні світла двома стінками прозорого кожуху реле, та менше спотворюється ніж двома стінками кожуха. Описані оптичні явища спотворюють прямі вимірювання розмірів повітряного зазора між якором і полюсом (тіньову проекцію руху якоря) і повинні бути враховані та усунені за допомогою нових методів [76].

У світі відомі серійні прилади для автоматичних вимірювань параметрів реле, але у кожного з них є окремі, суттєві недоліки.

Комп'ютеризований, автоматичний тестер CVRT-S16 (CVRT-S8) для перевірки реле, індійської фірми Vasavi за один цикл тестової процедури перевіряє: струм (напругу) спрацьовування і відпускання якоря реле; час спрацьовування і відпускання; перевіряє роз'єм і тестує форму контактів; міжконтактний зазор; перехідний опір контактів; час брязкоту контактів; опір обмотки, приведений до 20 градусів Цельсія; будує часові графіки роботи всіх контактів [62]. Програма забезпечує демонстрацію і збереження результатів тестування реле. Але цей прилад

не забезпечує вимірювання механічних параметрів реле, він розроблений під конкретні типи реле та не дозволяє його використання для вітчизняних реле без перебудови живлення, штепсельних підключень та без розробки окремого програмного забезпечення.

Відомий серійний комп'ютеризований, автоматичний тестер RelayPro™ австралійської компанії MRD (Manufacture Research Design) для перевірки залізничних реле виконує швидке тестування і аналіз роботи реле. RelayPro™ вимірює: статичний контактний опір; динамічний контактний опір; конфігурацію контакту; час перемикання контакту; опір обмотки, потужність обмотки; струм (напруга) спрацьовування і відпуску та ін. [63]. Результати тесту показуються в таблиці і в графічному форматі. Але він також не передбачає вимірювання механічних параметрів реле та вимагає переробку програмного забезпечення для вітчизняних реле.

Відома автоматизована система контролю і діагностування АСК “Тест” розробки ОмГУПС дозволяє визначення електричних і часових параметрів реле: напруги спрацьовування, час затримки на спрацьовування, напруги відпуску, час затримки на відпускання, напруги перельоту у поляризованих реле, час відпуску, неодноразовість спрацьовування, опор обмоток, опор контактів [64]. Але АСК “Тест” також не передбачає вимірювання механічних параметрів реле.

Відомий серійний вимірювальний апаратний програмний комплекс ВАПК РТУ-Р російської компанії «Росжелдорпроект» Гипротрансигнальсвязь використовується для перевірки реле НШ, НМШ, АНШ, НМПШ і РЕЛ і включає: програмне забезпечення ВАПК РТУ-Р; модуль вимірювання характеристик реле; комплект з'єднувачів; світловий екран [65].

ВАПК РТУ-Р дозволяє перевіряти реле без зняття кожуха електричні параметри реле: опір обмотки та контактів постійному струму; напругу (струм) відпуску та повного тяжіння якоря при прямій та зворотної полярності; час уповільнення на відпуск.

Російський серійний ВАПК РТУ-Р найповніше відповідає українським стандартам технічних вимог до параметрів реле, що пред'являються, проте не забезпечує їх повну перевірку, наприклад вимірювання таких механічних параметрів реле, як висота антимагнітного штифта і контактний тиск.

Для використання відомих автоматизованих стендів в Україні необхідна заміна переліку вимірювань або створення автоматизованого ВДК для перевірки параметрів реле СЦБ, у тому числі і механічних [77].

1.4 Проблеми і завдання дослідження

Удосконалення технічної експлуатації електромагнітних реле шляхом автоматизації процесів їх діагностування передбачає проведення ряду теоретичних і експериментальних досліджень та побудову автоматизованого комплексу для перевірки реле СЦБ із застосуванням новітніх технологій. При цьому необхідно вирішити ряд прикладних і теоретичних проблем з побудови датчиків отримання первинної інформації для визначення параметрів реле. А також врахувати, що специфіка методів обслуговування і експлуатації реле першого класу не допускає зниження надійності при використанні нової технології і вимірювальних приладів, та передбачає удосконалення методів підвищення надійності на різних етапах експлуатації.

Сьогодні, необхідно відзначити, що рівень оснащення РТД вимірювальною технікою і забезпечення інженерними методами перевірки і вимірювання параметрів реле вимагає вдосконалення. Це відноситься до застосування цифрової техніки в автоматизованих комплексах для кінт контролю і вимірювання параметрів реле, що сприятиме підвищенню надійності технічних засобів і дозволить по-новому організувати технологічний цикл і процес профілактики релейної апаратури систем СЦБ в цілому.

Найскладнішою і невирішеною дотепер проблемою є автоматичне вимірювання механічних параметрів реле. Для цього необхідно визначити методи які найбільшою мірою підходять для автоматизування вимірювань механічних параметрів, розробити математичний опис методів і

алгоритмів реєстрації та обчислення результатів вимірювань автоматизованим комплексом. При цьому необхідно передбачити можливість метрологічного контролю вимірювального комплексу.

Основною проблемою при автоматизації процесу діагностування електромагнітних реле є забезпечення повноти і достовірності контролю при зниженні трудомісткості операцій та підвищенні надійності. Гарантувати безвідмовну роботу апаратури під час заданого терміну експлуатації можливо тільки за умови точного вимірювання і ретельного контролю її електричних, часових і механічних параметрів. В даний час всі операції технологічного процесу в РТД виконуються вручну та вимагають великих часових витрат висококваліфікованих спеціалістів, при цьому рівень похибок при регулюваннях в реле залишається високим.

Запровадження автоматизованого діагностичного комплексу виключить людський чинник здійснення похибок при обслуговуванні та забезпечить об'єктивний контроль параметрів електромагнітних реле при виході їх з РТД.

У зв'язку з вищевикладеним для удосконалення технічної експлуатації, підвищення надійності реле залізничної автоматики, шляхом автоматизації технологічного процесу їх обслуговування і зниження експлуатаційних витрат, доцільно розробити перевірку параметрів реле без зняття захисного кожуха. Для підвищення достовірності автоматизованої перевірки, доцільно розробити метод одночасного застосування різних методів технічного контролю механічних параметрів. Для забезпечення технічного контролю важливим завданням є розробка методів автоматичної ідентифікації приладів, автоматизованого запису і архівації вимірюваних параметрів. З метою контролю технічного стану рухомої системи і контактних груп реле не розкриваючи захисного кожуха необхідно розробити автоматизований метод діагностування рухомої системи і поверхонь контактних груп реле, заснований на не руйнуючому контролі і аналізі явищ, що виникають в наслідок переміщень рухомої системи реле.

Всі вище перелічені проблемами неможливо вирішити у рамках одного дослідження. Необхідно зупинитись на більш важливих. Велику науково-прикладну задачу представляє дослідження методів вимірювання параметрів і датчиків отримання первинної інформації. Тому в даній роботі велика увага надана рішення цієї головної задачі, необхідної при розробці автоматизованого комплексу.

Таким чином, основні задачі, які необхідно вирішити в даній роботі, полягають в наступному:

1. Аналіз існуючої технології перевірки параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики та методів автоматизації процесів діагностування.
2. Розробка математичних моделей автоматизованого вимірювання параметрів реле.
3. Розробка дослідного зразка автоматизованого вимірювального діагностичного комплексу перевірки реле залізничної автоматики.
4. Проведення експериментальних досліджень автоматизації процесів вимірювання параметрів і діагностування стану реле залізничної автоматики.
5. Розробка пропозицій з удосконалення технічного обслуговування реле залізничної автоматики з використанням автоматизованого комплексу.
6. Техніко-економічне обґрунтування розробки.

Основні результати по даному розділу опубліковано в роботах [38,39,43,44,50,51,71,76,77].

РОЗДІЛ 2

НАУКОВІ ПОЛОЖЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЛЕ

Equation Section 2

2.1 Побудова математичної моделі об'єкта діагностування

Автоматичне вимірювання електричних і часових параметрів реле не викликає великих труднощів, для цього існують різні пристрої та використовують відомі методи, які розділяють: за способом отримання результатів вимірювань – на прямі, непрямі, сукупні і сумісні; за умов вимірювання – контактні і безконтактні [78]. Разом з цим існує проблема автоматичного вимірювання механічних параметрів реле залізничної автоматики, яка безпосередньо пов'язана з можливістю автоматичного вимірювання зміни фізичного зазора між якорем і полюсним наконечником реле в процесі його роботи, для автоматичного визначення контактного тиску, сумісних ходів, з отриманих динамічних характеристик. Як вказувалось у розділі першому цієї роботи, для вирішення даної проблеми в різний час були запропоновані різні способи і пристрої [55-60]. Але дотепер не створено серійного зразка автоматизованого стенда для вимірювання механічних параметрів реле залізничної автоматики без зняття захисного кожуха. Ефективно проблема може бути вирішена шляхом побудови системи автоматизованих методів неконтактних вимірювань, при їх сумісному використанні [79].

Структурна схема використання системи методів автоматизованого визначення параметрів реле представлена на рис.2.1. Для отримання результатів автоматичного діагностування необхідно мати вихідні данні про об'єкт, канали отримання первинних даних, апарат аналізу і діагностування [80,81].

Рис.2.1 Структурна схема використання системи методів автоматизованого визначення параметрів реле

Розгорнута структурна схема автоматизованої системи вимірювання параметрів реле залізничної автоматики представлена на рис.2.2. Вихідні данні повинні містити інформацію про тип, конструктивні особливості реле, що досліджується, та попередні, архівні данні, які були отримано за визначений час. Алгоритми роботи каналів і методів вимірювання докладно описані у третьому розділі [82,83].

Вимірювання електричних характеристик реле містить послідовності: вимірів опору обмоток реле, вимірів перехідного опору контактів, опору ізоляції, вимірів струму спрацювання та струму відпадання.

Вимірювання часових характеристик містить послідовності: вимірів часу спрацювання (тяжіння якоря реле), часу відпускання (відпадання якоря реле) та брязкоту контактів.

Вимірювання механічних характеристик будується разом за допомогою використання декількох вимірювальних каналів: оптичного, акустичного, електричного та електромагнітного, кожен з яких реєструє у часі динамічні характеристики зміни фізичних величин відповідних каналів, з метою визначення фізичного зазора реле, який у часі співвідноситься з комутацією контактів, для подальшого визначення механічних характеристик та діагностування реле в цілому.

Рис.2.2 Автоматизована система вимірювання параметрів реле

Побудова багатоканальної моделі з безпечною та надійною роботою елементів передбачає здійснення контролю за результатами її роботи [84]. Ціль визначення фізичних величин декількома різними методами полягає у зменшенні похибки вимірювання, яка автоматично може компенсуватися після отримання всіх вимірювань у каналах зняття первинної інформації.

Діагностування реле можна представити декількома рівняннями на яких ґрунтується можливість автоматичної реєстрації динамічних характеристик зміни фізичних величин у каналах вимірювання.

В оптичному каналі реєструється зміна освітленості або потужності світлового потоку, яку можна представити:

$$P = E \cdot t \quad (2.1)$$

де P – потужність світлового потоку, E – енергія, t – час. При цьому енергія одного фотону ϵ , де h – постійна Планка, ν – частота [68].

В акустичному каналі реєструється зміна акустичного тиску, який створюється віброакустичними хвилями, приймається та перетворюється первинним перетворювачем [97]:

$$P = \rho \cdot v \cdot a \quad (2.2)$$

де P – акустичний тиск, ρ – густина середовища розповсюдження хвиль, v – швидкість розповсюдження, a – швидкість коливального руху елемента.

Електромагнітний канал забезпечує реєстрацію зміни електрорушійної сили (е.р.с.) індукції в контурі вимірювального датчика (катушки):

$$P = \Phi \cdot I \quad (2.3)$$

де P – е.р.с. індукції, Φ – магнітний потік [94].

Електричним каналом забезпечується реєстрація комутаційних процесів контактів в часі та зміна струму (напруги на додатковому резисторі) в обмотці реле [21]:

$$P = U \cdot I \quad (2.4)$$

де U – напруга, I – струм в обмотці, R – опір обмотки, Φ – потокозчеплення.

Визначення електричних і часових параметрів не викликає труднощів. Відповідно з рис. 2.2 запропоновану математичну модель об'єкта діагностування для визначення механічних параметрів реле можна представити у вигляді наступної схеми: вихідних даних, апарату реєстрації та рішення, а також множини отриманих результатів рис. 2.3.

Рис.2.3 Схема об'єкта діагностування

Реєстрація динамічних характеристик відбуваються під час автоматизованих випробувань реле. Для запобігання вимірювань пошкодженого реле або при несправному датчику вимірювань, попереднє діагностування роботи реле і всього вимірювального комплексу автоматично відбувається під час отримання динамічних характеристик реле рис.2.2 . Після цього видається дозвіл на продовження визначення параметрів.

Визначення механічних параметрів відбувається після отримання електричних і часових параметрів з використанням зведеного результату вимірювань фізичного зазора. На підставі отриманих даних визначаються згадані вище параметри рис.2.3.

Якщо величина окремого параметру знаходиться за межами допусків, видається команда на ремонт реле. Якщо всі параметри знаходяться в межах допусків, відбувається формування звіту результатів діагностування та пропонується час проведення чергової перевірки з урахуванням даних випробувань. Прогнозування здійснюється шляхом порівняння отриманих даних з даними попередніх випробувань.

2.2 Математичне моделювання контактної системи

Математичне моделювання контактної системи базується на теорії пружності [85], використовується для побудови робочих характеристик реле при визначенні тягових зусиль та контактного тиску.

Нормованими параметрами є: n - кількість рухомих контактів; m - маса якоря; l , l_0 – плечі якоря, θ ;

- міжконтактна відстань; - довжина контактної пружини; - ширина контактної пружини; - відстань до місця кріплення якоря до контакту; - висота антимагнітного штифта; - товщина рухомої пружини; - товщина тилової або фронтної пружини; - модуль пружності матеріалу пружини; - момент інерції поперечного перерізу загальної (рухомою) пружини; - момент інерції поперечного перерізу фронтної або тилової пружини; - мінімальний контактний тиск на фронтному контакті; - мінімальний контактний тиск на тиловому контакті; - початковий (попереднє) тиск на фронтному контакті; - початковий (попереднє) тиск на тиловому контакті; - ковзання (спільний хід контактів) в перерахунку на хід якоря; - не одночасність замикання (розмикання) в перерахунку на хід якоря контактів; - конструктивний початковий зазор між контактами.

Прогинання контактних пружин порівняно з їх довжиною мале і не виходить за межі пружної деформації, тому для розрахунків можна використовувати теорію згинання пружної балки, закладеною на відстані одним кінцем і навантаженою силою (рис.2.4).

Рис.2.4 Схема згинання контакту реле НМШ

Величина згинання кінця контактної пружини буде рівна:

$$, \quad (2.5)$$

де C – жорсткість контактної пружини на одиницю сили, яка визначається наступним виразом:

$$, \quad (2.6)$$

де E – модуль пружності матеріалу (контактні пружини в реле НМШ і РЕЛ виготовляються з фосфорної бронзи з $E = 110 \cdot 10^9$ Па), I – момент інерції пружини, L – відстань від місця кріплення пружини до місця прикладення сили F – довжина контакту [21]. Момент інерції перетину плоскої пружини рівний:

$$, \quad (2.7)$$

де b – ширина пружини, h – товщина пружини [21].

Співвідношення згинання пружини контакту в точці прикладення сили F і на кінці пружини контакту δ , де створюється контактний тиск, визначається наступним виразом:

$$, \quad (2.8)$$

для реле НМШ складає 1,666 [48].

Таким чином, коефіцієнт передачі між ходом якоря x і ходом контакту δ складає для реле НМШ

$$. \quad (2.9)$$

Для механічної системи реле НМШ (рис.1.1) можна скласти наступне співвідношення сил:

$$, \quad (2.10)$$

де m – маса якоря, a – прискорення якоря при його русі після включення струму в обмотку реле [86,149].

В літературі описуються загальні принципи розрахунку та побудови механічної характеристики реле. Але у деяких типів реле, наприклад НМШ, необхідно враховувати скритий хід контактів реле, який скритий завдяки встановленню упорних пластин якими регулюють одночасність замикання та розмикання контактів у групах. Для урахування прихованого ходу необхідні додаткові розрахунки.

Для подальших розрахунків з математичного опису будуть враховуватись наступні константи, прийнятні для усіх реле типу НМШ:

; [86].

Побудуємо механічну характеристику реле типу НМШ (рис.2.5).

Рис.2.5 Механічна характеристика реле типу НМШ

Математичний опис прогинання рухомої пружини на ділянці СД [86,149].

Прогинання загальної пружини (рис.2.6) в точці дотику робочої тяги:

$$\dots (2.11)$$

Рис.2.6 Прогинання загальної пружини

Прогинання кінця загальної пружини від сили :

$$\dots (2.12)$$

Після перетворення отримаємо:

З виразів (2.11) і (2.12) знайдемо:

$$\dots (2.13)$$

Тоді, після підстановки отримаємо:

$$\dots (2.14)$$

Якщо для реле типу НМШ конструктивний початковий зазор між рухомим і тиловим контактами у розрахунках має негативне значення, то це означає що контакт новий та має максимальну висоту графітної частини. В процесі роботи за рахунок стирання графіту зазор набуватиме позитивних значень і, зрештою, швидкість зміни і граничне значення цього параметра визначають тривалість експлуатації реле.

Прогинання фронтової пружини на ділянці АС (рис.2.5)

За технічними умовами на кожному фронтівому контакті повинен створюватися тиск не менше 30 гс, причому попереднє натиснення, що створюється упорною пружиною складає 15-20 гс.

Рис.2.7 Прогинання фронтової пружини

Спочатку проведемо розрахунок без урахування "прихованого" ходу контакту за розрахунковою схемою (рис.2.7). Прогинання кінця фронтової пружини

$$\dots (2.15)$$

Прогинання в точці кріплення робочої тяги

$$\dots (2.16)$$

Спільний прогинання загальної і фронтової пружин на ділянці ΔФ (рис.2.7) забезпечується за рахунок того, що загальна пружина, пройшовши міжконтактну відстань, здійснює спільний прогинання з фронтовою пружиною, з метою досягнення необхідного контактного тиску [86,149]. За розрахунковою схемою (рис.2.8) прогинання в точці кріплення тяги під дією сил і

$$\dots (2.17)$$

Рис.2.8 Прогинання загальної і фронтової пружини

Прогинання кінця загальної пружини під дією сил і :

$$\dots (2.18)$$

Оскільки прогинання кінця фронтової пружини відбувається спільно із загальною пружиною, то [86,149]. Тому отримаємо:

$$\dots (2.19)$$

Хід якоря (рис.2.5) на ділянці АС: .

Прогинання тилової пружини на ділянці ДЕ (рис.2.5) визначається по формулі:

$$[86,149]. \quad (2.20)$$

Рис.2.9 Прогинання тилової пружини

Прогинання пружини (рис.2.9) в місці кріплення тяги:

$$\dots (2.21)$$

Спільний прогинання загальної і тилової пружин (рис.2.10) на ділянці ТЕ (рис.2.5) забезпечує силу, створену за рахунок маси якоря [86,149]:

$$\dots (2.22)$$

Рис.2.10 Прогинання загальної і тилової пружини

Прогинання загальної пружини в місці кріплення якоря визначається по формулі [86,149]:

$$\dots (2.23)$$

Прогинання кінця загальної пружини на ділянці ДЕ (рис.2.10 і рис.2.5)

$$\dots (2.24)$$

Для визначення фактичного значення скористаємося рівністю [86,149].

З виразів (2.17) і (2.18) отримаємо

$$\dots (2.25)$$

Наприклад для реле типу НМШМ1 з контактною системою 8 фт і масою якоря 240 гс було визначено:

; ; ; .

При цьому хід якоря (рис.2.5 г) на ділянці ДЕ складе:

.

Проведемо розрахунок прихованого ходу контактів [86,149].

Технічними умовами задані: спільний хід ; ; не одночасність комутації [1,17].

Нормується і попереднє навантаження тильових і фронтових контактів за рахунок упорних пружин ; . Ці навантаження в механічній характеристиці для якоря складуть величини відповідно і (рис.2.5 г). Величину ходу якоря для забезпечення навантаження можна визначити при середньому значенні нормованого початкового контактного тиску з пропорції:

$$\dots (2.26)$$

Аналогічно:

$$\dots (2.27)$$

Прогинання загальної пружини на ділянці АТ: . Навантаження на якір: . Загальне

навантаження на якір: . Прогинання загальної пружини на ділянці ОЕ : .

Навантаження на якір: . Загальне навантаження на якір: . Попереднє навантаження на якір від фронтової і тилової упорних пластин складуть в середньому відповідно:

$$\dots (2.28)$$

$$\dots (2.29)$$

Загальний хід якоря:

$$\dots (2.30)$$

забезпечує нормативні параметри реле при номінальній масі якоря. Тоді хід якоря на ділянках "ковзання" контактів при нормативній величині розраховується так:

Хід якоря на ділянці "вільного перельоту" Ф-Т .

Відстань між рухомими і тильовими контактами: .

Відстань між рухомими і фронтними контактами: .

Сукупність реакції сил пружності усіх контактних пружин і маси якоря:

$$\dots (2.31)$$

У свою чергу:

$$\dots (2.32)$$

де - реакція пружності контактної групи на ділянці "ковзання" А-Ф; - те ж на ділянці "вільного перельоту" Ф-С; - те ж на ділянці "вільного перельоту" Д-Т; - те ж на ділянці "ковзання" Т-Е;

Опір рухомої пружини на тилу і фронтову пружини на ділянці визначають за виразами:

$$, \quad (2.33)$$

Загальне навантаження на якорі від рухомих пружин складає:

Значення механічної характеристики в точках А, Ф, О, Т визначається:

$$(2.34)$$

Загальна механічна характеристика реле типу НМШМ1 на початку періоду експлуатації приведена на рис.2.5 д. Відповідно розглянутого прикладу для реле типу НМШМ1, при заданих початкових даних механічні параметри укладаються в допустимі межі, створюється деякий запас в зоні регулювання спільного ходу фронтових контактів тоді як можливі проблеми при регулюванні спільного ходу тилу контактів.

Запропонована у параграфі математична модель контактної системи дозволяє будувати механічну характеристику для будь-якого типу реле на початку їх використання, та через регламентований час. Результатами використання моделі є автоматичне визначення контактних зусиль та контактного тиску без зняття кожуха реле, під час контролю механічних параметрів реле (параграф 3.7 цієї роботи) [48,149]

2.3 Розробка математичної моделі підсистеми оптичного каналу вимірювання

Для побудови оптичного каналу вимірювання необхідне джерело випромінювання і фотоприймач.

Вимогам до джерел випромінювання світлового променя більшою мірою відповідають лазерні і світлодіодні випромінювачі. Обґрунтування типу випромінювача і хвильового діапазону роботи оптичного каналу досконаліше розглянуто у розділі 3.

Приладами, які повною мірою відповідають вимогам до фотоприймачів відносяться напівпровідникові фотодіоди. Для фотодіодів не потрібна висока живляча напруга, а світлова характеристика відповідає прямій пропорційності фотоструму від освітленості [68]:

$$, \quad (2.35)$$

де – чутливість фотодіода; – освітленість.

Залежність струму через фотодіод від напруги і інтенсивності падаючого світла описується формулою [68]:

$$, \quad (2.36)$$

де – «темновий» струм; – електричний заряд електрона; – напруга на діоді; – постійна Больцмана; – абсолютна температура; – квантовий вихід носіїв заряду при збудженні світлом (усереднена кількість носіїв, які виникають при поглинанні одного кванта світла); – інтенсивність світлового потоку (фотонів/с).

Загальне рівняння струму, що протікає через фотодіод у вентильному режимі має вигляд:

$$, \quad (2.37)$$

де I – струм через фотодіод, A; – фотострум, A; – струм насичення, A; – фотоелектрорушійна сила, В; – температура, К [68].

Це рівняння можна переписати

$$. \quad (2.38)$$

Якщо залежить від розмірів засвіченої площі фотоприймача, яка визначається повітряним зазором реле, то можна записати

$$, \quad (2.39)$$

де – повітряний зазор, – коефіцієнт калібрування.

Як видно з (2.37) - (2.39) для того, щоб забезпечити оптичні вимірювання величини повітряного

зазора реле достатньо забезпечити рівень освітленості фотодіоду вище за поріг чутливості, при цьому не повинне виникати струму насичення фотодіоду.

Найпростішим і доцільнішим представляється вимірювання повітряного зазора на просвіт (тіньовий принцип), коли з одного боку зазора встановлений випромінювач, а з іншою – фотоприймач, тоді тінь на приймальній апертурі фотоприймача створюється якорем, полюсним наконечником і коліматором випромінювача. Корисний сигнал визначається розмірами площі поля яскравості, яка обмежується вище переліченими тінями і визначає освітленість – на приймальній апертурі та перетворюється фотоприймачем в напругу або фотострум (в залежності від режиму включення), тобто визначається на прямій фотоструму. Розрахунок величини повітряного зазора між якорем і полюсним наконечником ведеться на рівні розташування антимагнітного штифта. У загальному вигляді, де k – коефіцієнт калібрування, який визначаються при калібруванні фотометричних датчиків крізь скло кожуха (2.39). Тоді максимальному сигналу буде відповідати площа коліматора випромінювача, розміри якого відомі. Після калібрування всі вимірювання площі яскравості, які зроблені за допомогою фотоструму або напруги, по шкалі інтерфейсу програми, автоматично відображаються у каліброваних одиницях (метрах, міліметрах і т.д.), або

$$, \quad (2.40)$$

де S – виміряний фотострум, відповідно площі яскравості на апертурі фотоприймача [71].

Для вимірювання величини повітряного зазора достатньо мати значення розмірів коліматора випромінювача (каліброваного отвору або майданчика випромінювання), за умови, що розміри апертури фотоприймача більше проекції поля яскравості корисного сигналу, що сформувалася на ньому. Але необхідно врахувати геометричні особливості фізичного (повітряного) зазора між якорем і полюсним наконечником.

Основними з багатьох можливих є використання двох форм коліматорів випромінювача – прямокутної і круглої форми.

Рис.2.11 Фізичний проміжок з проекціями двох форм коліматорів випромінювача: а) прямокутної форми; б) круглої форми

На рис.2.11 наведено фізичний проміжок між якорем і полюсним наконечником з проекціями форм коліматорів випромінювача: а) прямокутної форми; б) круглої форми, де 1 – якор, 2 – зазор, 3 – полюсний наконечник, L – відстань для вимірювань знаходиться на відомому рівні антимагнітного штифта – L , H – висота полюса котушки, R – радіус коліматора випромінювача круглої форми. Розглянемо обидва випадки.

Представлення повітряного зазора прямокутною проекцією [71]. При проходженні зазора між якорем і наконечником проекція набуває форму трикутника або трапеції. Площа трикутника

$$. \quad (2.41).$$

З подібності трикутників 1 і 2 з основами a і b маємо

$$. \quad (2.42)$$

Тоді

$$. \quad (2.43)$$

З (2.42) і (2.43) отримаємо

$$, \quad (2.44)$$

звідки величина фізичного зазора

$$. \quad (2.45)$$

Площа цієї трапеції з висотою h та основами a і b

$$, \quad (2.46)$$

при чому S , L . Тоді S , й нарешті

$$. \quad (2.47)$$

Вимірювана напруга з фотоприймача пропорційна площі яскравості випромінювача
(2.48)

Максимальна відстань між якорем і полюсним наконечником дорівнює стороні трапеції
(2.49)

Звідки величина фізичного зазора на відстані h
(2.50)

з урахуванням (2.40) отримаємо
(2.51)

Аналогічно, з урахуванням (2.40), формулу (2.45) можна переписати
(2.52)

Співвідношенням (2.51) визначається величина повітряного зазора між якорем і полюсним наконечником при висоті прямокутного коліматора випромінювача, менше висоти H полюса реле.

Співвідношенням (2.52) визначається величина повітряного зазора при висоті прямокутного коліматора випромінювача, більше або рівної висоті H полюса реле.

Представлення повітряного зазора частиною кола [71]. Визначимо відстань між якорем і полюсним наконечником для випадку, коли засвічений повітряний зазор є частиною кола, а область засвічування – півколом, рис.2.11 б.

Вважаємо, що відомі наступні величини:

- висота полюса котушки; - відстань від початку координат до центру засвіченого півкола; - радіус півкола області що засвічується; - площа повітряного зазора (частина круга), при цьому .

Необхідно визначити відстань від якоря до полюсного наконечника на рівні знаходження антимагнітного штифта . Відстань можна визначити, якщо відоме рівняння прямої , .

Визначимо, спочатку, кут між прямою і віссю . Якщо центральний кут відомий, то хорда пов'язана з ним співвідношенням

$$(2.53)$$

Обчислимо кут . Площа сегменту круга відповідного центрального кута
(2.54)

кут вимірюється в радіанах. Кут визначимо приблизно із співвідношення (2.54), представивши функцію рядом Тейлора в околиці точки , узявши два перші члени , отже , . Площа сегменту буде , де - початкові дані площі повітряного зазора . Тепер можна обчислити хорду відповідно до виразу (2.53).

Рівняння кола в декартовій системі координат відповідно рисунку , або , .

Точка перетину прямої з колом знаходяться з виразів

- координати точки
, ; (2.55)

- координати точки
, . (2.56)

Запишемо систему рівнянь для визначення координат точок перетинів прямої з колом і тангенса кута нахилу прямої
(2.57)

до умов (2.55) і (2.56) додамо вимоги стосовно відстані між точками A і B (відстань між точками і дорівнює хорді)
(2.57)'

Враховуючи відоме співвідношення знаходимо відстань що цікавить
(2.58)

Помітимо, що системи (2.57) і (2.57)'- системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. Для їх вирішення може бути використано чисельний метод Ньютона, або метод найменших

квадратів [139].

Оскільки система (2.57) і (2.57)' розв'язується приблизно, розглянемо ще один варіант, винятково геометричний, визначення величини .

Для даного кола справедливо

$$(2.59)$$

де величина – відстань від осі до прямої АВ (перпендикулярна хорді).

У виразі (2.59) всі величини для визначення відомі. Помітимо що в (як кути в трикутниках з взаємно перпендикулярними сторонами). Далі, для справедливо . З одержимо , .

І, нарешті . Нагадаємо, що величина обчислюється відповідно до співвідношення (2.59).

Підставивши одержані проміжні результати значення і значення кута , остаточно отримаємо (2.60)

де, , а визначається відповідно з (2.40).

Адекватність отриманих моделей була перевірена за допомогою критерію Вілкоксона на рівні значимості 5 % додаток [Ж.4].

Прогнозування стану реле за результатами спостережень [71]. Спостережувані величини в процесі проведення випробувань реле автоматично накопичуються в ПК через пристрій узгодження комп'ютера і вимірювального приладу. Виміряні дані аналізуються на нормальний закон розподілу і рівномірний закон розподілу, побудуванням гістограм [87,88].

В припущенні нормального закону розподілу величини обчислюємо середнє значення відстаней та оцінку дисперсії (вибіркової). Про стан реле робимо висновки наступним чином.

Рахуємо, що реле працює відповідно до вимог якщо середнє значення лежить в інтервалі , де , - відповідно номінальні значення оцінок середньої та вибіркової дисперсії. При цьому і також перебувають в допустимих номінальних інтервалах. Величини , обчислюються раніше, працюючи з відомо придатними до експлуатації реле.

В припущенні рівномірного закону розподілу виміряних значень якір відхиляється майже завжди неоднаковим чином, в цьому випадку необхідно провести ретельнішу перевірку і регулювання реле, або провести більше спостережень та повторити процес визначення стану реле.

Аналізувати можна як безпосередньо виміряні величини , - номер спостереження, так і різниці , що доцільніше через кращу наочність.

Про характер розкиду виміряних величин можна судити, провівши спектральний аналіз вимірювань , , – номер вимірювання, - кількість спостережень, за допомогою дискретного перетворення Фур'є.

В амплітудно-частотній характеристиці виміряних зазорів, придатного до роботи реле, повинен бути один, яскраво виражений сплеск амплітуди, якщо якір відхиляється на одну і ту ж величину. Відповідна частота сплеску визначається експериментально в серії дослідів, випробовуючи справні реле. Рівномірний спектр свідчатиме про неоднакові відхилення якоря в процесі серії випробувань одного приладу.

Фотоелектричні приймачі випромінювання, навіть створені на прецизійних аналогових мікросхемах, володіють інерційністю, що характеризується часом між початком опромінювання і появою струму в колі. При прийнятті модульованих світлових сигналів чутливість залежить й від частоти модуляції. Отже, чутливість і роздільна здатність приймача залежить від конструкції фотоприймача, елементної бази і форми прийнятого сигналу, що визначає рівень похибки вимірювань [89].

Способи обробки результатів оптичних вимірювань розглянуті в [90,91]. Значення вимірюваної величини повітряного зазора між якорем і полюсним наконечником реле отримують за допомогою оптичного каналу вимірювання сумісно з електричним, електромагнітним і акустичним каналами вимірювання (рис.2.2), з можливим повторенням всіх вимірювань, тому

необхідна подальша обробка отриманих даних для усунення похибки вимірювання. Як оцінку дійсного значення вимірюваної величини природно прийняти середнє арифметичне отриманих результатів вимірювань, з масиву отриманих відліків : [90]. Воно вважається найбільш імовірним значенням шуканої величини, якщо відсутні або виправлені систематичні похибки і відкинуті промахи.

Середнє квадратичне відхилення (СКВ) ряду вимірювальних відліків (спостережень) при кінцевому числі відліків знаходять по відомим формулах [90].

Результат вимірювання можна записати у вигляді:

$$(2.61)$$

При , де - дійсне значення вимірюваної величини, що лежить в інтервалі (2.10), накривається правою частиною рівності з деякою імовірністю [91]. На практиці найчастіше приймають . При визначенні похибки приладу проводиться підсумовування помилок від різних джерел. При цьому випадкові незалежні похибки підкоряються закону нормального розподілу, тому проводять їх квадратичне складання [88]:

$$(2.62)$$

де – окремі середні квадратичні похибки від різних джерел.

Систематичні похибки додають алгебраїчно з урахуванням їх знаку. Використовуючи отримано таким чином дані, можна заздалегідь розрахувати сумарну похибку показань приладу і усунути джерела найбільших похибок або, навпаки, при заданій точності приладу розрахувати допуски на складові похибки. Визначення похибки вимірювань оптичного каналу необхідно для встановлення можливості його використання відповідно до діючих ТУ при визначенні механічних параметрів реле яке перевіряється (саме до крайніх положень якоря, яке зараз вимірюється щупами із точністю до 0,05 мм) [7].

При розробці оптичного каналу вимірювання враховані світлові ефекти і досягнута велика точність вимірювання ходу та положення якоря, яка складає одиниці мкМ [71]. Отримано дані про фактичне положення якоря реле у будь яку мить його роботи надають можливість оцінити контактні зусилля та автоматизувати процес визначення контактного тиску, розмірів фізичного зазора та висоти антимагнітного штифту.

2.4 Розробка математичної моделі підсистеми акустичного каналу вимірювання

Одним з ефективних методів неконтактного діагностування радіоелементів у тому числі і реле є акустичні методи [92,93].

У роботі запропоновано використання акустичного методу діагностування реле [95,96,99,100]. Акустичний шумовий сигнал реле породжується при перетворенні енергії під час руху механічних частин реле. Так енергія маси якоря під час тяжіння та його зіткненні з полюсним наконечником перетворюється на теплову енергію та енергію деформації, породжуючи механічні хвилі у деталях реле, корпусі та навколо нього.

На рис.2.12 представлена акустична шумова діаграма роботи реле 1 в поєднанні з фактичним рухом якоря 2 реле НМШ-2900

Рис.2.12 Акустична шумова діаграма 1 та рух якоря реле 2 при спрацюванні реле

Максимальне значення амплітуди шуму співпадає з зупинкою якоря реле під час його удару об полюсний наконечник реле (рис.2.12). Для діагностування реле достатньо застосування вимірів імпульсу сили під час удару якоря о полюсний наконечник (рис.2.13), за визначений час тривалості удару . При цьому імпульс сили визначається

$$(2.63)$$

або

$$, \quad (2.64)$$

де – імпульс сили, – середня сила, – час дії сили [97].

При прямому ударі антимагнітного штифта о полюсний наконечник імпульс тіла буде рівний імпульсу сіли [101]

$$, \quad (2.65)$$

де – приведена маса якоря, – швидкість якоря, звідси

$$. \quad (2.66)$$

При ударі імпульс тіла (якоря) рівний імпульсу сили породжує акустичні хвилі які мікрофоном перетворюються в перемінну електричну напругу – від акустичних коливань, при цьому, на прямокутної ділянці акустичної характеристики мікрофону [143]:

$$, \quad (2.67)$$

З урахуванням параметрів мікрофону і середі розповсюдження хвиль можна записати

$$, \quad (2.68)$$

де – коефіцієнт калібрування, який характеризує параметри мікрофону та встановлюється експериментально з урахуванням типу реле та мікрофону.

Для оцінки величини акустичного сигналу на момент зіткнення з полюсним наконечником достатньо знайти середню швидкість , де - фізичний зазор (шлях якоря), - час руху якоря до зіткнення тоді та

$$, \quad (2.69)$$

або з (2.65)

$$, \quad (2.70)$$

де - прискорення якоря під час спрацювання, яке визначають за даними оптичного каналу звідки

$$. \quad (2.71)$$

де – частота яка містить максимальну амплітуду (рис.2.13).

Рис.2.13 Період акустичних коливань максимальної амплітуди з спектру шуму під час удару якоря

Визначення з використанням акустичних коливань під час відпадання якоря реле (рис.2.14) можна зробити по формулі (2.71), або скориставшись формулами збереження енергії [101].

Потенційну енергію якоря перед відпаданням можна представити

$$. \quad (2.72)$$

Вона перетворюється у кінетичну енергію під час руху і удару якоря о тиллові контакти та обмежувальні пристрої

$$. \quad (2.73)$$

При цьому енергія звукової хвилі, перетворена мікрофоном в змінну електричну напругу, пропорційна кінетичної енергії на прямокутної ділянці акустичної характеристики мікрофону , або:

$$, \quad (2.74)$$

З урахуванням параметрів мікрофону і середі розповсюдження хвиль (2.74) можна записати

$$, \quad (2.75)$$

або

$$, \quad (2.76)$$

де - максимальний шлях пройдений якорем при відпаданні, – коефіцієнт калібрування, який характеризує параметри мікрофону і середі розповсюдження акустичних хвиль при відпаданні, – час при відпаданні визначається від початку руху якоря до максимального значення амплітуди акустичного сигналу.

Рис.2.14 Акустична діаграма при відпаданні якоря реле

При цьому необхідно враховувати, що відрізняється від при сталому якорі за рахунок шляху , пройденого якорем після зіткнення і сумісного руху рухомих контактів з тисовими, під час їх згинання (рис.2.14), тому – характеризує пружність тисових контактів і може використовуватись при розрахунках контактного тиску на тисових контактах та для їх діагностування.

Однією з найбільш інформативних діагностичних характеристик шумового сигналу є розподіл ймовірностей амплітуд звукового тиску [98]. Дослідження показали, що в дуже великому числі випадків розподіл амплітуд флуктуючих шумів може бути апроксимований нормальним законом розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.77)$$

при - щільність ймовірності появи амплітуди звукового тиску, – випадкова величина, яка характеризує амплітуду звукового тиску, - середньоквадратичне відхилення, – математичне очікування [88].

Практичне одержання з шумового сигналу статистичних розподілів амплітуд засноване на поділі шкали амплітуд на дуже малі відрізки Δt .

Ймовірність появи амплітуди в інтервалі і інтервали можна знайти. Отримання та обробка даних за інтервал появи даної амплітуди

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.78)$$

позволяє провести оцінку ймовірності появи амплітуди шуму в інтервалі :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.79)$$

а щільності ймовірності розподілу амплітуд [88]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.80)$$

Характерні шумові сигнали реле, як показують експерименти мають періодичні і неперіодичні складові. Параметри шумових сигналів змінюються з часом – у бездефектних реле повільно, у реле, що наближається до стану руйнування – швидко.

На основі накопичення статистичної інформації, вирішується ідентифікація об'єкта, який шумить із значно меншим числом вхідних і вихідних параметрів, за якими з певною ймовірністю можна робити висновки про стан об'єкта [103].

Методи ідентифікації шумових сигналів відповідним станам реле (справне, несправне) були успішно застосовані, оскільки була отримана достовірна статистика оцінки шумових сигналів (параграфи 3.6 і 4.3 цієї роботи).

Розглянемо варіант випадкового процесу виникнення спектру акустичного сигналу максимальної амплітуди, при спрацюванні реле і зменшеному антимагнітному штифті, або зменшеному контактному тиску, на виході електронного перетворювача. У даному випадку, випадковий сигнал носить характер ймовірності в певному часовому інтервалі (рис.2.15).

Рис.2.15 Акустичний сигнал роботи реле на виході електронного перетворювача

При визначенні стану реле за амплітудами його шумового сигналу для даної реалізації випадкової величини знайдемо відповідний закон розподілу . Вважатимемо, що характер зміни величини визначається цілим рядом випадкових чинників. Будемо припускати, що випадкова величина підкорена нормальному закону розподілу в межах заданого періоду експлуатації [88]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.81)$$

Для узгодження гіпотетичної щільності розподілу випадкової величини (нормальний закон із статистичним розподілом) встановимо критерій Пірсона. Для цього необхідно скласти

статистичний ряд, де визначають σ ; σ . Визначають число ступенів свободи n . Значення m розраховують за даними отриманої максимальної амплітуди відповідного спектру шуму. В цьому випадку: σ , де σ – дисперсія, Δ – інтервали, n – кількість перевищень випадкової величини, p – імовірність [96,98]. За отриманими даними складають таблиці (табл. В.4, додаток В), строять відповідні графіки (рис.2.16) та використовують для діагностування роботи реле. Процедура визначення щільності розподілу шумових сигналів визначають для справного реле (рис.2.16, 1) та несправних – з більшим та меншим рівням шумів (рис.2.16, 2 і 3).

Рис.2.16 Щільності розподілу імовірності шумових сигналів:
1 - справного реле, 2, 3 - несправних реле

При цьому функції розподілу матиме вигляд:
(2.82)

Надійність схвалюваних рішень можна оцінювати по величині β . При цьому слід порівняти до β , тобто

де β - допустима надійність визначення еталонних характеристик реле.

- середнє значення (оцінка математичного очікування амплітуди шумового сигналу) реле, що перевіряється;

- середнє значення (оцінка математичного очікування амплітуди шумового сигналу) еталонного реле [96].

Використовуючи приведену модель розрахунків в акустичному каналі вимірювання процедуру відбракування ненадійних реле можна здійснювати автоматично за допомогою програмного комплексу по відношенню β .

2.5 Розробка математичної моделі підсистеми електромагнітного каналу вимірювання

Визначення електромагнітних зусиль під час роботи реле, їх співвідношення з розмірами повітряного зазора та комутацією контактів надає можливість визначення контактного тиску та автоматизувати процес.

Відомо, що форма магнітопроводу істотно впливає на розсіювання магнітного потоку [104].

Реальна магнітна система реле НМШ, порівняно з прийнятою моделлю, характеризується розсіюванням потоку по всьому контуру магнітного кола (рис. 2.17). Дослідження показують, що сталь магнітопроводу реле НМШ при намагніченні робочим струмом не насичується, оскільки індукція магнітопроводу не перевищує $B_{\text{нмш}}$. В результаті розсіювання магнітного потоку уздовж магнітопроводу незначне, в наслідок великої магнітної провідності феромагнетику, і залежить від магнітної провідності повітряного зазора (трубки) [21,104].

Удосконалюючи метод прийняте допущення, що розсіювання в магнітному колі відсутнє, при цьому вперше одержані розрахункові формули для знаходження тягового електромагнітного зусилля з використанням параметрів отриманих ВДК.

Розрахунки тягового зусилля в робочому зазорі реле виконані по формулі Максвела, в якій необхідні параметри знаходять за допомогою автоматизованого комплексу в динамічному режимі, в процесі спрацювання реле. Формула Максвела в цьому випадку має вигляд $F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$, де S - площа полюсного наконечника [19].

Рис.2.17 Схема магнітопроводу реле

По формулі Гопкінса магнітний потік визначається з урахуванням магнітних опорів ділянок

магнітопроводу, (рис.2.17):

$$, \quad (2.83)$$

де - МРС, створювана обмоткою НМШ, що намагнічує [104].

При розрахунках і дослідження магнітного потоку реле НМШ прийнято допущення, що магнітний потік не виходить за межі лінійної ділянки основної кривої намагнічення сталі.

Перевіримо правильність розрахункових характеристик реле НМШ при цьому використаний наступний алгоритм розрахунку. Визначаються магнітні опори 6-ти ділянок магнітопроводу (рис.2.17), по рівняннях (у яких магнітна проникність стали прийнята):

Загальний магнітний опір феромагнетика магнітопроводу складає . При цьому якір реле знаходиться під дією струму в обмотці і притиснутий до сердечника.

З першого рівняння, з урахуванням (2.83) для можемо записати, що проникність [21]

$$, \quad (2.84)$$

де - опір і МРС повітряного зазора, так як: .

Підставляючи в (2.84) вихідні параметри одержимо, що проникність

$$. \quad (2.85)$$

З (2.85) витікає, що МРС полюсного наконечника, при,

$$, \text{ а } .$$

Значення магнітних опорів наконечника і повітряного зазора реле НМШ ; , при цьому з одержаних рівнянь (2.84) і (2.85) магнітний потік, що протікає по повітряному зазору і наконечнику при ,

$$. \quad (2.86)$$

Одиничний потік – потік, що створює МРС і проникність, рівні одиниці . На будь-якій ділянці магнітопроводу, магнітний потік при проникності (2.85) визначається

$$. \quad (2.87)$$

З (2.86) і (2.87) витікає, що співвідношення потоків свідчить про те, що між магнітним потоком і магнітною проникністю існує лінійна залежність.

Доцільність знаходження одиничного потоку через параметри наконечника очевидна, оскільки на наконечнику МРС завжди дорівнює Одиничний магнітний потік забезпечує рівність магнітних проникнень на всіх ділянках магнітопроводу.

Магнітний потік реле НМШ рівний одиничному потоку, помноженому на величину магнітної проникності, тобто

Із залежності (2.86) витікає, що при МРС наконечника і повітряного зазора рівні між собою.

Знайдемо вираз для МРС ділянок магнітопроводу

Магнітний потік, що протікає по магнітопроводу реле НМШ при різних проникності [21]

$$, \quad (2.88)$$

Звідси витікає, що при будь-якій величині потоку МРС наконечника:

$$. \quad (2.89)$$

Рівняння (2.89) можна записати у вигляді [104]:

$$. \quad (2.90)$$

Перший співмножник (2.90) є магнітний опір наконечника, а другий – потік, що протікає по магнітопроводу при будь-яких значеннях проникності.

МРС на інших ділянках магнітопроводу з урахуванням магнітного опору і потоку (2.88)

$$A, ;$$

МРС на ярмі: ; МРС зуба ярма: .,

МРС на якорі: .

З розрахунків виходить, що при магнітної проникності рівній одиниці на феромагнітних ділянках магнітопроводу, для реле НМШ витрачена МРС:

$$. \quad (2.91)$$

По магнітопроводу реле типа НМШ, як відмічено в (2.87), протікає одиничний магнітний потік із зростанням потоку більше, ніж B_0 , вся додаткова МРС, прикладена до всього магнітопроводу, додається до повітряного зазора:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\text{доп}}, \quad (2.92)$$

Тоді МРС, прикладена до зазору (при $\Phi = \Phi_0$).

Це відбудеться у випадку, якщо потік досягне величини Φ_0 , що відповідає рівнянню для визначення магнітної проникності

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\text{доп}}, \quad (2.93)$$

Дано оцінку параметрів спрацьовування реле НМШ-2.900.

Відповідно до (2.91) при одиничному потоці Φ_0 .

МРС повітряного зазора визначена з урахуванням величини магнітного потоку утворює силу тяжіння якоря, рівну максимальній протидіючій силі з механічної характеристики (2.31).

Розрахунки проведемо по рівнянню Максвелла [21]. Зазор між якорем і наконечником прийнятий δ , тоді на повітряному зазорі виникає МРС

$$F_{\text{доп}} = \frac{B^2}{2\mu_0} S, \quad (2.94)$$

Максимальна протидіюча сила, згідно вимірюванням, прийнята 10 Н, тоді потік:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\text{доп}}, \quad (2.95)$$

МРС, створювана ампер-витками котушки реле НМШ. В цьому випадку струм в обмотці I . При опорі обмотки 900 Ом напруга джерела струму складе U .

Графоаналітичний метод оцінки тягових зусиль реле за допомогою датчиків первинної інформації, з результатами перевірки детально представлений у додатках Д і Ж.

Похибка розрахунків параметрів для реле типа НМШ відповідно до ТУ [8] не перевищує 6%, що дозволяє рахувати розглянутий метод прийнятим при відомих розмірах, довжинах і перетинах ділянок магнітопроводу.

2.6 Висновки по розділу 2

Відповідно до мети й завдань дослідження в розділі 2 отримано такі результати:

1. Побудована математична модель об'єкта діагностування шляхом розробки системи автоматизованих неконтактних методів контролю з автоматичною реєстрацією динамічних характеристик зміни фізичних величин у декількох паралельних каналах вимірювання.
2. Розроблена математична модель контактної системи реле, яка дозволяє автоматизувати отримання механічних характеристик та використовувати їх у системі з автоматизованими методами вимірювання для визначення механічних параметрів реле.
3. Побудована математична модель підсистеми оптичного каналу вимірювання механічних параметрів та реєстрації положення якоря шляхом побудови тіньової проекції повітряного зазора між якорем і полюсом реле з урахуванням форми коліматора випромінювача і оптичних спотворень вимірювального променя. Результати моделювання надають змогу співвідносити положення якоря із струмовою характеристикою та з роботою контактних груп реле, що забезпечує у системі із іншими автоматизованими методами вимірювання, визначення механічних параметрів без зняття кожуха реле.
4. Запропонована математична модель підсистеми акустичного каналу вимірювання, яка надає можливість автоматизувати процес діагностування реле, які підлягають ремонту.
5. Розроблена математична модель підсистеми електромагнітного каналу вимірювання, яка надає можливість оцінити контактні зусилля, автоматизувати процес визначення контактного тиску та, сумісно з вимірюваннями в паралельних каналах, усувати похибку його визначення. Використання декількох неконтактних методів вимірювання та визначення механічних параметрів реле декількома каналами надає можливість забезпечити високу точність, за рахунок усунення похибки результатів отриманих у різних каналах, забезпечує контроль визначення

параметрів та надає можливість автоматизування процесу діагностування.

Основні результати по даному розділу опубліковано в роботах [48,71,79,82,83,95,96,149].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ РЕЛЕ

Equation Section (Next)

Стан електромагнітних реле першого класу надійності визначається шляхом перевірки згідно із технологією електричних, часових і механічних параметрів на їх відповідність нормативам, із вихідним контролем та записом результатів у журналах перевірок [6-10]. Удосконалення технічної експлуатації під час перевірки пристроїв залізничної автоматики передбачає автоматизацію вимірювання параметрів із зменшенням кількості ручних операцій, підвищення рівня надійності й контролю та зменшення експлуатаційних витрат [18,25-27,39]. З цих позицій обґрунтуємо пропоновані способи автоматизованих вимірювань параметрів електромагнітних реле для їх сумісної роботи в системі автоматизованих вимірювань (рис.2.2).

Як вказувалося в розділі 1, автоматизоване вимірювання електричних параметрів не викликає труднощів та виконується відомими пристроями [62 - 65]. Запропоновані способи автоматизації електричних параметрів наведені в додатку Ж.

3.1 Вимірювання часових параметрів у електричному каналі

До групи часових параметрів реле входить час повного підйому якоря, час його відпускання і час брязкоту контактів. За існуючою технологією час повного підйому і відпускання вимірюються на універсальному стенді за допомогою електросекундоміра або за допомогою вимірювача часових параметрів реле цифрового Ф291 [107]. Основний недолік існуючого методу – низька точність вимірів, так, при перевірці, покази електросекундоміру фіксуються шляхом його відключення контактами випробуваного реле, таке вимірювання не є коректним, тому що, по-перше існує неодночасність замикання і розмикання контактів реле, а похибка окремої задіяної групи контактів не враховується у вимірах. По-друге не враховується час сумісного ходу (ковзання) контактів реле яке існує від моменту торкання контактів до зупинки якоря. Час брязкоту контакту легко сплутати з відсутністю контакту по причині забруднення контактних поверхонь або по причині відсутності контактного тиску. А час фіксації спрацювання реле за комутацією контактів може бути зареєстрований і при неповному ході якоря, що неприпустимо.

У комплексі вимірювання часових параметрів використовується програмний метод перетворення проекції поля яскравості повітряного зазора в цифровий код, а також реєстрація інтервалів замикання і розмикання контактів, час їх сумісного руху та брязкоту. Для вимірів використовується програмне забезпечення і сертифікований АЦП. Вимірний інтервал часу порівнюють з дискретним, що калібрується, відтворюючим одиницю часу. Це досягається заповненням вимірюваного інтервалу імпульсами з відомим періодом слідування, тобто перетворенням інтервалу в пропорційне йому число імпульсів, які підраховують програмним лічильником. Основні переваги методу – висока точність вимірів, безпосередній цифровий відлік, простота і можливість автоматизації технологічного процесу. Точність вимірів на декілька порядків перевищує можливості забезпечені існуючою технологією. Вимірювання продовжуються до повної зупинки якоря реле, що надає можливість одночасно оцінити характер всіх комутаційних процесів. Для вимірювання часових параметрів використовується динамічна характеристика струму, отримана за алгоритмом електричного каналу (рис. 3.1) та динамічна характеристика руху якоря реле, отримана за алгоритмом оптичного каналу вимірювання (рис. 3.4).

Після ініціалізації об'єктів і старту підпрограми відбувається вимірювання опору обмоток реле та визначення кількості контактних груп за числом нормальнозімкнених контактів, також відбувається вимірювання ізоляції елементів реле, шляхом вимірювання опору між двома

ізолюваними контактами реле, опір не може бути менше 200 МОм (блоки 1-6).

Рис. 3.1 Алгоритм роботи електричного каналу вимірювання

Дані про опір обмотки і кількість контактних груп записуються у реєстр оперативної інформації для порівняння їх з архівними даними і визначення типу реле.

Якщо визначення кількості контактів не було коректним, а вимірювання опору обмотки надало неприпустиму похибку, то перевірка зупиняється, дані про опір обмотки і кількість контактних груп передаються для збереження і вивід результату про невідомий тип реле або помилку вимірювання (блоки 18-22). Потім відбувається вибір набору прецизійних резисторів для визначення струму в обмотці реле, включення і відключення живлення та реєстрація кривої струму при її плавному наростанні та зниженні, для визначення струму спрацювання і відпускання якоря реле та визначення чистоти контактних поверхонь (блоки 7-12).

Для перевірки перехідного опору контактів на контакти реле подається напруга та підключаються резистори навантаження схеми контактів (рис. 3.2, блок 13-17, рис. А.7, А.8 додаток А), для створення струму 0,5 А. Включається та відключається живлення обмотки реле. Отримано дані струму записуються в реєстр, потім за законом Ома розраховується перехідний опір контактів. Після збереження даних (блок 18) відбувається їх порівняння з архівними даними, виведення результату на монітор, принтер та передавання для розрахунків в інші канали. Якщо збереження даних не відбулося алгоритмом передбачено повторення вимірювальних операцій (блок 19) для визначення типу реле (блок 3-6), якщо збереження даних було успішним, після виведення результатів, його робота зупиняється (блок 20-22), а попередні і отримано дані надалі використовуються для обчислень та прогнозування відмов у його роботі.

3.2 Визначення механічних параметрів з використанням оптичного методу вимірювання

Для автоматизації визначення механічних параметрів реле в різний час були запропоновані різні способи і пристрої [108-134]. Але до цих пір не створено автоматизованого стенду для вимірювання механічних параметрів реле залізничної автоматики без зняття захисного кожуха. Оптичне вимірювання ходу якоря, при автоматизації визначення параметрів реле, пов'язане з серйозними технічними труднощами, зокрема, з проблемою точного позиціонування зазора між якорем і полюсним наконечником напроти фотометричних датчиків. При цьому необхідно враховувати, що мінімальний вимірюваний зазор може бути зіставленим з довжиною оптичної хвилі випромінювача, що, за певних умов може привести до значних дифракційних спотворень оптичного сигналу [135].

Експерименти доказують оптичне спотворення геометричних розмірів повітряного зазора при їх фотометричному вимірюванні. Встановлено, що на вимірювання впливає не тільки дифракція на щілині, але і дисперсія вимірювального променя при проходженні прозорого кожуха реле із стінками з органічного скла різної товщини і оптичної щільності (рис. 3.2).

Рис. 3.2 Оптичне спотворення розмірів повітряного зазора

З погляду геометричної оптики дисперсія пояснюється як відмінність показників заломлення променів різного кольору, при цьому червоний колір має найменший показник заломлення, а фіолетовий максимальний (на відміну від заломлення аналогічних променів в результаті дифракції). Швидкість розповсюдження в склі хвиль, відповідних червоному кольору, максимальна [75]. Для спрощення автоматизації процесу і точного вимірювання оптичного сигналу, що пройшов через щілину (зазор) і прозорий кожух необхідно добитися усунення максимумів і мінімумів сигналу, а також забезпечити концентрацію променів в межах

фоточутливого елементу, тобто створити рівномірну інтенсивність сигналу вимірюваного поля яскравості.

На рис. 3.3 (а, б) представлені порівняні результати використання когерентного випромінювача (лазера) й інфрачервоної прямокутної матриці при реєстрації роботи реле. На рис. 3.3 б) немає спотворень контуру зазора, які на рис. 3.3 а) викликані явищем дифракції.

а)

б)

Рис. 3.3 Приклади реєстрації роботи реле НМШ, де в якості джерела випромінювання: а) когерентний випромінювач (лазер); б) інфрачервона матриця

Для реєстрації та вимірювання змінного сигналу яскравості найбільш швидкісним і економічним є метод із застосуванням одного фотоелемента з широкою фотоприймальною площею для формування проекції поля яскравості зазора. В якості коліматора (формувача паралельного пучка) доцільно застосовувати простий коліматор у вигляді прямокутного отвору. З цією метою в якості фотоприймача запропоновано фотодіод з діапазоном спектральної характеристики 470...1200 нм і діаметром фоточутливого елементу 10 мм. Для точного позиціонування повітряного зазора реле були запатентовані спосіб і пристрій (ВДК) [136,137]. Робота оптичного каналу вимірювання механічних і часових параметрів реле забезпечується за алгоритмом представленим на рис. 3.4.

Рис. 3.4 Алгоритм роботи оптичного каналу вимірювання

Після старту надається команда на переміщення скануючої платформи у початкове положення, для розташування блоку реле так, щоб якір і осердя виявилися за межами дії фотометричних датчиків. Це необхідно для калібрування фотометричних датчиків. Після калібрування платформа з блоком реле переміщується у зону просвічування до якорю реле, і після проходження тіні від якоря з мінімальним сигналом на фотоприймачі рухається в зону просвічування повітряного зазора до отримання максимального сигналу на фотоприймачі. Після цього включається і відключається живлення реле та реєструється рух якоря за динамічною зміною фотометричного сигналу. Результат аналізується на похибку та зберігається для зрівняння з архівними даними і даними з інших каналів для подальших розрахунків.

3.3 Індукційний метод вимірювання ходу якоря

Вимірювання магнітного потоку вздовж магнітного кола і в зазорі між якорем і полюсними наконечниками показали, що в зоні зазора спостерігається досить значне випинання магнітних силових ліній поля. Ця обставина послужила основою для розробки індукційного датчика, поміщеного поза кожухом реле в полі випинання (розсіювання) поблизу зазора якір-полюсний наконечник (рис. А.16, додаток А).

Випробування показали, за допомогою такого датчика можна отримати динамічну характеристику зміни електромагнітного поля навколо реле, для подальшого визначення індукції в сердечнику, тягового зусилля до якоря, вібрацію рухомої системи реле, приведену масу якоря для подальшого визначення механічних параметрів реле.

Відшукаємо індукцію в осерді реле. У момент подання напруги на обмотку реле, в інформаційній обмотці індукційного датчика наводиться електрорушійна сила [21]:

$$, \quad (3.1)$$

де - число витків вимірювальної обмотки і переріз осердя датчика;

- індукція потоку, що перетинає витки обмотки датчика, причому ця індукція пов'язана з

індукцією поля в зазорі через коефіцієнт випинання , підлягає експериментальному визначенню.

На рис. 3.5 представлені залежності: напруги (рис. 3.5 а), струму в обмотці реле (рис. 3.5 б), електрорушійної сили у зовнішньому (рис. 3.5 в) і внутрішньому (рис. 3.5 г) індукційному датчику та зміни фізичного зазора реле (рис. 3.5 д) від часу.

З графіків (рис. 3.5) легко отримати будь яке числове співвідношення представлених фізичних величин між собою, що надає можливість автоматизувати процес визначення параметрів реле. З рівняння (3.1) виходить, що індукція дорівнює інтегралу , звідки отримаємо:

$$(Тл), (3.2)$$

де t - час спрацьовування реле.

Встановлено, що магнітний потік біля основи реле більший потоку у фізичному зазорі, причому , де - опір магнітного кола; - потік розсіювання.

Рис. 3.5 Залежність електрорушійної сили наведеної в індукційних датчиках від струму в обмотці та величини фізичного зазора

Опір відшукується відомим шляхом. В зазорі між якорем і полюсним наконечником поміщається вимірювальна обмотка ~ 20 вит, підключається до мілівиберметра. При заданому зазорі включають струм в обмотку реле і зчитують показання мВб. Тоді , де I - струм в обмотці реле, - показання мВб.

Інтегрування функції (3.2) може бути здійснено числовим методом, наприклад, по формулі прямокутників [140,142].

$$, (3.3)$$

де $a < b$, n - число рівних інтервалів, на які розбитий інтервал $[a, b]$:

- точки ділення інтервалу; .

Інтеграл шуканої функції склав , а е.р.с. на відрізку :

Згідно (3.2) , тобто в осерді датчика індукція досягає величин

Отримують індукцію в зазорі , потім з урахуванням коефіцієнта " σ " знаходять індукцію в усіх ділянках магнітопроводу, що цікавлять нас, з перерізом . Дослідження показали, що переріз полюсного наконечника реле типу НМШ2-900 в 4 рази більший перерізу осердя.

Оцінка індукції в повітряному зазорі реле:

Рівняння електричного кола обмотки реле [21]:

$$. (3.4)$$

Для кола вимірювальної обмотки :

$$, (3.5)$$

де - опір вимірювальної обмотки.

- коефіцієнт розсіювання магнітного поля, що пронизує вимірювальну обмотку. Вважаємо, що струм , а магнітний опір кола реле

$$. (3.6)$$

Якщо вважати, що параметри магнітного кола: ; ; ; ; ; [1,104]. Тоді магнітний опір .

З урахуванням коефіцієнта розсіювання: . (визначено дослідним шляхом) для магнітного потоку .

Скористаємося формулою (3.6) для визначення індуктивності вимірювальної обмотки:

$$. (3.7)$$

Індуктивність реле при відпалому якорі: (якщо , то .

Аналогічно при притягнутому якорі: (а при).

В якості індукційного датчика можливе використання другої обмотки реле. Експерименти показали, що показники такого датчика дещо кращі, він чутливіший до магнітного потоку [48].

Це пояснюється вищим магнітним зв'язком обмоток, оскільки коефіцієнт k , де L – індуктивність однієї робочої обмотки реле, причому індуктивність L_1 – індуктивність іншої обмотки, використовуваної як інформаційна обмотка датчика.

Оскільки індуктивність однієї обмотки в 4 рази менше індуктивності реле, визначеної раніше, і складає L_1 , при відпущеному якорі F . Тоді коефіцієнт взаємоіндукції складе:

$$k = \frac{L_1}{L} \quad (3.8)$$

що більше в 1560 разів. З урахуванням коефіцієнта k для вимірювальної обмотки, що прилягає до основи реле, отримуємо L_1 . Магнітний опір при відпалому якорі і однієї обмотки в якості вимірювальної визначається як: R_m , а магнітна постійна Φ . Тоді електрорушійна сила, що наводиться в інформаційній обмотці такого індукційного датчика: перевищує електрорушійну силу в обмотці зовнішнього датчика в 150 разів.

Отримано вище аналітичні розрахунки використані при вдосконаленні конструкції датчиків, зокрема, при виборі геометрії зовнішнього індукційного датчика, числа витків і т. д. Зовнішній датчик необхідний для визначення параметрів повільнодійних реле, реле з однією робочою обмоткою та реле з низьким опором обмоток, парк цих реле в експлуатації досягає 40% [14].

Алгоритм роботи електромагнітного каналу вимірювання представлений на рис. 3.6. Після старту робота здійснюється паралельно з іншими каналами вимірювання та полягає у реєстрації наведеної електрорушійної сили у індукційному датчику.

Рис. 3.6 Алгоритм роботи електромагнітного каналу вимірювання

Після збереження даних надається команда на зупинку команд управління реле, якщо збереження не відбулося цикл роботи повторюється до збереження (блок 3-6), після збереження і зупинки проводиться аналіз даних електромагнітного каналу у порівнянні з даними з архіву та видається результат для обчислень сумісно з даними інших каналів та для архіву.

3.4 Акустичний метод діагностування електромагнітного реле

Одним з основних елементів акустичного каналу вимірювання є мікрофон або система з мікрофонів. Мікрофони характеризуються рядом параметрів, основні з яких приведені в [143]. Для прийому акустичних сигналів можуть застосовуватися і контактні п'єзоперетворювачі [144]. Але вони мають ряд недоліків, пов'язаних з обов'язковим контактом з твердим тілом. Тому якості первинного перетворювача – мікрофону оптимальним за простотою, якістю сигналу та вартістю буде застосування конденсаторного мікрофону. До мікрофону підключаються вторинні перетворювачі – АЦП і комп'ютер для управління, обробки і запису сигналів, які застосовуються у комплексі [145,146].

Розглянемо один з варіантів діагностування релейної апаратури залізничної автоматики з використанням методу шумового діагностування (ідентифікація шумових сигналів на основі використання моментів щільності розподілу імовірності випадкових шумових сигналів).

Рис. 3.7 Амплітуди шумових сигналів при спрацюванні реле для різної висоті антимагнітного штифта

На рис. 3.7 представлені акустичні шумові «портрети» механічних переміщень, що відбуваються під час включення, при однаковій напрузі всередині справного блоку реле типу НМШ 2-900 (рис. 3.7 в), при зносі антимагнітного штифта (рис. 3.7 а, б) та при штучно збільшеному антимагнітному штифті (рис. 3.7 г) [96,146].

На діаграмі (рис. 3.7 а, б) видно, що амплітуда акустичних коливань при спрацюванні реле більша. Це обумовлено великим вільним ходом і прискоренням якоря перед ударом зменшеного

антимагнітного штифта об полюсний наконечник. Час до максимуму цієї амплітуди від початку включення, також більший. Це обумовлено більшою відстанню яку проходить якір до удару зменшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник.

На діаграмі (рис. 3.7 в) видно, що амплітуда акустичних коливань при спрацьовуванні реле менша (величина а). Це обумовлено зменшеним вільним ходом і меншим прискоренням якоря перед ударом збільшеного антимагнітного штифта об полюсний наконечник. Час до максимуму цієї амплітуди від початку включення, менший (величина в). Це обумовлено меншою відстанню яку проходить якір до удару збільшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник. Акустичні діаграми роботи реле доповнюють інформацію для визначення характеру несправності реле, отриману при вимірюванні струму і фізичного зазора працюючого реле. Відповідно із моделлю акустичних вимірювань (параграф 2.4) з шумових сигналів реле практично одержані статистичні розподіли амплітуд його різних станів. Отже, шукана імовірність при приблизно рівна 0,93. Ця імовірність не є малою, тому гіпотезу про нормальний закон розподілу випадкових шумових сигналів можна вважати правдоподібною. Щільності розподілу шумових сигналів, одержаних на виході програмного вимірювального комплексу при дослідженні реле типа НМШ2-900, представлені на рис. 3.8. У табл. В.4 приведені значення амплітуд шумових сигналів справного, та несправних реле. Аналогічна процедура визначення щільності розподілу шумових сигналів була проведена для справного реле (рис. 3.8, 1) і несправного, збільшеного (забрудненого) антимагнітного штифту (рис. 3.8, 3) [96].

Рис. 3.8 Щільності розподілу імовірності шумових сигналів: 1 - справного реле, 2, 3 - несправних реле

Амплітуди шумового сигналу при зменшеному антимагнітному штифті, або зменшеному контактному тиску реле, значно більші амплітуд відповідного сигналу нормального реле. Цю обставину можна використовувати для відбору реле для подальшого ремонту і регулювання. Прийняття рішення про справність реле в цьому випадку може бути здійснене по рівнянню середніх значень амплітуд шумових сигналів справного і не справного реле [96,146]. Алгоритм роботи акустичного каналу представлений на рис. 3.9.

Рис. 3.9 Алгоритм роботи акустичного каналу вимірювання

Після старту відбувається калібрування кіл каналу та присвоєння початкових значень акустичного сигналу за вимірами еталонних сигналів генератору калібрування. Після калібрування здійснюється включення і відключення номінального живлення на обмотку реле реєстрація акустичних шумів, які виникають при цьому та збереження даних. Якщо збереження даних відбулося успішно надається команда на зупинку управління, якщо – ні, то цикл вимірів повторюється з включенням реле (блок 6-10). Після зупинки відбувається аналіз даних з архіву та інших каналів та видаються результати для обчислення і збереження.

3.5 Визначення моменту зрушення якоря та контактного тиску

Знання моменту зрушення якоря нормально діючого реле дозволяє автоматизувати задачу діагностичного контролю реле в цілому, у тому числі і при визначенні контактного тиску [59]. На рис. 3.10 приведена осцилограма ходу якоря (при збільшенні сигналу оптичного датчика у разів) у сукупності із напругою і струмом обмотки реле, та наведеної електрорушійної сили у зовнішньому і внутрішньому індукційному датчику.

Рис. 3.10 Реєстрація точки початку руху якоря реле

Після включення струму якір в точці "А" почав рух зі швидкістю V_1 і потім (у точці "Б") продовжив рух з більшою швидкістю V_2 (з деякою затримкою) до моменту початку перекидання (точка "В"). Виявилось, що на часовій відстані між точками А-Б вибирається люфт між якорем і призмою (скобою), який, згідно ТУ, не має бути меншим 0,03 мм (30 мкМ) [7]. Зараз цей люфт (зазор) перевіряється ремонтником виключно "на око", тобто використовується навичка - досвід.

Наявність люфту важлива для виключення заклинювання якоря, максимальне значення цього параметра не повинне перевищувати 150 мкМ [17]. Точність вимірювання (яка впливає з осцилограм) дуже висока, складає 1-3 мікрони.

Залежність (рис. 3.10) дозволяє визначити значення $t_{\text{зр}}$, де t - масштаби по осі часу і i , а потім величину відрізка часу, який заключний між згаданими точками, тобто, визначити дуже важливий параметр для діагнозу реле - час зрушення по співвідношенню:

$$t_{\text{зр}} = \frac{t_{\text{зр}}}{i} \quad (3.9)$$

де параметр $t_{\text{зр}}$ - легко визначається по розмиканню тилового контакту;

- заданий параметр для кожного типу реле (записаний в банку даних при перевірці параметрів реле у лабораторії).

Визначення моменту зрушення якоря за допомогою оптичного датчика сумісно із кривою струму у обмотки реле, використовується у розробленому методі автоматизованого визначення контактного тиску для усунення похибки вимірювання, та ґрунтується на особливостях конструкції електромагнітних реле залізничної автоматики типів НМШ і РЕЛ, в яких надійне відпадання якоря здійснюється не під дією поворотної пружини, а під дією власної ваги якоря, значення якого відоме.

Рис. 3.11 Конструкція контактної системи реле НМШ

Початковими даними для визначення контактного тиску є параметри елементів конструкції реле НМШ (рис. 3.11):

вага якоря G , співвідношення плечей якоря і контактної пружини L_1/L_2 , конструкція контактної системи, а також інші параметри, які визначаються за допомогою вимірювального діагностичного комплексу [147];

залежність зазора між якорем і сердечником від часу $t_{\text{зр}}$ під час включення реле, дозволяє визначити моменти зрушення і зупинки якоря, а також сумісний хід кожної контактної групи;

залежність струму в обмотці реле від часу $t_{\text{зр}}$ при включенні реле;

моменти розмикання тильових контактів і замикання фронтальних контактів при включенні реле ($t_{\text{зр}}^i$ - де i - номер контакту).

Всі дані оцифровуються за допомогою АЦП і записуються в пам'ять комп'ютера для подальшої математичної обробки за допомогою програмного забезпечення, реалізованого на мові високого рівня C++.

Початкові дані $t_{\text{зр}}^i$, представлені дискретними значеннями, тому для визначення значень функцій між вузловими точками необхідно провести інтерполяцію.

Оскільки частота дискретизації вимірювального комплексу дозволяє одержати декілька тисяч точок за час включення реле, то можна для інтерполяції використовувати просту одновимірну лінійну апроксимацію.

На рис. 3.12 представлені залежності $t_{\text{зр}}^i$, одержані з використанням інтерполяційної формули Ньютона [148].

Рис. 3.12 Початкові дані

Для визначення прискорення якоря під час включення реле необхідно обчислити другу похідну від функції $x(t)$. Але дана залежність представлена у вигляді кусково-лінійної апроксимації має розриви у вузлових точках.

Тому початкова залежність $x(t)$ на ділянці руху якоря замінюється гладкою функцією за допомогою поліноміальної регресії четвертого ступеня. При такому коефіцієнті поліноміальної регресії функції $x(t)$ і $\ddot{x}(t)$ мають мінімальну розбіжність (рис. 3.13).

Значення функції $\ddot{x}(t)$ необхідні тільки до моменту замикання останнього фронтового контакту, тому дану функцію можна не продовжувати до моменту зупинки якоря, що підвищує точність збігу функцій $x(t)$ і $\ddot{x}(t)$.

Рис. 3.13 Залежності $x(t)$ і $\ddot{x}(t)$

Обчислення другої похідної функції здійснюється за допомогою ітераційного методу Ріддера [148]. На рис. 3.14 представлений графік одержаної залежності прискорення якоря від часу при включенні реле.

Рис. 3.14 Прискорення якоря під час включення реле

Визначення сумісного ходу тилових L_{Tn} і фронтових контактів L_{Fn} здійснюється шляхом зіставлення залежності руху якоря під час включення реле і відповідних моментів розмикання тилових і замикання фронтових контактів:

$$x(t) = x_0 + \frac{1}{2} a t^2 \quad (3.10)$$

де n – номер контактної групи, x_0 – максимальна відстань між якорем і сердечником, a – залишковий зазор між якорем і сердечником.

Визначення електромагнітної сили тяжіння якоря здійснюється за допомогою загального виразу

$$F = \frac{1}{2} \frac{d\Phi^2}{dx} \quad (3.11)$$

де μ_0 – магнітна проникність повітряного зазора, N – кількість витків в обмотці реле, S – площа полюса сердечника реле, x – залежність від часу зазора між якорем і сердечником при включенні реле і русі якоря [21].

Формула (3.11) забезпечує достатньо хороші збіги розрахункових даних з експериментальними, причому струмовий режим обмотки встановлений при перевищенні порогу спрацьовування на 10...15%, при якому сталь магнітопроводу ненасичена. Контактний тиск в реле НМШ і РЕЛ створюється попереднім натисненням регулювальних пластин на фронтові і тилові контакти і силою реакції сумісного ходу контактних пружин :

$$F_{\text{спр}} = k_{\text{спр}} \cdot x \quad (3.12)$$

де $k_{\text{спр}}$ – жорсткість контактних пружин, x – прихований хід контакту, який він би пройшов, якби не спирався на регулювальну пластину, $x_{\text{фр}}$ – сумісний хід фронтового (тилового) і загального контактів.

В додатку Ж запропонований графоаналітичний метод визначення контактного тиску, який сумісно із запропонованими нижче у даному розділі рівняннями знижує похибку такого визначення (аналогічно до (2.62) [87,90]).

В електромагнітному реле залізничної автоматики типа НМШ тилові контакти розташовані в два ряди, між якими відсутній жорсткий зв'язок, до того ж кожен тиловий контакт має свою регулювальну пластину. Тиск тилових контактів в реле НМШ, як зазначено вище, створюється двома складовими: $F_{\text{спр}}$ і $F_{\text{пр}}$. Значення прихованого ходу контактів не піддається вимірюванню непрямым методом. Для визначення прихованих ходів контактів необхідно вирішити дві

системи з n -рівнянь, одержані на підставі виразу (2.34), де n - кількість контактів в даному реле. Система рівнянь для реле НМШ1 з вісьма групами контактів матиме вигляд (3.13) і (3.14):

- для тилових контактів
(3.13)

- для фронтових контактів
(3.14)

де T_i , F_i – це моменти часу у порядку розмикання тилових і замикаання фронтових контактів при включенні реле, k , k_1 , k_2 - жорсткість пружин, відповідно тилових, загальних і фронтових контактів, α , β - сумісний хід тилових і фронтових контактів, γ – прихований хід тилових і фронтових контактів.

Або в узагальненому вигляді:

- для тилових контактів:
(3.15)

- для фронтових контактів
(3.16)

Рішенням систем рівнянь (3.15) і (3.16) визначається прихований хід кожного контакту реле, і, отже, визначається попереднє натиснення контактів реле, яке надає можливість рішення рівняння (2.26) і (2.27) відносно x та усунути похибку визначення, порівнюючи результат отриманий з (3.12)-(3.16) (аналогічно розглянутому в параграфі 2.3 вираз (2.62)) [87,90]. У реле залізничної автоматики типа РЕЛ всі тилові контакти розташовані в один ряд і для них відсутні регулювальні пластини, разом з тим регулювання тиску тилових контактів здійснюється установкою попереднього натиснення пружин, що дозволяє визначати тиск також, за допомогою систем (3.15) і (3.16).

Узагальнені результати експериментальних вимірювань контактного тиску грамометром годинного типу і результати обчислень контактного тиску запропонованим методом для реле НМШ детально розглянуто у порівняльному аналізі наданому у розділі 4. табл. 4.4. Оскільки вимірювання контактного тиску грамометром годинного типу дає достатньо велику похибку, то для отримання достовірніших результатів вимірювання для кожного контакту проводилося разів, після чого обчислювалося середнє значення. Для отримання розрахункових даних використовувався експериментальний зразок автоматизованого вимірювального комплексу для перевірки параметрів реле залізничної автоматики.

Адекватність вказаних характеристик була перевірена за допомогою критерію Вілкоксона [87] на рівні значимості 5 %. Аналіз показав, що немає підстав відкинути нульову гіпотезу на 5 % рівні значимості, додаток (Ж.5).

Запропонований метод дозволяє успішно розв'язати проблему автоматизації визначення контактного тиску для нормальнодійних реле залізничної автоматики типів НМШ і РЕЛ. До достоїнств методу можна віднести підвищення точності одержуваних результатів, а також зменшення часу на вимірювання контактного тиску, за рахунок того, що відпадає необхідність проводити вимірювання для кожного контакту окремо і знімати кожух реле [149].

Метод автоматизованого визначення контактного тиску, розглянутий в даному параграфі, не підходить для повільнодійних і реле з короткозамкнутим витком на однієї обмотці у вигляді мідної гільзи, парк яких складає близько 20 % всіх реле залізничної автоматики які знаходяться в експлуатації, для цих реле використовується графоаналітичний метод запропонований у

додатку Ж та рівняння (2.26) і (2.27), вирішені відносно для усунення похибки вимірювання, при цьому значення фізичного зазора – отримують безпосередньо з оптичного каналу вимірювання.

3.6 Метод автоматизованого діагностування контактної системи шляхом оцінки якості поверхонь ковзання

Для визначення чистоти контактних поверхонь був запропонований спосіб визначення сил тертя у рухомій системі реле [46,50].

Відомо, що для визначення тягової сили у момент початку руху якоря електромагнітного реле важливо знати величину сил тертя, що утримують систему в початковому положенні після подачі струму в обмотку реле.

Рівняння руху рухомої системи реле:

$$m_1 \ddot{x} = F_0 - F_{\text{пр}} - F_{\text{тр}} \quad (3.17)$$

де m_1 – приведена маса рухомих частин реле; $\ddot{x}$ – прискорення якоря; F_0 – питома сила опору руху якоря і рухомих частин реле; $F_{\text{пр}}$ – приведена жорсткість контактних і поворотних пружин; $F_{\text{тр}}$ – початкове значення електромагнітної протидіючої сили; $F_{\text{тяг}}$ – сила тяжіння діюча на якорь [21].

Для наближеного вирішення цього нелінійного рівняння користуються графоаналітичним методом послідовних наближень. При цьому, як правило, нехтують початковою протидіючою силою (F_0) і питомаю силою опору руху [21]. Питому силу опору руху слід враховувати в розрахунках, оскільки за її величиною при функціональному контролі можна оцінити стан рухомої системи реле, у тому числі і контактних поверхонь елементів, що труться.

Проте скрутно існуючими технічними засобами визначити відносно малу початкову величину, механічній реакції якоря на струм в обмотці реле у момент зрушення якоря. Аналіз (3.17) показує, що реакція якоря на струм в обмотці обумовлена як електромагнітними (струм, напруга, потоки) так і механічними параметрами реле. Перед моментом зрушення швидкість руху якоря нульова, отже початковим значенням протидіючої сили (протидіючої електрорушійної сили) можна нехтувати.

До моменту зрушення якоря питома сила опору руху обумовлена наявністю на поверхні рухомих зв'язаних елементів сил зчеплення (якоря, контактів, регулювальних пружин та ін.), за рахунок тертя першого роду (тертя ковзання), яке в початковий момент максимально і є тертям спокою. Ця величина залежить від якості обробки поверхонь деталей, що труться, і від сили їх стискування (нормальній реакції) [21]:

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} F_{\text{нр}} \quad (3.18)$$

де $k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя при ковзанні; $F_{\text{нр}}$ – величина нормальній реакції (сили стискування).

Сила тертя спокою дорівнює модулю і спрямована проти зовнішньої сили, що викликає ковзання однієї деталі по іншій.

Відомо, що коефіцієнт тертя ковзання не є постійною величиною (як у спокої), він залежить від властивостей і стану поверхонь деталей.

Таким чином, стан поверхонь взаємодіючих деталей характеризується коефіцієнтом тертя при ковзанні $k_{\text{тр}}$, у тому числі контактів реле, який значною мірою визначає величину сили тертя в рухомій системі.

З початком руху системи коефіцієнт тертя спокою переходить в коефіцієнт тертя ковзання, який дещо менше коефіцієнта тертя спокою і визначається виразом (3.18). Для оцінки коефіцієнта тертя ковзання запропонований метод вимірювання тягового зусилля з використанням механічного резонансу рухомої системи реле.

Суть методу полягає в тому, що система виводиться із стану рівноваги (спокою) шляхом використання властивості механічного резонансу рухомої системи реле. Це дозволяє автоматичними засобами визначити момент зрушення і зупинки якоря, а також відповідні їм

струм і силу тертя.

Якщо вирішувати цю задачу традиційним способом - шляхом вимірювання напруги на обмотці реле при зрушенні якоря, то необхідно разом з силами тертя спокою додатково визначати момент інерції якоря. Останній можна визначити експериментальним шляхом, якщо розташувати якор на ножовій опорі так, щоб він гойдався як фізичний маятник.

Частота коливань такого маятника:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{J}} \quad (3.19)$$

Звідси момент інерції якоря :

$$J = \frac{M}{4\pi^2 f^2} \quad (3.20)$$

де m - інертна маса якоря; l - відстань від центру тяжіння якоря до осі обертання; g - прискорення сили тяжіння; n - число коливання якоря в секунду [21,50].

При рішенні задачі з використанням механічного резонансу рухомої системи, шляхом розгойдування її імпульсами струму, моментом інерції якоря можна нехтувати, оскільки через кожних півперіоду власних коливань знак моменту змінюється на протилежний, при незмінному його модулі. В результаті цього уся енергія, що подається в систему, витрачатиметься на подолання сил тертя першого роду (ковзання).

Рис. 3.15 Осцилограма для визначення власних коливань рухомої системи реле за вібрацією якоря

Визначення частоти власних коливань реле з рішення рівнянь (3.17)–(3.19) складно, по тій причині, що складно знайти істинні значення механічних параметрів (сили тертя якоря, контактів, пружності контактних пружин та ін.) тим більше, що значення деяких з них випадкові, тому запропоновано вирішити це завдання експериментальним шляхом, використовуючи осцилограми вібрації якоря при відключенні струму в обмотці реле (рис. 3.15), де період вібрації якоря.

Рис. 3.16 Коливання якоря реле при поданні в обмотку імпульсів напруги (струму), що зменшуються по амплітуді, з частотою власних коливань рухомої системи

На рис. 3.16 пояснюється метод діагностування рухомої системи реле. Імпульси напруги (струму) резонансної частоти подають в знеструмлену обмотку реле (рис. 3.16 а), що виводить рухому систему реле із стану спокою. Потім, плавно зменшуючи амплітуду імпульсів, визначають значення струму в обмотці, при якому відбувається повне згасання механічних коливань в системі (рис. 3.16 б). За початком і закінченням коливань якоря здійснюється стеження за допомогою оптичного каналу [46]. Визначаючи різницю в значенні сили струму, отриманої розглянутим методом і сили струму, отриманої при традиційному вимірі можна з достатньою мірою точності визначити величину сили тертя рухомої системи реле.

У загальному вигляді сила тяжіння (тяга) якоря електромагніту виражається формулою (3.17). До моменту зупинки рухомої системи реле виражає величину сили тертя руху з урахуванням стану поверхонь тилкових контактних груп. Струм, при якому рухома система зупиняється визначається за допомогою запропонованого методу і відрізняється від струму до моменту зрушення якоря (рис. 3.16).

В цьому випадку, до моменту зрушення якоря і зупинки реле отримуємо дві сили опору [21], які залежать від i і i_0 , тоді остаточно отримаємо:

$$F = F_0 + F_1 \quad (3.21)$$

Для визначення стану поверхонь фронтових контактних груп, запропоновано збільшити амплітуду резонансних імпульсів струму до величини, при якій станеться зіткнення рухомих і фронтових контактів. При цьому повного притягання якоря не допускають. В цьому випадку,

коливання рухомої системи відбуваються з урахуванням тертя у фронтових контактних групах. Тоді, сила тяжіння якоря у момент руху описується відомою формулою:

$$, \quad (3.22)$$

де σ - загальна магнітна провідність фізичного зазора; δ - величина фізичного зазора [19].

При цьому імпульсний струм в обмотці може характеризувати номінальну величину I_n , при якій резонансні коливання відбуваються з урахуванням тертя у фронтових контактних групах. Тоді амплітуда зміни фізичного зазора, при номінальному струмі резонансних коливань характеризуватиме $\Delta\delta$, вже з урахуванням тертя у фронтових контактних групах $\Delta\delta_n$, яка буде отримана з (3.22) шляхом підстановки значення I_n .

Дослідження показують, що зміна сил тертя в рухомій системі в діапазоні 14-20 Гс більшою мірою пов'язана із зміною якості поверхні контактних груп, чим із зміною якості поверхонь, що труться, в інших місцях цієї рухомої системи (робоча тяга, ярмо, регулювальні пружини і так далі).

Дослідженнями встановлено, що інформативним методом визначення чистоти поверхні окремих контактних груп є вимір зміни перехідного опору контактів під час їх сумісного руху (ковзання) за чотирьохпровідною схемою (рис. Ж.), при малих струмах за допомогою АЦП. Ці дослідження показують, що при вимірюванні опору контактів під час їх сумісного руху, кола провідності на поверхні ковзання створюються і розриваються в залежності від чистоти контактів, чим чистіше контакт тим більша кількість точок провідності виникає і триваліше існує (рис. Е.1, Додаток Е). Це підтверджує теорію залежності стабільності контакту від чистоти контактних поверхонь [21].

Збільшення опору чистих металевих контактів унаслідок викривлення і стягування ліній струму до провідної плями називається опором стягування. Опір стягування контакту виражається формулою:

$$, \quad (3.23)$$

де ρ - питомий опір матеріалу контактів; r — радіус провідної контактної площі (плями, в см, або еквівалентний радіус сумарної площі декількох контактних плям) [19].

У разі коли обидва контакти однієї контактної пари виготовлені з різних матеріалів,

$$, \quad (3.24)$$

де ρ_1 і ρ_2 — питомі опори матеріалів обох контактів пари. При замиканні контактів спостерігається як пружна, так і пластична деформація матеріалу в контактних площах (плямах) [21].

У разі багатоточкового контакту, перехідний опір є паралельним з'єднанням опорів стягування кожної контактної плями які утворюються не тільки у місці комутації але і у роз'ємах та у місці приєднання вимірювача. Тому для точнішого вимірювання опору стягування комутаційних контактів важливим є забезпечення надійного контакту у інших вищеперелічених місцях.

Вважаючи середнє питома натиснення на контактному майданчику рівним контактній твердості матеріалу, можна написати [21]:

$$, \quad (3.25)$$

де σ — контактне натиснення, H — контактна твердість матеріалу, яка приблизно в три рази більше натиснення, відповідного початку пластичної деформації (величина контактної твердості мало відрізняється від твердості по Бринеллю і Віккерсу) [150]. Для срібних контактів: $H_{Ag} = 150$ [154].

З урахуванням радіусу провідної контактної площі для контактів з різних матеріалів контактне натиснення можна записати [21]:

$$. \quad (3.26)$$

Формула (3.26) можна використовувати для автоматизації процесу вимірювання контактного тиску сумісно з методами запропонованими у параграфах 3.7 і додатку Ж для усунення похибки вимірювання. Нестабільність отриманих результатів вимірювання перехідного опору контактів може бути наслідком їх забруднення яке необхідно діагностувати.

Якщо плавно збільшувати напругу на контактах, то при деякій величині напруги опір півки

раптом зникає (плівка як би пробивається), тобто має місце явище фрітингу (початкової стадії пробою) плівки. При падінні напруги на контактах до величини 0,35—1,1В (відповідної напрузі плавлення матеріалу хоча б одного з контактів), має місце А-фрітинг. В цьому випадку матеріал контакту плавиться і втягується електростатичними силами в канал пробою плівки, утворюючи провідний перехийок (місток) між контактами [155]. Якщо при фрітинзі плівок потужність джерела струму мала і падіння напруги на контактах недостатньо для розплавлення матеріалу одного або обох контактів (0,1—0,35В), то має місце В-фрітинг. В цьому випадку органічна плівка в точці пробою обвуглюється (утворюються частинки вуглецю) і її опір знижується на декілька порядків (до сотень тисяч омів).

В-фрітинг запропоновано використовувати для визначення чистоти контактних поверхонь від вуглецевих забруднень у числовій формі [50].

Для ілюстрації методу визначення величини забруднення контактів для декількох контактних пар було зроблено по декілька вимірювань перехідного опору під час їх сумісного ковзання. На рис. Е.1 а), б) додатку Е представлено по 3 вимірювання для двох контактних пар 21-22 (рис. Е.1 а) і 41-42 (рис. Е.1 б). Контактна пара 21-22 (рис. Е.1 а) має більш стабільний показник контакту під час ковзання. Важливою перевагою є можливість автоматизації процесу діагностування контактних груп.

3.7 Висновки по розділу 3

Новий метод автоматизованого вимірювання параметрів реле залізничної автоматики розробляється шляхом створення багатоканальної системи з автоматизованими методами вимірювання, алгоритмами їх сумісної роботи, що надає можливість автоматизувати процес вимірювання параметрів реле, не розбираючи його корпус, з найменшим впливом ручних операцій на результати діагностування реле. При цьому отримано наступні результати:

1. Розроблена автоматизована система вимірювання параметрів реле на базі багатоканального сертифікованого АЦП зі своїм інтерфейсом і програмним забезпеченням, що надає можливість забезпечити метрологічний контроль ВДК, створеного з використанням стандартного приладу.
2. Удосконалено вимірювання перехідного опору контактів шляхом використання методу генератора стабільного струму, при цьому перехідний опір контактів, перетворений у цифровий код, запропоновано застосовувати для автоматичного діагностування реле, використовуючи залежності перехідного опору від контактного тиску, що забезпечує автоматизацію визначення чистоти і стану контактних поверхонь.
3. Удосконалена автоматизація вимірів струму під час роботи реле шляхом підведення стабілізованої напруги до котушок реле, при цьому струм в обмотці, як і інші параметри, за допомогою АЦП перетворюється в цифровий код, що дозволяє автоматизувати вимірювання декілька електричних параметрів в паралельних каналах АЦП.
4. Автоматизовано вимірювання часових параметрів (час підйому, відпадання якоря, брязкіт контактів), яке забезпечується в електричному каналі ВДК за особистим алгоритмом. Вимірний інтервал часу порівнюється з дискретним, що калібрується в АЦП. Шкала часу, комутація контактів, хід якоря та інше відтворюються інтерфейсом програмного АЦП на моніторі та зберігаються у числовому вигляді, що надає можливість автоматизувати збереження не тільки результатів, але і всього процесу діагностування.
5. Розроблено вимірювання механічних параметрів реле з використанням оптичного методу визначення положення якоря, що надає можливість автоматизації процесу, не розбираючи корпус реле. Під час дослідження оптичного методу визначення положення якоря були усунути впливи на точність вимірів таких явищ, як дифракція, дисперсія і інтерференція світла вимірювального променя, за рахунок вибору хвильового діапазону, конструкції, принципу реєстрації і розрахунку. Розроблено алгоритм роботи каналу, управління платформою з блоком

реле, яка сканує між оптичними датчиками.

6. Запропоновано використання індукційного датчика в електромагнітному каналі вимірювання, що надає можливість подальшого визначення індукції в сердечнику, тягового зусилля якоря, вібрацію рухомої системи реле, приведену масу якоря під час визначення механічних параметрів реле. Розроблено алгоритм роботи каналу в системі з іншими каналами вимірювання.

7. Розроблено метод акустичного діагностування роботи реле, шляхом дослідження закону розподілу випадкових акустичних шумів при його роботі, що сумісно з іншими методами діагностування підвищує достовірність прийняття рішення про стан реле.

8. Удосконалено метод визначення моменту зрушення якоря та контактного тиску, шляхом використання оптичного методу реєстрації положення якоря, струму в обмотки і часу комутації контактів. При цьому складено системи рівнянь, для визначення прихованих ходів контактів, що надає можливість автоматизації процесу визначення контактного тиску без зняття кожуха реле.

9. Запропоновано метод визначення чистоти контактних поверхонь шляхом реєстрації динаміки зміни перехідного опору контактів під час їх сумісного руху, використовуючи резонансні властивості рухомої системи та явище В-фрітінгу.

Основні результати по даному розділу опубліковано в роботах [46,48,50,96,136,137,146,147,149].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПЕРЕВІРКИ РЕЛЕ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

Equation Section (Next)

4.1 Робота структурних вузлів і блоків у каналах ВДК

Перевірка реле залізничної автоматики за допомогою автоматизованого ВДК спрямована на удосконалення технічного обслуговування, скорочення часу, витрат та гарантування надійної роботи реле до чергової перевірки.

ВДК розроблений для перевірки реле залізничної автоматики без зняття захисного кожуха в лабораторних і виробничих умовах та повинен забезпечувати: ідентифікації блоку реле; автоматизоване тестування реле при входному і вихідному контролі по 32 цифровим каналам; реєстрацію і обчислення електричних і механічних параметрів відповідно до технологічної документації; збереження та видачі результатів тестування на монітор і друк, у тому числі в графічному і цифровому виді по кожному параметру; економії до 80% робочого часу електромеханіка [37-39].

Склад і структурна схема ВДК представлена на рис.4.1 (рис. А.1, додаток А) і може перебудовуватися на вимогу замовника. ВДК пропонується зробити автоматизованим робочим місцем електромеханіка, яке реєструє динамічні характеристики реле одночасно по чотирьох інформаційно-вимірних каналах: електричному, електромагнітному, акустичному і оптичному без зняття захисного кожуха реле. Пристрій підключається до комп'ютера через USB порт і дозволяє одночасно оцифровувати аналогові сигнали 32 каналів з частотою дискретизації 5 кГц по кожному каналу, а також забезпечує автоматичне управління роботою реле через відповідні блоки узгодження і управління [40,41].

Рис.4.1 Структурна схема вимірних діагностичного комплексу на основі АЦП

Динамічні характеристики роботи реле знімаються за допомогою аналогових датчиків, встановлених разом з блоком реле на платформі в спеціальній камері (на рис.4.1 камеру показано штриховою лінією), перетворюються в цифровий код за допомогою АЦП і передаються в комп'ютер для подальшого аналізу. Після цього здійснюється обробка отриманих даних і порівняння результатів із допусками. Структура та алгоритм сумісної роботи вимірних каналів представлені на рис.2.1, рис.2.2, рис.4.1, рис.4.7 та детально описаний у параграфі 2.1. Після перевірки результати усіх вимірів виводяться на монітор, зберігаються в базі даних і роздруковуються для документації [43].

Електромагнітний канал вимірювання призначений для реєстрації електромагнітної індукції. Канал складається з одного або двох індукційних датчиків і операційного підсилювача сигналу (рис.4.2).

Рис.4.2 Схема побудови електромагнітного каналу вимірювання, де в якості датчика сигналу: 1 – зовнішня котушка 2 – друга робоча обмотка

Алгоритм роботи електромагнітного каналу вимірювання представлений на рис. 3.6 та описаний у параграфі 3.5.

Оптичний канал вимірювання призначений для отримання механічної характеристики зміни повітряного зазора між якорем і осердям за час тяжіння або відпадання якоря реле, а також для вимірювання висоти антимагнітного штифта. Оптичний канал складається з оптичного випромінювача із стабілізатором напруги, фотоприймача з електричним підсилювачем сигналу і скануючої платформи з блоком реле (рис.4.3).

Рис.4.3 Схема побудови оптичного каналу вимірювання, 1 – випромінювач, 2 – фотоприймач, 3 – якір, 4 – осердя, 5 – світловий промінь, 6 – скануюча платформа, 7 – електродвигун

Вимірювання повітряного зазора здійснюються за допомогою оптичного випромінювача і реєстрації динаміки зміни амплітуди оптичного сигналу що пройшло через повітряний зазор. Сканування платформи з блоком реле між оптичними датчиками забезпечує налагоджування і калібрування оптичного каналу. Алгоритм роботи оптичного каналу вимірювання представлений на рис. 3.4 та описаний у параграфі 3.4.

Акустичний канал призначений для отримання акустичної характеристики роботи реле. Канал складається з електростатичного мікрофону, підсилювача сигналу (рис.4.1).

Рис.4.4 Схема побудови акустичного каналу вимірювання, 1– мікрофон, 2 – підсилювач сигналу

Принцип роботи полягає в реєстрації акустичних коливань, які супроводжують усі механічні процеси, що відбуваються при роботі реле. Такі коливання мають певну структуру, форму і тривалість для справного і для несправного електромагнітного реле. Встановлено, що по амплітуді, характеру акустичних коливань, можна судити про відхилення параметрів електромагнітного реле від нормативів. Алгоритм роботи акустичного каналу вимірювання представлений на рис. 3.9 та описаний у параграфі 3.6.

Електричний канал вимірювання призначений для вимірювання електричних параметрів реле, забезпечення реєстрації динаміки зміни електричних характеристик реле в процесі його роботи, реєстрації моментів і часу включення та відключення живлення, замикання і розмикання контактів реле, часу ковзання контактів і оцінки стану якості контактних поверхонь, шляхом вимірювання зміни напруги в колі контактної групи, під час ковзання кожної контактної пари. Крім того, електричний канал забезпечує автоматичне, програмоване управління вимірюваннями в усіх вимірювальних каналах [46-48].

Електричний канал вимірювання функціонально складається з блоку навантажень (БН) і блоку спряження (БС) (рис.4.5).

Рис.4.5 Схема побудови електричного каналу вимірювання: БН – блок навантажень, БС – блок спряження

Алгоритм роботи електричного каналу вимірювання представлений на рис. 3.1 та описаний у параграфі 3.3.

Конструктивно ВДК складається з чотирьох окремих вузлів: вимірювальної чарунки, блоку живлення, аналогово-цифрового перетворювача, комп'ютера та з'єднуючих кабелів (рис. А.1–А.16, Додаток А).

Блок живлення призначений для формування рівнів постійної напруги +8 В; ±17 В; ±35 В і +35В при максимальних струмах навантаження 0,5–8 А.

Корпус вимірювальної чарунки (рис. А.2, додаток А) призначений для з'єднання усіх вузлів і блоків ВДК, та забезпечує акустичну і оптичну ізоляцію, а також електромагнітне екранування датчиків і блоку реле. Складається із металевого корпусу і внутрішнього шумопоглинаючого корпусу. Зовні блоку є розніми для підключення блоку живлення і АЦП. Всередині корпусу ВДК встановлені блок узгодження управління, спряження, навантажень, а також рухома, скануюча платформа з блоком реле.

Скануюча платформа функціонально входить до складу оптичного каналу вимірювання.

Платформа забезпечує сканування блоку реле перпендикулярно осі взаємодії оптичних датчиків, для вимірювання величини фізичного зазора між якорем і полюсним наконечником реле та під час налагоджування і калібрування оптичних датчиків.

Платформа (рис. А.5 і А.6, Додаток А) пересувається за допомогою електродвигуна постійного струму. Управління забезпечується за допомогою блоку управління, кінцевих датчиків і схем формування напруги положення. За суттю оптичний канал із скануючою платформою, це автоматизована керована система із зворотнім зв'язком, яка налаштовується на максимальний сигнал з фотоприймача шляхом сканування у зоні проекції тіней від якоря та полюсного наконечника [71].

Випромінювач оптичного каналу призначений для забезпечення випромінювання, при проходженні фізичного зазора, формування рівномірної інтенсивності сигналу вимірюваного поля яскравості. З цих підстав для випромінювання обраний інфрачервоний діапазон, а як оптичний випромінювач була прийнята світлодіодна матриця на основі світлодіодів інфрачервоного випромінювання SIR - 505STA47 з довжиною хвилі 950 нм і шириною спектральної смуги випромінювання 40 нм (рис.4.6) [76].

Рис.4.6 Випромінювач:1 – світлодіодна матриця, 2 – розсіювач

Блок навантажень призначений для емуляції навантажень, які комутуються контактами реле (рис. А.7 і А.8, Додаток А), та забезпечує можливість комутації навантажень 0,5А одночасно по кожній контактній групі.

Блок спряження, призначений для формування робочих рівнів напруги, яка подається в обмотки реле, а також для комутації обмоток реле, формування набору шунтів та ін. Крім того, блок спряження перетворює напругу з плати управління в робочий рівень напруги обмоток реле, а також забезпечує реєстрацію кривої робочого струму в обмотках реле.

Блок узгодження перетворює цифровий код управління в аналогові сигнали управління блоком реле, що перевіряється, управління платою навантажень, переміщення скануючої платформи і управління роботою випромінювача оптичного каналу [77,79]. Складається з ЦАП, 2-х регістрів, інвертора і багатоканального операційного підсилювача із зворотнім зв'язком (рис. А.11 і А.12, Додаток А).

Параметричні підсилювачі вимірювальних каналів призначені для забезпечення вхідного рівня сигналів у каналах на АЦП. Їх принципові схеми побудовані на типових мікросхемах і аналогічні (рис. А.1, Додаток А).

Мікрофонний підсилювач призначений для формування сигналів звукової частоти, сигнал з якого подаються на аналоговий вхід АЦП (рис. А.14, А.15, додаток А).

ацп типу lcard - e140 забезпечує високошвидкісний безперервний збір даних на частотах до 100 кГц. зв'язок з комп'ютером здійснюється через usb порт 10. Схеми та таблиці управління роботою ВДК, таблиця формування напруги положення скануючої платформи представлені у додатку Б [82,83].

Загальний алгоритм роботи ВДК приведений на рис.4.7. Після старту відбувається ініціалізація системи та робота підпрограм каналів вимірювання Персональний комп'ютер через блок узгодження і управління забезпечує програмне управління роботою реле, що перевіряється та АЦП, запис, обробку і аналіз отриманих даних, порівняння результатів із записаними в пам'яті допусками, виведення результатів перевірки реле на монітор і принтер та збереження даних вимірювання.

Рис.4.7 Загальний алгоритм роботи ВДК по збору і обробці результатів вимірювань

За підсумками такого аналізу, можна робити висновок про справність реле, прогноз його стану

через певний період часу, а також розраховувати оптимальний міжремонтний період за нової стратегією обслуговування об'єкта «за станом».

4.2 Вимірювання та розрахунки параметрів реле

Для вимірювання параметрів встановлюється в роз'їм скануючої платформи та включається живлення ВДК. Подальша робота пристрою із зняттям механічних характеристик реле здійснюється автоматично за допомогою комп'ютера. Автоматична робота виконується в послідовності:

- включення інфрачервоної випромінюючої матриці;
- переміщення скануючої платформи між випромінюючою матрицею і фотоприймачем;
- зупинка платформи у момент отримання максимального сигналу при максимальному фізичному зазорі між якорем і полюсним наконечником;
- включення живлення реле;
- відключення живлення реле;
- реєстрацію динамічних характеристик по усіх каналах.
- обчислення основних механічних параметрів електромагнітним реле на основі програмного аналізу динамічних характеристик реле;
- порівняння вичислених параметрів з еталонними параметрами реле;
- видача результату порівняння на екран комп'ютера;
- запис отриманої інформації в базу даних.

а)

б)

Рис.4.8 Зміна динамічних параметрів від фізичного зазора δ (мм) у процесі діагностування реле а) НМШМ1-10, б) НМШ2-900

На рис.4.8 отримана порівняна динаміка зміни величини фізичного зазора (мм) у сукупності зі струмом в обмотки , електрорушійною силою індукції у зовнішньому датчику , величиною звукового сигналу та із зміною рівнів комутуючої напруги при роботі контактної групи для реле типів: а) НМШМ1-10, б) НМШ2-900 [147].

Різна динаміка зміни величини фізичного зазора у сукупності з іншими характеристиками також характерна для різних значень струму спрацьовування, а також для справного і несправного електромагнітного реле.

При багатократному повторенні і реєстрації динаміки процесів з наступним порівнянням знятих динамічних характеристик між собою, запропоновано судити про їх автентичність (рис.4.9) [82,83].

Рис.4.9 Порівняння характеристик роботи при багатократному повторенні циклів включення і відключення живлення обмотки реле

На рис.4.10 представлені графічні діаграми фізичного зазора від струму в обмотці реле НМШ2-900: при мінімальному значенні струму спрацьовування (рис.4.10 а) і при номінальному значенні струму спрацьовування (рис.4.10 б).

Рис.4.10 Залежність величин фізичного зазора від струму в обмотці реле НМШ2-900: а) при мінімальному значенні струму спрацьовування; б) при номінальному значенні струму

спрацьовування

Встановлено, що порівняння динамічних характеристик роботи реле доцільно проводити при різних значеннях живлячої напруги. Це відкриває можливості більш точної оцінки характеру змін, що сталися, в роботі реле з часу останніх випробувань, спрогнозувати час можливої відмови, та прийняти заходи по його запобіганню [79].

Проведені дослідження значень струму в обмотках випробуваних типів реле і, відповідні ним величини фізичного зазора представлені в таблицях (табл. В.1 - табл. В.4, додаток В). При цьому, точність вимірювання фізичного зазора в крайніх положеннях якоря за допомогою оптичного каналу ВДК перевершує точність цих же вимірювань, виконаних за допомогою набору вимірювальних щупів, не гірше за точність вимірювань, виконаних за допомогою індикатора годинного типу (люфтмера) та достовірніше розрахункового методу. Результати експериментального визначення фізичного зазора у крайніх положеннях якоря для реле типу НМШ 2-900 різними способами наданий у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Визначення фізичного зазора реле НМШ 2-900 різними способами

Спосіб визначення

Фізичний

зазор (мм)

Набором вимірювальних щупів

Індикатором годинного типу (люфтмером)

Оптичним каналом ВДК

Розрахунком за кривою струму

Sup δ

2,300

2,250

2,252

2,246

Inf δ

0,260

0,250

0,248

0,247

Точність вимірювання за допомогою набору вимірювальних щупів знижується за рахунок зниження якості поверхонь щупів та приблизного, окомірного місця їх застосування у фізичному зазорі при кожному вимірюванні. Точність вимірювання за допомогою індикатора годинного типу (люфтмера) знижується за рахунок змінної якості майданчика притиснення приладу, кута прикладення приладу до якоря реле. Точність розрахунків залежить від ретельного урахування особливостей конструкції конкретного реле. Точність вимірювання в оптичному каналі ВДК визначається лише ретельністю калібрування каналу перед початком вимірювань та розрядністю АЦП і може вимірюватися в одиницях мікрон.

Крім того, оптичний канал дозволяє фіксувати величину зміни фізичного зазора у будь-який момент часу роботи реле. Це визначається частотою опитування вимірювального каналу АЦП.

Для АЦП типу LCARD E 14 -140, частота опитування складає 100 кГц для одного каналу.

Рис.4.11 Визначення фізичного зазора при включенні мінімального струму підйому якоря реле: 1 – оптичним каналом ВДК; 2 – за струмом в обмотці

У табл. В.1 (додаток В) представлені співвідношення визначення фізичного зазора, які отримано для реле типу НМШ при включенні мінімального струму підйому якоря реле оптичним каналом ВДК, порівняно з відомим методом розрахунку фізичного зазора шляхом інтеграції по кривій струму обмотки реле [131]. Значна розбіжність в отриманих результатах пояснюється складністю урахування негативних прискорень під час розрахунків по кривій струму, які виникають при коливаннях якоря на пружних контактах реле, для чого необхідно проводити апроксимацію вихідної характеристики струму (рис.4.11). Дослідження показали, що явище з негативним прискоренням також характерно для деяких типів багатоконтактних реле, наприклад у типів НМШ1 і НМШМ1 де рух якоря уповільнюється та може мати зворотній напрямок під час роботи, на ділянці зіткнення та відскоків рухомих і нерухомих контактів реле, навіть при номінальному робочому струмі. Наслідком цього явища є додатковий знос контактів. На рис.4.12 (табл. В.2) представлені співвідношення визначення фізичного зазора, для реле типів НМШ2 при включенні номінального струму для підйому якоря порівняно з відомим методом визначення фізичного зазора шляхом інтеграції кривої струму обмотки реле. У даних цієї таблиці менш розходжень у визначеннях фізичного зазора, що пояснюється відсутністю негативних прискорень та коливань якоря при номінальному струмі роботи.

Рис.4.12 Визначення фізичного зазора при включенні номінального струму підйому якоря реле: 1 – оптичним каналом ВДК; 2 – розрахунком за кривою струму у обмотці реле

Оптичний метод вимірювання фізичного зазора є прямим методом, тому його достовірність вища, ніж визначення фізичного зазора непрямим методом по кривій струму. Аналіз набутих значень фізичного зазора (табл. В.1 і табл. В.2) показує наявність похибок при його визначенні по кривій струму. Ця похибка може пояснюватися люфтом котушок реле на його осерді при поданні струму, оскільки котушки жорстко не скріплені з осердям реле СЦБ і мають конструктивну можливість зрушення (люфту), змінюючи магнітні силові лінії та електромагнітну індукцію у повітряному зазорі. Тому, набуті непрямим методом значення фізичного зазора відрізняються від істинних значень, отриманих прямим методом в оптичному каналі. Для забезпечення стабільності електромагнітних параметрів та використання автоматизованих методів визначення параметрів з кривої струму пропонується фіксувати і перевіряти надійність фіксування робочих котушок на осерді реле.

У табл. В.3 представлені отримано за допомогою ВДК часові співвідношення параметрів реле НМШ2-900: струм в обмотки, фізичний зазор в сукупності з експериментально набутими значеннями сили тяжіння якоря, усередненими після серії експериментів. Ці значення для реле НМШ2-900 в подальшому використовувалися як вихідні.

Статистичні дані справно-працюючих реле узагальнені в еталонні характеристики сигналів, які зберігаються в пам'яті комп'ютера для порівняння і діагностування випробовуваних реле. В результаті обробки сигналів і порівняння їх з еталонними характеристиками можна робити висновок про працездатність випробовуваного реле, визначити електричні, механічні і часові параметри, а також виникає можливість зробити прогнозування залишкового ресурсу і надійність приладу. У разі виявлення несправності (розрегулювання) видається інформація про ремонт приладу.

Такі механічні параметри реле як: фізичний зазор (загальний хід) якоря; висота антимагнітного штифта; ковзання (спільний хід) загальних і тилових контактів; ковзання (спільний хід)

загальних і фронткових контактів; вільний переліт якоря (рухомих контактів), а також ряд інших параметрів визначаються безпосередньо з оптограм, фонограм і сигналів від датчиків електричного каналу (рис.4.9). При цьому повинне дотримуватися перевірочне співвідношення максимального фізичного зазора [149]:

$$\dots (4.1)$$

Повітряний зазор між рухомими і тильовими контактами для включеного реле визначається виразом:

$$\dots (4.2)$$

де $\dots$ - коефіцієнт передачі фізичного ходу якоря до міжконтактного зазора.

Повітряний зазор між рухомим і фронтковим контактом для вимкненого реле визначається виразом:

$$\dots (4.3)$$

Правильність регулювання контактної системи визначається шириною зони комутації контактних груп, показано у додатку Г (рис. Г.1).

У тому разі якщо перераховані параметри механічної характеристики відповідають нормативним, буде гарантовано контактний тиск на будь-якому контакті. Нині проводяться роботи із створення бази нормативних діагностичних даних по усьому номенклатурному ряду релейної апаратури залізничної автоматики.

Розрахунки параметрів здійснюються за математичними моделями описаним у другому розділі за даними отриманими автоматизованими способами описаних у третьому розділі.

Такі параметри як:

- попереднє натиснення нормальних фронткових на упорні пластини;
- натиснення на кожен фронтковий контакт;
- попереднє натиснення нормальних тильових на упорні пластини;
- натиснення на кожен тильовий контакт,

визначаються шляхом автоматичного обчислення даних на підставі записаних динамічних характеристик вимірювальних каналів ВДК.

Основою для розрахунків попереднього і повного тиску по кожному контакту, які проводить ВДК, є рівняння руху якоря реле (3.11) і похідні від нього системи рівнянь з урахуванням ходу кожного контакту (3.13) і (3.14).

Помітимо, що аналітичний метод рішення нелінійного рівняння (3.11) украй скрутний, оскільки вимагає аналітичного представлення залежностей $\dots$. Проблема спрощується, якщо хід якоря в процесі руху визначати оптичним методом і вводити його в рівняння.

Новий метод визначення механічних параметрів реле залізничної автоматики і телемеханіки типу НМШ і РЕЛ полягає в обробці даних, отриманих за допомогою автоматизованого пристрою, шляхом введення аналогових сигналів з датчиків в комп'ютер, який забезпечує синхронну реєстрацію часових діаграм стану контактів, а також положення якоря реле від часу $\dots$. Визначення положення якоря реле здійснюється за допомогою оптичного датчика. Для обробки отриманих даних використовуються чисельні методи, які реалізуються програмно на сучасній обчислювальній техніці. Для визначення стану контактів і положення якоря у будь-який момент часу по дискретних значеннях, при заданій напрузі живлення, використовується лінійна інтерполяція методом Лагранжа, яка проходить через вузлові точки, отримано за допомогою вимірювального пристрою (рис. 3.12). Зіставляючи положення якоря реле і часові діаграми стану контактів, можна визначити спільний хід тильових і фронткових контактів, а також відстань між фронтковими і тильовими контактами під час перельоту загальних контактів в кожній контактній групі (рис.4.13) (пар. 4.3) та вирази (3.12) – (3.16) (пар. 3.7).

Прискорення якоря під час включення реле автоматично визначається шляхом обчислення другої похідної функції $\dots$ програмним методом Ріддера [138]. Для диференціювання функції $\dots$, вона замінюється гладкою функцією за допомогою поліноміальної регресії з четвертою мірою

апроксимуючого полінома, використовуючи метод найменших квадратів (рис. 3.13) [139]. Прихований хід контактів визначається шляхом рішення системи з рівнянь протидіючих сил, де - кількість контактних груп в цьому реле, а 2 – визначає два види контактів (тилові і фронтові) (3.15),(3.16). Знаючи спільний і прихований хід кожного контакту, можна визначити контактний тиск (3.12).

4.3 Діагностування реле за динамічними характеристиками каналів вимірювання

ВДК надає можливість архівації отриманих даних для подальшого аналізу, контролю, діагностуванню та прогнозуванню зміни параметрів випробуваних реле.

Частота опитування каналів дозволяє фіксувати навіть тривалість брязкоту контактів, оцінювати характер комутаційних процесів, якість контактних поверхонь і виявляти дефектні і несправні контакти рис.4.13 (рис. Г.1, додаток Г).

Рис.4.13 Динамічні характеристики роботи реле НМШ2-900 у циклі тяжіння відпадання

Неможливість отримання даних про рух якоря із кривої струму, стає зрозумілою із отриманих за допомогою ВДК набору паралельних динамічних характеристик, а саме: струму, фізичного зазора та електрорушійної сили індукції для реле з малим опором обмоток і повільнодійних реле (на прикладі реле НМШ2-900, рис.4.13 та НМШМ1-360, рис.4.14). Характеристика струму, яка може використовуватись для розрахунків параметрів, у таких типів реле має крутий фронт і тил та практичну відсутність будь-яких точок перегину під час руху і зупинки якоря, у відмінність від характеристики струму в інших реле. Це пояснюється великими струмами в обмотці і замкнутому вітку мідної гільзи які поглинають малі струми від зміни індукції під час руху якоря.

Визначення контактного тиску у таких реле, здійснюється відомим методом, який заснований на розрахунку магнітного кола реле [112].

Рис.4.14 Динамічні характеристики реле типу НМШМ1-360

Задача спрощується якщо повітряний зазор визначати за допомогою оптичного методу, та контролювати його зміну індукційним методом (параграф 3.5). За допомогою індукційних датчиків, для всіх типів реле, можна визначати момент початку руху якоря, тягові зусилля при заданій напрузі живлення, частоту і амплітуду вібрації рухомої системи реле, час загасання коливань, приведену масу якоря та ін.

Рис.4.15 Динамічні характеристики зміни е.р.с магнітній індукції зовні і усередині магнітного кола реле НМШ2-900

Були проведені діагностичні дослідження за допомогою двох конструкцій індукційних датчиків вимірювання параметрів реле: "зовнішній" індукційний датчик на базі вимірювальної обмотки з феритовим осердям і "внутрішній" індукційний датчик, з використанням, як вимірювальної обмотки, одної з обмоток реле, що перевіряється. В інформаційній обмотці наводиться електрорушійна сила, яка залежить від числа витків вимірювальної обмотки, перетину осердя датчика і індукції потоку, що перетинає витки обмотки датчика, причому ця індукція пов'язана з індукцією поля в зазорі через коефіцієнт випинання. Проінтегрувавши значення електрорушійної сили, (можна чисельним методом, відповідно до розділу 3.5) визначають індукцію в осерді реле. На рис.4.15 представлені порівняльні характеристики отримано за допомогою двох індукційних датчиків в зіставленні з іншими динамічними характеристиками реле НМШ2-900. Під час експериментальних досліджень за допомогою «зовнішнього»

індукційного датчика було виявлено, що в осердді датчика індукція досягає величин близько 2-3 мТл, тобто інформаційна складова поточкозчеплення взаємної індукції системи реле і датчика надзвичайно мала. Для компенсації цього недоліку і підвищення коефіцієнта взаємоіндукції між магнітним колом реле і вимірювальною обмоткою датчика, було проведено удосконалення параметрів вимірювального датчика (експериментальний підбір перерізу феритового сердечника, числа витків, вибір параметрів схеми підсилювача та розташування датчика). Діагностичні дослідження за допомогою «внутрішнього» індукційного датчика показали, що чутливість такого датчика вища, оскільки він має коефіцієнт взаємоіндукції в 290 разів більше, ніж у «зовнішнього» датчика. Зовнішній датчик придатний для діагностування повільнодійних реле і реле з низьким опором обмоток.

На рис.4.16 представлені динамічні характеристики зміни величини фізичного зазора, зафіксовані оптичним каналом, при перевірці трьох різних реле типу НМШ2-900, які відповідають: його справному стану (рис.4.16, а); при зносі антимагнітного штифта (рис.4.16, б) і при неправильному регулюванні, коли якір затиснутий обмежувальною скобою (рис.4.16, в). Графіки динамічних характеристик дозволяють провести аналіз роботи і діагностику стану нормальнодіючого реле, що перевіряється. На другій діаграмі видно, що зменшився фізичний зазор реле (зазор а, рис.4.16, б) у момент знаходження реле під струмом. Це обумовлено зносом (зменшенням) антимагнітного штифта. Крім того, було зареєстровано, на скільки збільшився час початку зрушення при відпаданні якоря реле після знеструмлення обмотки (зазор б, рис.4.16, б), це обумовлено більшою утримуючою силою при меншому фізичному зазорі, за рахунок зниження магнітного опору [83].

Рис.4.16 Динамічні характеристики зміни величини фізичного зазора:
а) для справного реле; б) при зносі штифта; в) якір затиснутий скобою

На третій діаграмі видно зменшення величини фізичного зазора у знеструмленому стані (зазор в, рис.4.16, в). Це обумовлено торканням якоря до обмежувальної скоби. Крім того, на діаграмах видно зменшення часу тяжіння якоря із-за меншого фізичного зазора в знеструмленому стані реле (зазор г, рис.4.16, в) і зменшення періоду вільних коливань при відпаданні якоря реле, яке обумовлене його меншим вільним ходом (зазор д, рис.4.16, в).

Рис.4.17 Динамічні характеристики зміни величини струму :
а) для справного реле; б) при зносі штифта; в) якір затиснутий скобою

На рис.4.17 представлені динамічні характеристики зміни величини струму в обмотці для справного реле (рис.4.17, а), при зносі антимагнітного штифта (рис.4.17, б) і коли якір затиснутий обмежувальною скобою (рис.4.17, в). З другої діаграми виходить, що величина струму в точці “а”, має менше значення, це пояснюється більшою противо-електрорушійною силою в колі обмотки реле, із-за меншого розміру антимагнітного штифта і більшою кінцевою швидкістю якоря. На третій діаграмі видно відсутність, характерних для перших випадків, коливань значення струму, це пояснюється меншою швидкістю і відсутністю вільних коливань якоря реле, із-за наявності додаткового тертя якоря об обмежувальну скобу.

На рис.4.18 представлені три динамічні характеристики електрорушійної сили індукції наведеної в другій обмотки реле, які характеризують зміни величини наведеної електрорушійної сили індукції в обмотці для справного реле (рис.4.18, а), при зносі антимагнітного штифта (рис.4.18, б) і коли якір затиснутий обмежувальною скобою (рис.4.18, в). З другої діаграми виходить, що величина електрорушійної сили індукції в точці “а” має більше значення, це пояснюється більшою пройденою відстанню і більшим прискоренням якоря перед ударом його в полюсний наконечник, яке відбувається при зносі антимагнітного штифта.

Рис.4.18 Динамічні характеристики зміни е.р.с індукції: а) для справного реле; б) при зносі штифта; в) якір затиснутий скобою

На рис.4.19 представлені акустичні діаграми, супроводжуючі механічні переміщення, що відбуваються усередині справного блоку реле (рис.4.19, а), при зносі антимагнітного штифта (рис.4.19, б) і у разі, коли якір затиснутий обмежувальною скобою (рис.4.19, в).

Рис.4.19 Акустичні діаграми: а) для справного реле; б) при зносі штифта; в) якір затиснутий скобою

На діаграмі (рис.4.19, б) видно, що амплітуда акустичних коливань при спрацьовуванні реле більша (зазор а). Це обумовлено великим вільним ходом і прискоренням якоря перед ударом зношеного антимагнітного штифта об полюсний наконечник. На третій діаграмі помітне явне зменшення амплітуди акустичних коливань при відпаданні якоря реле (зазор б, рис.4.19, в). Це обумовлено збільшенням тертя в рухомій системі. Крім того, на третій діаграмі зареєстрована поява перших значних шумів усередині блоку реле через менший, ніж в перших випадках, час (зазор в, рис.4.19, в). Ці шуми характеризують удар якоря об полюсний наконечник і обумовлені меншим фізичним проміжком, а відповідно меншою відстанню яку пройшов якір перед зіткненням з полюсним наконечником. Збільшення тертя у рухомій системі може бути пов'язано із неправильним регулюванням або з неправильною комплектацією блоку реле після ремонту, при встановленні неправильної маси противаг якоря реле [96,146]. Автоматизоване контролювання цієї проблеми може бути вирішене за допомогою запропонованого способу [44].

4.4 Порівняння з традиційними методами, переваги запропонованих рішень

Експериментально отримана характеристика зміни величини повітряного зазора повністю підтверджує теорію перехідних процесів в електромагнітному реле. Результати дають наочну картину руху якоря реле в сукупності з супроводжуваними процес акустичними шумами і електричними характеристиками з обмотки та з контактних груп реле [147]. Результати лабораторних іспитів експериментального зразка ВДК для контролю параметрів реле представлені у табл. 4.2 і табл. 4.3:

Таблиця 4.2

Похибки вимірювання електричних параметрів реле

U_0 , В

U_x , В

(, %

R_0 , Ом

R_x , Ом

(, %

6

6,005

0,08

0,5

0,501

0,2

12,01
0,08
1,0
1,001
0,1

24
24,02
0,08
100,0
100,1
0,1

48
48,04
0,08
1000,0
1005,0
0,5

Таблиця 4.3
Похибки вимірювання часових інтервалів
То , мс
dT, мкс
(, %

200
(4
0,003

400
(7
0,0028

600
(10
0,0026

1000
(16
0,0026

- максимальна відносна похибка вимірювання напруги не перевищує 0,08%;
- максимальна відносна похибка при вимірюванні опорів не перевищує 0,5%;
- максимальна відносна похибка вимірювання часових інтервалів не перевищує 0,001%.

Таблиця 4.4
Результати визначення сумісного ходу та контактного тиску для реле типу НМШ2-900
№ контакту

Сумісний хід контактів
Контактний тиск

Існуюча технологія,

мм

ВДК,

мм

Відносна похибка

%

Існуюча технологія,

г

Розрахунковим методом ВДК,

г

Відносна похибка,

%

Графо-аналітичним методом ВДК, г

Відносна похибка,

%

21-22

0,5

0,484

3,2

44

48

9

46

4,5

41-42

0,55

0,546

0,7

36

39

8,3

37

2,7

61-62

0,35

0,363

3,7

37

40

8.1

39

2,5

81-82

0,25

0,244

2,4

18

20

11,1

20

11,1

21-23

0,65

0,649

0,2

50

55

10

55

10

41-43

0,45

0,439

2,4

65

60

7,6

63

3,0

61-63

0,85

0,764

0,1

70

64

8.5

65

7,1

81-83

0,60

0,598

0,3

65

61

6,1

62

Для вимірювання і отримання розрахункових даних контактного тиску використовувався експериментальний зразок автоматизованого вимірювального комплексу для перевірки параметрів реле залізничної автоматики. Порівняльний аналіз результатів показав, що відхилення значень контактного тиску визначеного за допомогою ВДК не перевищує 10% для фронтних контактів і 11,1% для тильових контактів від існуючого методу за допомогою графометра (табл. 4.4).

Запропоновані методи дозволяють досить точно вирішити завдання автоматизації визначення контактного тиску для нормальнодійних реле залізничної автоматики, при цьому збільшується точність результатів, а також зменшується час вимірювання контактного тиску, за рахунок того, що відпадає необхідність проводити вимірювання для кожного контакту окремо і знімати кожух реле.

4.5 Визначення показників надійності

Проаналізуємо комплексні показники надійності випробуваного об'єкту при існуючій технології і після удосконалення технічного обслуговування електромагнітних реле шляхом автоматизації процесу їх діагностування.

Коефіцієнт готовності реле визначається як ймовірність того, що пристрій опиниться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування реле за призначенням не передбачається [151]:

$$K_g = \frac{t_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}} + t_{\text{в}}}, \quad (4.4)$$

де $t_{\text{пр}}$ - інтервал працездатності, $t_{\text{в}}$ - інтервал відновлення. Вихідні дані для визначення отримаємо з [3,4,9,10], результати наведено у табл. 4.5.

Коефіцієнт оперативної готовності реле визначається як ймовірність того, що реле буде працездатне в довільний момент часу і безвідмовно пропрацює заданий час :

$$K_{\text{ог}} = K_g \cdot K_{\text{бв}}, \quad (4.5)$$

де K_g - коефіцієнт готовності; $K_{\text{бв}}$ - імовірність безвідмовної роботи реле протягом часу , необхідного для безвідмовного використання за призначенням: , де $t_{\text{в}}$ - відмова, $t_{\text{пр}}$ - час відмови [153].

Коефіцієнт технічного використання визначається як відношення математичного очікування сумарного часу перебування реле в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування реле в працездатному стані і простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той же період експлуатації [153]:

$$K_{\text{тв}} = \frac{t_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}^{\text{рем}} + t_{\text{пр}}^{\text{проф}}}, \quad (4.6)$$

де $t_{\text{пр}}$ - час збереження працездатності в n -му циклі функціонування реле; $t_{\text{пр}}^{\text{рем}}$ - час відновлення (ремонту) після m -го відмови реле; $t_{\text{пр}}^{\text{проф}}$ - тривалість виконання k -ї профілактики, вимагає виведення об'єкта з працюючого стану (використання за призначенням); n - число робочих циклів за аналізований період експлуатації; m - число відмов (відновлень) за аналізований період; k - число профілактик, що вимагають відключення реле у розглянутий період.

Таблиця 4.5

Порівняні показники надійності реле після перевірки

Показники
надійності

Стенд

,
годин

СВ-СЦБ

0,99726

0,897

0,99724

0,90

0,66

ВДК

0,99999

0,969

0,99999

0,97

0,16

Як бачимо з табл. 4.5 час відновлення реле зменшується, тому (4.4) і (4.5) збільшуються. При зменшенні тривалість виконання -й профілактики також зменшується, тому (4.6) збільшується. Показники надійності реле до і після автоматизації приведені в табл. 4.5.

Середній час відновлення реле – є одним з основних показників надійності ремонтіваних реле [152]. можна визначити на підставі статистичних даних, одержаних для однотипних відновлюваних реле

, (4.7)

де - кількість однотипних реле, для кожного з яких визначений загальний час відновлення за заданий час спостережень; при чому - , де час відновлення -го об'єкту після -го відмови; - кількість відновлень j-го реле за час спостережень, причому [153].

Загалом, середній час відновлення - це математичне очікування часу відновлення працездатного стану реле після відмови [153]. З визначення виходить, що

, (4.8)

де - число відновлень реле, рівне числу відмов; - час, витрачений на відновлення (виявлення, пошук причини і усунення відмови), в годинах. Як і для комплексних показників надійності (4.4)-(4.6) час відновлення реле зменшується, тому також зменшується (4.8). Вихідні дані для визначення отримаємо з [3,4,16], результати також наведено у табл. 4.5.

Тобто поліпшуються комплексні показники надійності реле та середній час відновлення. Крім цього автоматизація процесу діагностування реле за допомогою ВДК підвищує достовірність контролю і надає економічний ефект.

Порівняємо показники надійності ВДК за наявності одного(<1v1>) і трьох (<2v3>) обчислювальних каналів. Вважатимемо, що при відмові (помилці) двох каналів припиняється використання ВДК.

Нехай інтенсивність відмови каналу $\lambda=10^{-5}$ час використання пристрою 200 годин (місяць роботи), тоді імовірність відмови каналу . Для трьохканальної системи :

Звідси витікає, що виграш по достовірності контролю ВДК за наявності трьох каналів складе:
, (4.9)

Ще більший ефект має місце при періодичному контролі справності обчислювальних каналів.

Імовірність відмови мажоритарної системи $\langle 2v3 \rangle$ може бути визначена по формулі:

$$(4.10)$$

де характеризує відношення часу роботи системи до часу діагностування [151, 153].
Виявилось, що при тих же значеннях і часі періодичний контроль через 10 годин дасть вииграш більш ніж в 3000 разів. Якщо контроль здійснюється через коротший час (), то він забезпечить скільки завгодно високу достовірність інформації в каналах ВДК.

Рис.4.20 Графік технічної експлуатації: а) без використання ВДК; б) з використанням ВДК

На рис.4.20 представлений графік зміни періодів експлуатації після введення перевірки автоматизованим ВДК, як бачимо періоди ремонту зменшуються, а періоди роботи реле збільшуються, що поліпшує техніко-економічні показники.

4.6 Техніко-економічне обґрунтування впровадження вимірювально-діагностичного комплексу

Перевірка економічної доцільності проводиться за трьома показниками: – експлуатаційні витрати за рік, річний економічний ефект, термін окупності. Початковими даними для розрахунку капітальних вкладень і експлуатаційних витрат служать конструктивні параметри і експлуатаційні показники порівнюваних варіантів техніки [36]. Для порівняння застосовується стенд, використовуваний в ремонтній технологічній дільниці і виконуючий аналогічні функції. В даний час всі основні роботи по перевірці, ремонту і регулюванню електромагнітних реле залізничної автоматики зосереджені в ремонтній технологічній дільниці. Згідно існуючої технології перевірки електромагнітних реле І-класу надійності для вимірювання електричних і часових параметрів реле в ремонтній технологічній дільниці використовується універсальний вимірювальний стенд (СВ-СЦБ) типа СИ (рос.). Норми часу на перевірку реле НМШ і РЕЛ при використуванні стенду СВ-СЦБ складають до 1-2 години [16]. Використовування пропонованого стенду для автоматизації вимірювання параметрів і характеристик електромагнітних реле залізничної автоматики дозволяє вимірювати весь комплекс параметрів реле за 5 хвилин.

Норма часу на ремонт реле також зменшиться до 20-35 хвилин, за рахунок економії часу при вхідному і вихідному контролі. При кількості реле, що перевіряються в ремонтній технологічній дільниці, – 2500 штук в рік, загальний час, що витрачається на перевірку реле за рік, скоротиться біля 7 разів з 750 до 100 годин. З цих підстав основною умовою для економії коштів є зменшення кількості робочих місць з вимірювальними стендами СВ-СЦБ, та заміна їх на вимірювально діагностичні комплекси. Зараз в лабораторіях Укрзалізниці в РТД існує біля 820 робочих місць із стендами типу СВ-СЦБ. За рахунок економії часу перевірки реле у 4-5 разів, достатньо мати по два автоматизованих вимірювально діагностичних комплексу в лабораторії, тобто для всієї Укрзалізниці біля 160 штук. З урахуванням метрологічної перевірки та ремонту вимірювально діагностичних комплексів достатнім буде виготовлення 200 штук. Аналіз двох стендів, приведений у табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Порівняльний аналіз стенду СВ-СЦБ і ВДК

Характеристика стенду

Стенд СВ-СЦБ

ВДК

Час перевірки одного реле (хв.)

20-35

5

Час ремонту одного реле (хв.)

60-120

30-35

Потужність енергоспоживання (Вт)

350

40

Маса станду (кг)

130

6

Вартість станду (грн.)

1900

(без урахування вимірювальних приладів, з урахуванням металобрухту чорного та дорогоцінних металів)

1400 (без урахування вартості комп'ютера)

Максимальна потужність споживання вимірювальним комплексом складає: автоматизований стенд – 35 Вт; портативний комп'ютер – 15 Вт. Загальна потужність споживання вимірювальним комплексом складає 40 Вт, що біля 8 разів менше, ніж у існуючого станду СВ-СЦБ.

Укрзалізниця придбає техніку, що випускається промисловістю, за оптовими цінами. Тому собівартість виробництва нової техніки визначається агрегатним методом, при якому підсумовуються ціни окремих конструктивних блоків виробу, а також витрати на збірку і монтаж пристрою. Автоматизований стенд конструктивно складається з електронних частин і друкарських плат та корпусу і механічних частин. Вартість кожного найменування включає вартість комплектуючих виробів, виготовлення друкарських плат, монтажні та налагоджуванні роботи. Окремо підраховується розробка та втілення програмного забезпечення, яке вважається доцільним розробити та втілити двома програмістами за два місяці, загальні витрати на їх зарплатню біля 10000 гривень. Програмне забезпечення буде однаковим для всіх виготовлених пристроїв, тому його собівартість підраховується для необхідної партії (200 виробів), та буде знижуватись із збільшенням виробів та при їх експорту у зацікавлені країни. Тому програмне забезпечення на один пристрій: $10000\text{грн.}/200\text{шт.}=50\text{грн.}$ Розрахунок капіталовкладень впровадження ВДК приведений у табл. 4.6.

Таблиця 4.7

Розрахунок капіталовкладень на впровадження ВДК

Найменування статті витрат

Вартість, грн

Програмне забезпечення

50

Корпус та механічні частини

550

Електронні частини

Монтажні та налагоджувальні роботи

350

Загальна сума

1400

Визначення вартості одного автоматизованого стенду для перевірки параметрів і характеристик електромагнітних реле.

Експлуатаційні витрати визначаються по статтях витрат, що роблять безпосередній вплив на економічні результати роботи залізничного транспорту України. Експлуатаційні витрати включають витрати за змістом штату, витрати на матеріали, запасні частини і електроенергію, а також відрахування на амортизацію. Експлуатаційні витрати па перевірку реле НМШ і РЕЛ в РТД визначаються за формулою:

$$, \quad (4.11)$$

де – основний фонд заробітної платні; – соціальні нарахування на основний фонд заробітної платні; – витрати на матеріали і запасні частини; – витрати на електроенергію; – амортизаційні нарахування.

Основний фонд заробітної платні визначається за формулою:

$$(4.12)$$

де – час, що витрачається в ремонтної технологічної дільниці на перевірку реле в рік (750 для СВ-СЦБ, 100 для ВДК) годин; – ставка електромеханіка – 12,5 грн/година.

Основний фонд заробітної платні рівний:

СВ-СЦБ – , ВДК –

Нарахування на заробітну платню –

для СВ-СЦБ – 3656,25 грн., для ВДК – 487,5 грн.

Витрати на матеріали і запасні частини.

Вартість ВДК стенду 1400 грн. 2% від 1400 грн. — витрати на матеріали і запасні частини: — для ВДК. Вартість СВ-СЦБ 1500 грн. 2% від 1500 грн. — витрати на матеріали і запасні частини: — для СВ-СЦБ.

Нарахування на основний фонд заробітної платні складає 36% від заробітної платні основного фонду (32% - пенсійний збір, 2,5% - соціальне страхування, 1,5% - відрахування до фонду безробіття).

Норми амортизаційних нарахувань визначається на основі вартості устаткування або капітальних вкладень і складаються з відрахувань на відновлення, заміну і капітальний ремонт.

Щорічні амортизаційні відрахування складають 5% від вартості стенду, а витрати на матеріали і запасні частини складають 2% від вартості стенду.

Витрати на електроенергію визначаються по формулі:

$$, \quad (4.13)$$

де – потужність, споживана стендом для перевірки реле;

– вартість 1 кВт/годин електроенергії. Для СВ-СЦБ Для ВДК Амортизаційні відрахування складають 5% від вартості стенду : СВ-СЦБ: ВДК:

Знаходимо експлуатаційні витрати по формулі (4.11):

Для СВ-СЦБ:

Для ВДК:

Розрахунок експлуатаційних витрат на перевірку реле в ремонтної технологічної дільниці для існуючого і впроваджуваного стендів приведений в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Розрахунок експлуатаційних витрат на перевірку реле в РТД

Стаття витрат

Стенд СВ-СЦБ

ВДК

Основний фонд заробітної платні на перевірку реле, грн.

9375

1250

Нарахування на заробітну платню ($k=0,36$), грн.

3656,25

487,5

Витрати на матеріали і запасні частини, грн.

30

28

Витрати на електроенергію, грн.

162,12

2,47

Амортизаційні відрахування, грн.

75

23

Експлуатаційні витрати, грн/рік

13298,37

1837,97

Річний економічний ефект від впровадження нової техніки направленої на автоматизацію виробництва і забезпечує економію виробничих ресурсів визначається як різниця витрат по базовій і новій техніці:

(4.14)

де – експлуатаційні витрати на перевірку реле для існуючого стану;

– експлуатаційні витрати на перевірку реле для нового стану;

– капітальні вкладення на впровадження автоматизованого стану;

– нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (для мікропроцесорної обчислювальної техніки).

Річний економічний ефект від впровадження автоматизованого стану для перевірки параметрів і характеристик електромагнітних реле залізничної автоматики рівний:

(4.15)

Термін окупності впроваджуваного автоматизованого стану:

років. (4.16)

Таким чином, впровадження автоматизованого стану для вимірювання параметрів і характеристик електромагнітних реле залізничної автоматики є економічно доцільним, оскільки

термін окупності складає менше 3 місяців.

4.7 Висновки до розділу 4

У розділі розглянуті основні технічні проблеми створення автоматизованого комплексу контролю параметрів релейної апаратури залізничної автоматики, найбільш ефективна структура ВДК, методи і принципи, що дозволяють вирішити завдання контролю параметрів з підвищеною достовірністю; наведені деякі осцилограми динамічних характеристик роботи електромагнітного реле, графіки реалізації нової технології профілактичного обслуговування реле, які підтверджують її ефективність і надійність. Зокрема, можна узагальнити розглянуте в розділі:

1. Вперше запропонований та реалізований одночасний багатоканальний контроль параметрів реле за чотирма каналами, оптичним, акустичним, електричним і електромагнітним.
2. Реалізований удосконалений метод оптичної реєстрації руху якоря реле з урахуванням форми коліматора випромінювача і оптичних спотворень вимірювального променя, що вирішує завдання визначення положення якоря реле у крайніх положеннях і під час роботи.
3. Вперше запропонований та реалізований метод акустичного діагностування рухомої системи реле, що сумісно з іншими неконтактними методами підвищує достовірність результатів.
4. Розроблені та випробувані нові датчики оптичного каналу та метод сканування повітряного зазора між якорем і полюсним наконечником, з урахування форми коліматора оптичного випромінювача в ході визначення положення якоря реле, що спрощує використання оптичного методу та надає можливість отримати достовірні результати
5. Вперше запропонований та реалізований метод для визначення чистоти контактних поверхонь реле від вуглецевих забруднень у числовій формі за використанням сумісного ковзання контактів, а також діагностування рухомої системи реле за використанням її резонансних властивостей.

Удосконалений метод діагностування реле залізничної автоматики дозволяє автоматизувати вимірювання механічних параметрів реле без зняття кожуха за допомогою ВДК. Похибка обчислення цих параметрів не перевищує 12 %. Крім того, підвищується достовірність результатів та реалізуються умови для оптимізації міжремонтного періоду за технічним станом, при цьому знижується залежність якості робіт від кваліфікації фахівця.

Реалізація автоматизованого вимірювального комплексу на сучасній елементній базі дозволяє підвищити надійність та збільшити продуктивність майже в п'ять разів. При цьому економічний ефект, від використання одного вимірювально-діагностичного комплексу, складає більше 11 000 гривень на рік, по Укрзалізниці більше .

Основні результати по даному розділу опубліковано в роботах [37-41,44,47,48,51,76,77,82,83,95,136,146,147,149].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі комплексно вирішено науково-практичне завдання удосконалення технічної експлуатації електромагнітних реле залізничної автоматики шляхом автоматизації процесів їх діагностування.

Розроблено комплекс моделей та виконано аналіз роботи вимірювальних каналів для автоматичного визначення параметрів реле, що дозволяє суттєво знизити час і витрати на перевірку параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики та підвищити їх надійність. Автором отримано такі основні наукові результати:

1. На основі аналізу існуючої технології зроблено висновок, що більшість відмов електромагнітних реле відбувається в наслідок зникнення контакту у штепсельному рознімі (35 %), порушень технології регулювання реле в РТД (12 %) та інших причин. На перевірку параметрів одного реле та запис результатів вимірювання витрачається майже 120 хвилин, при цьому журнали параметрів заповнюються вручну, що знижує об'єктивність контролю. Через відсутність автоматизації робіт великий вплив людського фактора на їх результати.
2. Розроблено метод діагностування електромагнітних реле залізничної автоматики який поєднує в собі чотири вимірювальні підсистеми: оптичного, акустичного, електричного і електромагнітного каналів вимірювання, що збільшує інформативність та підвищує достовірність результатів.
3. Розроблено метод акустичного діагностування стану рухомої системи реле, у якому визначення технічного стану здійснюється на підставі розподілу ймовірностей амплітуд звукового тиску, що дозволяє підвищити достовірність результатів діагностування.
4. Розроблено математичну модель підсистеми оптичного каналу вимірювання на основі неруйнівного контролю. Встановлено, що для реєстрації в оптичному каналі найбільш ефективним є використання фотоприймача з діапазоном спектральної характеристики 470 – 1200 нм і діаметром фоточутливого елемента 10 мм, а як формувач вимірювального променя застосовується світлодіодна матриця з прямокутним коліматором, що підвищує точність встановлення положення якоря та надає можливість автоматизувати визначення механічних параметрів.
5. Удосконалено метод автоматизованого визначення контактного тиску на підставі знайдених координат якоря, який відрізняється високою точністю і меншими витратами за технічної експлуатації.
6. Метод визначення чистоти контактних поверхонь базується на аналізі сумісного ковзання контактів реле, перетворюючи інформацію про їх стан у числовий код. Діагностування рухомої системи реле здійснюється під час аналізу сил тертя з використанням її резонансних властивостей, що надає можливість об'єктивно оцінити чистоту і стан контактної системи.
7. Використання індукційного датчика в електромагнітному каналі вимірювання надає можливість подальшого визначення: індукції в сердечнику, тягового зусилля, вібрації рухомої системи реле, приведеної маси якоря під час визначення механічних параметрів реле.
8. Розроблені методи діагностування реле залізничної автоматики дозволяють автоматизувати вимірювання механічних параметрів з використанням неруйнівного контролю. Похибка обчислення цих параметрів не перевищує 12 %. Крім того, реалізуються умови для оптимізації міжремонтного періоду за технічним станом при зниженні залежності якості робіт від кваліфікації фахівця.
9. Завдяки поєднанню чотирьох вимірювальних каналів під час автоматичного діагностування підвищуються показники технічної експлуатації, зокрема коефіцієнт готовності – на 0,28%, коефіцієнт оперативної готовності – на 7,44%, коефіцієнт технічного використання – на 0,28%, імовірність безвідмовної роботи – на 7,22%. При цьому зменшується середній час відновлення більше ніж у чотири рази.

10. Автоматизована система вимірювання параметрів реле на базі сертифікованого аналогово-цифрового перетворювача зі своїм інтерфейсом і програмним забезпеченням надає можливість метрологічного контролю ВДК, створеного з використанням стандартного приладу, що сумісно з комп'ютером надає можливість автоматизувати збереження не тільки результатів, але і всього процесу діагностування.

11. Впровадження одного автоматизованого ВДК на сучасній елементній базі дозволяє збільшити продуктивність майже в п'ять разів та понизити експлуатаційні витрати на перевірку й ремонт електромагнітних реле в РТД більше ніж на , а по Укрзалізниці більше ніж на , що дозволяє одержати суттєвий соціальний ефект – скоротити кількість ручних монотонних операцій. Запропоновані рішення автоматизованої перевірки параметрів реле з використанням ВДК були впроваджені для обслуговування та виконанні ремонтних робіт на Придніпровській залізниці та в навчальному процесі, що підкріплено відповідними актами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сороко В. И. Реле железнодорожной автоматики и телемеханики. / В. И. Сороко — М. : НПФ «ПЛАНЕТА», 2002 — 696 с.
2. Аркатов В. С. Ремонтно-технологический участок СЦБ. / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, И. Е. Дмитренко — М.: Транспорт, 1987. — 224 с.
3. ЦШ-10/01 Аналіз експлуатаційної роботи господарства сигналізації та зв'язку Придніпровської залізниці за 12 місяців 2010 року. Відокремлений структурний підрозділ “Служба сигналізації і зв'язку”, від 10.01.2011.
4. ЦШ/14/546 Аналіз експлуатаційної роботи галузі автоматики, телемеханіки та зв'язку за 9 місяців 2011 року, від 01.11.2011.
5. Чепцов М. Н. Критерии опасных отказов микропроцессорных устройств управления и контроля положения стрелки / М. Н. Чепцов, С. А. Радковский // 3б. наук. праць ДонІЗТ. – № 13, –2008. – С. 57-62.
6. ЦШ/0046 Типовой проект організації роботи ремонтно-технологічної дільниці дистанції сигналізації та зв'язку, затверджений наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 08.11.2006 № 664-ЦЖ.
7. ЦШ-0060 Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). затверджена наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 07.10.2009 № 090-ЦЖ.
8. ЦШ/0042 Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування, затверджена наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 26.04.2006 № 347-ЦЖ.
9. ЦШ/0048 Інструкція з технічного обслуговування пристроїв механізованих і автоматизованих сортувальних гірок на залізницях України, затверджена наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 12.12.2006 № 491-Ц.
10. ЦШ/0022 Інструкція з утримання технічної документації на пристрої сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) на залізницях України, затверджена наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 22.08.2001 № 457-Ц.
11. ЦШ/0030 Правила безпечної експлуатації пристроїв автоматики, телемеханіки та зв'язку на залізницях України, затверджені наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 17.11.2003 № 288-Ц.
12. Никитенко А. Г. Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов / А. Г. Никитенко — М. : Энергия, 1974. — 136 с.
13. Андреевских А. В. Оптимизация контроля механических параметров электромагнитных реле / А. В. Андреевских // Автоматика, информатика, связь. — 2003. — № 2. — С. 14-17.
14. Совершенствование методов обслуживания и эксплуатации устройств СЦБ: Отчет по НИР / ЦНИИ МПС. — 553-У-76-78. — Свердловск, 1978. - 162 с.
15. Аппаратура СЦБ РМ32 - ЦШ 09.26 -84 Главное управление сигнализации и связи : [Технические указания по ремонту] / Сост.: Я. Ю. Плавник — М. : Транспорт. 1986. — 88 с.
16. Типовые нормы времени на проверку и ремонт аппаратуры сцб в рту Главное управление сигнализации, связи и вычислительной техники : [Нормативное производственно-практическое издание] / Ред М. И. Ройтман — М. : Союзбланкоиздат. 1990. — 56 с.
17. Инструкция по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки (ЦШ/4616). — М. : Транспорт, 1989. — 80 с.
18. Бальшем Е. И. О разработке стендов для КИПов. / Бальшем Е. И. // Автоматика, телемеханика и связь. — 1980. — № 8. — С. 33-34.
19. Пик Р. Расчет коммутационных реле / Р. Пик, Г. Уэйгар [пер. с англ. В. А. Погорельского] —

М. : Госэнергоиздат, 1961. — 576 с.

20. Архипов Е. В. Справочник электромонтера СЦБ. / Е. В. Архипов, В. Н. Гуревич — М. : Транспорт, 1990. — 287 с.

21. Витенберг М. И. Расчет электромагнитных реле / М. И. Витенберг — М. : Энергия, 1975. — 416 с.

22. Абрамов О. В. Допуски и номиналы / О. В. Абрамов — М : Наука. 1976. - 156 с.

23. Подгайченко М. С. Эксплуатационно-технические требования к реле СЦБ / М. С. Подгайченко, Р. Ш. Ягудин // Автоматика, телемеханика и связь. — 1992. — № 9. — С. 19-20.

24. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е / Г. В. Дружинин — М. : Энергия, 1977. — 536 с.

25. Кузнецов В. Г. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання [навчальний посібник] / В. Г. Кузнецов, О. Г. Галкін, О. В. Єфімов, О. О. Матусевич. — Дн-ськ : Вид-во Маковецький, 2009. — 248 с.

26. Кузнецов В. Г. Анализ надёжности тяговых трансформаторов по данным микропроцессорных счётчиков "Альфа" / В. Г. Кузнецов // Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта : Зб.наук.пр. — 1999. — С.52-58.

27. Кузнецов В. Г. Визначення факторів, що впливають на довговічність стійок залізобетонних опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.-2008.-№19.- С.55-60.

28. Иванов Л. П. Оптика рассеивающих сред / Л. П. Иванов — Минск : Наука и техника, 1969. — 448 с.

29. Переборов А. С. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: Учебник для вузов / А. С. Переборов, А.М.Брылеев, В. В. Сапожников и др — М. : Транспорт, 1984. — 384 с.

30. Сапожников В. В. Дискретные устройства ж. д. АТС / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов — М. : Транспорт, 1988 . — 255 с.

31. Титце У. Полупроводниковая схемотехніка / У. Титце // Справочное руководство : [пер. с нем.].— М. : Мир, 1983. — 512 с.

32. Разгонов А. П. Исследование работы импульсных реле / А. П. Разгонов, К. П. Шелегов, В. Д. Савельев // Автоматика, телемеханика, связь. — 1976. — №4. — С. 15-17.

33. Бубнов В. Д. Устройства СЦБ, их монтаж и обслуживание : Полуавтоматическая и автоматическая блокировка / В. Д. Бубнов, В. С. Дмитриев — М. : Транспорт, 1981. — 263 с.

34. Аппаратура СЦБ. Технологический процесс ремонта РМ32-ЦШ 09. 36— 85.

35. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник. В 2-х томах / В. И. Сороко, Б. А. Разумовский — М. : Транспорт, 1981, — 399 с.

36. Устинский А. А. Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте / А. А. Устинский, Б. М. Степенский, Н. А. Цыбуля и др. Учебник для вузов ж.-д. трансп. — М. : Транспорт, 1985. — 439 с.

37. Пат. на винахід 70568 Україна, МПК(2006), G 01B 7/02, G 05 B 23/02. Пристрій для вимірювання переміщення якоря електромагнітного реле / Разгонов А. П., Андреевських О. В., Бондаренко Б. М.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. – №20031211242 заявл. 09.12.2003 ; опубл. 25.04.2007. Бюл. №5.

38. Дек. Пат. 7850 Україна, G 01 B7/02, G05B23/02. Пристрій для вимірювання механічних параметрів електромагнітного реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевських, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №a20041109779 заявл. 29.11.2004 ; опубл. — 15.07.05. Бюл.№ 7.

39. Разгонов А. П. Многоканальный цифровой метод диагностики реле / А. П. Разгонов,

- А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый, А. Ю. Журавлев // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — 2007. — № 18. — С. 16-21.
40. Дек. Пат. 11886 Україна, G 01 R27/20, F25D5/00. Спосіб автоматичного контролю та визначення механічних параметрів електромагнітного реле / Разгонов А. П., Андреевских А. В., Бондаренко Б. М., Безрукавый Д. А.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №u200506530 заявл. 04.07.2005 ; опубл. — 16.01.06, Бюл. № 1.
41. Дек. Пат. 11888 Україна, G 01 B7/02, A62B17/00. Спосіб визначення механічних параметрів електромагнітного реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №u200506533 заявл. 04.07.2005 ; опубл. — 16.01.06 року. Бюл. № 1.
42. Гордон А. В. Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская — М — Л. : Госэнергоиздат, 1960. — 447 с.
43. Пат. на винахід 84892 Україна, МПК(2006), H 01 H 49/00, G 05 B 23/02. Спосіб контролю механічних параметрів багатоконтактного реле / Разгонов А. П., Андреевських О. В., Бондаренко Б. М.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №a200607144 заявл. 20.06.2006 ; опубл. 10.12.2008. Бюл. №23.
44. Пат. на винахід 85520 Україна, МПК(2009) G 01 L 3/00, F 16 A 15/00. Спосіб визначення маси противаги при статичному балансуванні / Бондаренко Л. М., Бондаренко Б. М.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №a200707114 заявл. 25.06.2007 ; опубл. 26.01.2009. Бюл. №2.
45. Сотсков Б. С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств / Б. С. Сотсков — М. : Энергия, 1965. — 576 с.
46. Дек. Пат. 11179 Україна, G 01 R 27/20. Спосіб діагностики роботи контактних груп багатоконтактного реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №u200505284 заявл. 03.06.2005 ; опубл. — 15.12.2009. Бюл. № 12.
47. Разгонов А. П. Контроль механических параметров электромагнитных реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко // 3б. Наук. Пр. Донецького інс-ту залізн. трансп. — 2005. — № 4. — С. 41-48.
48. Разгонов А. П. Цифровой аппаратно-программный комплекс диагностики реле железнодорожной автоматики / А. П. Разгонов, Б. М. Бондаренко, В. И. Профатилов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2010. — № 3 . — С. 42-47.
49. Муравин В. М. Ремонт аппаратуры СЦБ / В. М. Муравин, Е. Ц. Полтораки — М. : Транспорт, 1965. — 316 с.
50. Разгонов А. П. К оценке сил трения в моменты трогания и остановки якоря реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — 2007. — № 14. — С. 12-15.
51. Кухливский В. А. Автоматизированная система измерения кривизны железнодорожного пути на основе гироскопа / В. А. Кухливский, В. Н. Купрас, Б. М. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — 2007. — № 18. — С. 7-11.
52. Гордин Е. М. Основы автоматики и вычислительной техники : [Учебник для электротехн. спец. техникумов] / Е. М. Гордин, Ю. Ш. Митник, В. А. Тарлинский, М. : Машиностроение, 1978. — 303 с.
53. А. с. 1091123А СССР, G 05 B 23/02. / Устройство для измерения механических параметров электромагнитных аппаратов / А. П. Разгонов, В. С. Лучинин, В. Я. Кизяков (СССР). — №(21)3228481/24-07; заявл. 29.12.80; опубл. 07.05.84, Бюл. № 17. — 5 с.
54. А. с. 1486761А1 СССР, G 01 B 7/02. / Устройство для измерения перемещения якоря электромагнитных реле / А. П. Разгонов, В. Я. Кизяков, А. Н. Байдуж (СССР). — №(21)4294402/24-28; заявл. 05.08.87; опубл. 15.06.89, Бюл. № 22. - 5 с.

55. Стенд для проверки реле СЦБ. Разработка предложений по созданию стенда на базе КТС-ЛИУС-2. Отчет по НИР / ДИИТ. — 353/3803. — Днепропетровск, 1983. — 54 с.
56. Совершенствование макета стенд для автоматической проверки электрических параметров реле СЦБ. Отчет по НИР / ДИИТ. — 353/3803. — Днепропетровск, 1984. — 50 с.
57. Разгонов А. П. Полуавтоматический стенд для контроля и измерения параметров реле / А. П. Разгонов Межвузовский сборник научных трудов // ДИИТ. — Днепропетровск : Транспорт. — 1985. — С.11-20.
58. Кизяков В. Я. Измерительно-вычислительный комплекс для контроля и измерения параметров электромагнитных реле / В. Я. Кизяков, А. Н. Байдуж Совершенствование и повышение надежности железнодорожных систем автоматики, телемеханики и связи // Межвузовский сборник научных трудов. — Днепропетровск. — 1990. — С.41-48.
59. Разгонов А. П. Стенд для автоматической проверки параметров реле СЦБ / А. П. Разгонов, А. Н. Байдуж // Автоматика, телемеханика и связь. — 1991. — № 2. — С.13-16.
60. Грачев Г. Н. Автоматизированный комплекс ремонтно-технологического участка для проверки реле и релейных блоков / Г. Н. Грачев, К. О. Колюжный, Ю. А. Липовецкий // Автоматика, телемеханика и связь. — 1993. — № 5. — С.19-21.
61. Профатилов В. И. Совершенствование технологии обслуживания нейтральных реле железнодорожной автоматики на основе автоматизации измерения их параметров: Дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Профатилов Владимир Иванович. — Д., 2002. — 160 с.
62. Vasavi Electronics. Automatic test equipment for Relay : [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.vasavi.com>.
63. Manufacture research Design. Relay Pro - Automated Relay Tester : [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.mrd.com.au>.
64. Омский государственный университет путей сообщения. Научная работа кафедры "Автоматика и телемеханика" : [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.omgups.ru/structure/ait/science_4.html
65. Росжелдор проект. Автоматизированные стенды : [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://gtss.rzdp.ru/>.
66. Шаповалов В. М. Применение волоконной оптики для построения контрольно-измерительных устройств / В. М. Шаповалов //Труды УЭМИИТ, Свердловск, 1970. — С.57-61
67. Юшин А. М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги Справочник. Т. 1 / А. М. Юшин М. : РадиоСофт, 1998. — 512 с.
68. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф [Пер. с англ. Изд.2, испр.] — М. : Наука, 1973. — 720 с.
69. Бонч-Бруєвіч В. Л. Фізика напівпровідників / В. Л. Бонч-Бруєвіч, С. Г. Калашников. — М. : 1977. — 672 с.
70. А. с. 1068702 (СССР), МПК7 G01B11/02. / Бесконтактный способ определения положения кромки предмета / И. А. Аронов, Э. Ш Зельман — №3222726; заявл. 12.12.1980; опубл. 23.01.1984, Бюл. № 3. — 5 с.
71. Разгонов А. П. Моделювання оптичних вимірів електромагнітного реле / А. П. Разгонов, В. В. Лагута, Б. М. Бондаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2011. — № 5. — С. 68 — 73.
72. Годжаев Н. М. Оптика / Н. М. Годжаев — М : Высшая школа, 1997. — 432 с.
73. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика. т. IV / Д. В. Сивухин — М. : Наука, 1980. — 752 с.
74. Уфимцев П. Я. Основы физической теории дифракции / П. Я. Уфимцев — М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. — 352 с.
75. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг, 5 изд. — М. : Наука, 1976. - 928 с.
76. Бондаренко Б. М. Обґрунтування оптимальних характеристик оптичного каналу

- вимірювання механічних параметрів електромагнітного реле / Б. М. Бондаренко, А. П. Разгонов, В. И. Профатилов // Вісник ДІІТу ім. В. Лазаряна — 2009. № 29 . — с. 121—125.
77. Разгонов А. П. Контроль механических параметров электромагнитных реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко // Збірник наукових праць Донецький інститут залізничного транспорту. — 2005. — № 4 . Донецьк: УкрДАЗТ — С. 41-48.
78. Гордов А. Н. Основы метрологии. Учебное пособие. / А. Н. Гордов, Г. Н. Лукьянов, В. Г. Парфенов, А. Ю. Потягайло, А. В. Шарков. — Л. : ЛИТМО, — 1983. — 240 с.
79. Разгонов А. П. Компьютерная технология контроля механических параметров электромагнитного реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2005. — № 5 . — с. 102 — 103.
80. Теория и применение цифровой обработки сигналов [пер. с англ. Б. Гоулд под ред. Ю. И. Александрова] — М. : Мир, 1982. — 848 с.
81. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани — СПб. : Невский Диалект, 2001. — 557 с.
82. Бондаренко Б. М. Способы определения параметров электромагнитных реле / Б. М. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — 2007. — № 15. Дніпропетровськ: ДНУЗТ — С. 7-11.
83. Разгонов А. П. Многоканальный цифровой метод диагностики реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый, А. Ю. Журавлев // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — 2007. — № 17. — С. 43-47.
84. Чепцов М. Н. Синтез модели безопасного функционального элемента / М. Н. Чепцов, А. Б. Бойник // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2008. — №5-6. — С. 89-95.
85. Ильюшин А. Л. Соппротивление материалов /А. Л. Ильюшин, В. С. Ленский — М. : Физматгиз, 1959. — 371 с.
86. Андреевских А. В. Метод расчета механической характеристики малогабаритного реле / А. В. Андреевских // Сборник научных трудов РГУПС. Перспективные технологии и технические средства управления перевозками на железнодорожном транспорте. — 2002. — №2. — С.82-89.
87. Тутубалин В. Н. Теория вероятностей и случайных процессов / В. Н. Тутубалин — М. : Изд-во МГУ, 1992. — 400 с.
88. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель — М. : Наука, 1969. - 576 с.
89. Алексенко А. Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем / А. Г. Алексенко, Е. А. Коломбет, Г. И. Стародуб — М. : Радио и связь, 1985. - 256 с.
90. Еськова Л. М. Основы метрологии и оптические измерения / Л. М. Еськова. — СПб : СПб ГИТМО (ТУ) — 1999. — 68 с.
91. Лившиц Э. М. Оптические измерения и исследования оптических систем / Э. М. Лившиц. — Л. : ЛИТМО, — 1986. — 111 с.
92. Коллакот Р. А. Диагностирование механического оборудования [пер. с англ. под ред. Ю. Н. Мясникова]. — Л. : Судостроение, 1980. — 281 с.
93. Сафарбаков А. М. Основы технической диагностики: учебное пособие. / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов — Иркутск : ИрГУПС, 2006. — 216 с.
94. Ландау Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц — М. : Наука, 1988. — 512 с.
95. Бондаренко Б. М. Методы проверки реле с помощью измерительного диагностического комплекса / Б. М. Бондаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2009. — № 4. — С. 127 - 133.
96. Морозов Г. Л. Виброшумова діагностика електромагнітного реле / Г. Л. Морозов, А. П. Разгонов, Б. М. Бондаренко // Вісник ДІІТу ім. В. Лазаряна — 2010. — № 32. — С. 206-211.

97. Контроль шума в промышленности [под ред. Дж. Д. Вебба. пер. с англ]. — Л. : Судостроение, 1981. — 312 с.
98. Клюкин И. И. Акустические измерения в судостроении / И. И. Клюкин, А. Е. Колесников — Л. : Судостроение, 1966. — 395 с.
99. Кузнецов В. Г. Визначення науково обгрунтованого значення діагностичного параметру при віброакустичному методі діагностики залізобетонних опор / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях // Залізничний транспорт України. — 2008. — №3. — С.46-50.
100. Кузнецов В. Г. Визначення необхідної кількості вимірів для вдосконаленого віброакустичного методу діагностики залізобетонних опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. — 2008. — С.58 - 62.
101. Сивухин Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин — М. : Наука, 1979. — Т. I Механика. — 520 с.
102. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов — СПб. : Питер, 2008. — 320 с.
103. Растринин Л. Н. Метод коллективного распознавания / Л. Н. Растринин, Р. Х. Эренштейн — М. : Энергоиздат, 1981. — 80 с.
104. Аркатов В. С. Теория распределения магнитодвижущей силы (МДС), создаваемой ампер-витками намагничивающей обмотки по участкам магнитопровода / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов — М. : Оргсерв., 2005. —160 с.
105. Антонов В. Г. Средства измерений магнитных параметров материалов / В. Г. Антонов, Л. М. Петров, А. П. Щелкин — Л. : Энергоатомиздат, 1986. —216 с.
106. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию / Б. Т. Поляк — М. : Наука, 1983. — 384 с.
107. Измеритель временных параметров реле цифровой Ф291. Руководство по эксплуатации (ЗПБ.418.002 РЭ).
108. Профатилов В. И. Теоретические аспекты автоматизированного измерения характеристик электромагнитного реле / В. И. Профатилов, В. И. Гаврилюк // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті. — 1998. — № 4. — С. 67-68.
109. Профатилов В. И. Теоретические обоснования автоматизированного измерения динамических характеристик реле в железнодорожной автоматике / В. И. Профатилов, В. И. Гаврилюк // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті. — 1998. — № 6. — С. 4-5.
110. Профатилов В. И. Моделирование электромагнитных процессов в реле железнодорожной автоматики / В. И. Профатилов, В. И. Гаврилюк // Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта: Межвузовский сборник научных трудов. — Днепропетровск : Січ. — 1999. — С. 100-104.
111. Гаврилюк В. И. Автоматизация контроля параметров нейтральных реле железнодорожной автоматики / В. И. Гаврилюк, В. И. Профатилов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2002. — № 4,5. — С. 83-86.
112. Пат. 40396А Україна, МКИ H01 H49/00. Спосіб вимірювання контактного натискання замикаючих контактів електромагнітного нейтрального реле залізничної автоматики / В. І. Гаврилюк, В. І. Профатилов. — № 2001010026; Заявлено 03.01.01; Опубл. 16.07.01, Бюл. № 6. — 3 с.
113. Пат. 41045А Україна, МКИ H01 H49/00. Спосіб вимірювання залежності значення повітряного зазору між якорем та осердям електромагнітного реле від часу / В. І. Гаврилюк, В. І. Профатилов. — № 2001010411; Заявлено 19.01.01; Опубл. 15.08.01, Бюл. № 7. — 3 с.
114. Пат. 41178А Україна, МКИ H01 H49/00. Спосіб вимірювання значення повітряного зазора між якорем та осердям електромагнітного реле / В. І. Гаврилюк, В. І. Профатилов. — №

- 2001031866; Заявлено 20.03.01; Опубл. 15.08.01, Бюл. № 7. — 3 с
115. А. с. 190484 СССР, МПК Н 01h В 21g, 4/05. Устройство для контроля перемещения якоря электромагнитного реле / П. И. Комендантов (СССР). — №1047642/24-7; заявл. 03.01.66; опубл. 29.07.66, Бюл. № 2. — 5 с.
116. А. с. 190485 СССР, МПК Н 01h В 21g, 4/05. Устройство испытания реле в динамическом режиме / П. И. Комендантов (СССР). — №1048534/26-24; заявл. 10.01.66; опубл. 29.07.66, Бюл. № 2. — 2 с.
117. А. с. 331436 СССР, М.Кл Н 01h В 47/00. Устройство для испытания реле на срок службы / В. А. Комков, С. И. Кострюков (СССР). — №1600854/24-7; заявл. 07.07.70; опубл. 07.03.72, Бюл. № 9. — 4 с.
118. А. с. 608105 СССР, М.Кл G 01 R 19/00 // Н 01 Н 47/00. Способ измерения тока срабатывания электромагнитных реле / И. М. Гольдберг, Б. М. Френхель (СССР). — №(21)2413110/18-21; заявл. 21.10.76; опубл. 25.05.78, Бюл. № 19. — 2 с.
119. А. с. 613293 СССР, М.Кл G 05 В 23/02. Способ измерения растворов и провалов контактов электромагнитных коммутационных аппаратов / А. В. Синельник (СССР). — №(21)2441274/24-07; заявл. 06.01.77; опубл. 30.06.78, Бюл. № 24. — 3 с.
120. А. с. 809069 СССР, М.Кл G 05 В 23/02. Устройство для контроля рабочих зазоров электромагнитного реле / А. П. Разгонов, Н. Н. Белобордов, В. С. Лучинин, Н. И. Пивоварчик (СССР). — №(21)2453318/24-07; заявл. 17.02.77; опубл. 28.02.81, Бюл. № 8. — 5 с.
121. А. с. 845190 СССР, М.Кл Н 01 Н 47/00. Устройство контроля контактов реле / И. Г. Гумеров, В. М. Крулик, А. А. Потапов (СССР). — №(21)2736258/18-21; заявл. 11.03.79; опубл. 07.07.81, Бюл. № 25. — 3 с.
122. А. с. 847392 СССР, М.Кл Н 01 Н 47/00 G 05 В 23/02. Устройство для измерения времени переброса переключающих контактов коммутационного изделия / Е. И. Ботов, М. В. Маслов (СССР). — №(21)2799015/24-07; заявл. 16.07.79; опубл. 15.07.81, Бюл. № 26. — 3 с.
123. А. с. SU 1023429А СССР, М.Кл Н 01 Н 47/00 G 05 В 23/02. Устройство для измерения времени переброса переключающих контактов коммутационного изделия / М. В. Маслов (СССР). — №(21)3346826/24-07; заявл. 15.10.81; опубл. 15.06.83, Бюл. № 22. — 5 с.
124. А. с. SU 1163381А СССР, Н 01 Н 47/00. Устройство для контроля контактов реле / Г. Г. Угнивенко (СССР). — №(21)3509006/24-07; заявл. 03.11.82; опубл. 23.06.85, Бюл. № 23. — 4 с.
125. А. с. SU 1265879А СССР, Н 01 Н 49/00, G 05 В 23/02. Устройство для измерения межконтактного зазора электромагнитного реле / С. А. Манукян (СССР). — №(21)3899860/24-07; заявл. 23.05.85; опубл. 23.10.86, Бюл. № 39. — 3 с.
126. А. с. SU 1631621А1 СССР, Н 01 Н 49/00. Способ определения зазора переключающей контактной группы электромагнитного реле / И. М. Гольдберг, Б. М. Френкель (СССР). — №(21)4655407/07; заявл. 24.02.89; опубл. 28.02.91, Бюл. № 8. — 4 с.
127. А. с. SU 1690019А1 СССР, Н 01 Н 49/00. Способ прогнозирующих испытаний и контроля качества электромагнитных реле / С. И. Бакулин, В. А. Питателев, П. А. Морозов, М. С. Денин, В. С. Элинсон, М. Г. Даулатов (СССР). — №(21)4679501/07; заявл. 18.04.89; опубл. 07.11.91, Бюл. № 41.
128. А. с. SU 1697136А1 СССР, Н 01 Н 49/00. 11/04. Способ измерения межконтактного зазора электромагнитного реле / М. И. Баскир, И. М. Гольдберг (СССР). — №(21)4725174/07; заявл. 01.08.89; опубл. 07.12.91, Бюл. № 45. — 2 с.
129. А. с. SU 1795525А1 СССР, Н 01 Н 47/00. G 01 R 19/00. В 61 L 23/16. Способ контроля срабатывания электромагнитного реле / Е. М. Тарасов, Н. Е. Федоров (СССР). — №(21)4765038/11; заявл. 5.12.89; опубл. 15.02.93, Бюл. № 6. — 3 с.
130. А. с. SU 1658832А3 СССР, Н 01 Н 49/00. Н 01 F 7/18. F 16 K 31/06. Способ коммутационного контроля электромагнитных клапанов, например, при электрогидравлическом

- управлении крепью / У. Трокс, В. Куссель, М. Ройтер, Й. Кёниг (СССР). — №(21)4355931/07; заявл. 07.05.88; опубл. 23.06.91, Бюл. № 23. — 3 с.
131. А. с. 2074439 Ru. CI, 6H01H49/00 B61L 23/16. Способ измерения механических перемещений в электромагнитных реле / Г. Н. Грачев, К. О. Коллюжный, Ю. А. Липовецкий (Ru). — №94025952/07; заявл. 12.07.94; опубл. 27.02.97, Бюл. № 3. — 7 с.
132. А. с. 2144233 Ru. 7H01H49/00. Способ контроля состояния реле / А. Г. Горбков — №97116908/09; заявл. 14.10.97; опубл. 10.01.00, Бюл. № 2. — 5 с.
133. А. с. 2265541 Ru. МПК7 B61L23/04. Релейно-компьютерная централизация / Ю. И. Полевой, Л. В. Полевая, В. Н. Яковлев, Е. М. Тарасов, В. А. Смышляев, В. Б. Гуменников, Н. В. Кандалин, Е. М. Сахарова — №2003108203/11; заявл. 27.09.04; опубл. 10.12.05, Бюл. № 24. — 3 с.
134. А. с. 94025952 Ru. МПК6 H01H49/00, B61L23/16. Способ измерения механических перемещений в электромагнитных реле / Г. Н. Грачев, К. О. Коллюжный, Ю. А. Липовецкий — №94025952/07; заявл. 12.07.94; опубл. 27.04.96, Бюл. № 8. — 7 с.
135. Ваганов Р. Б., Каценеленбаум Б. Ж. Основы теории дифракции — М. : Наука, 1982. — 272 с.
136. Дек. Пат. 70568 Україна, G 01 B7/02, G05B23/02. Пристрій для вимірювання переміщення якоря електромагнітного реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №20031211242 заявл. 09.12.2003 ; опубл. — 15.10.04. Бюл. № 10.
137. Пат. на кор. мод. 35716 Україна, МПК(2006), G 01R 27 /20. Спосіб автоматизації контролю механічних параметрів електромагнітного реле / А. П. Разгонов, О. В. Андреевських, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавий.; заявник і патентовласник ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна. — №a200607095 заявл. 26.06.2006 ; опубл. 10.10.08. Бюл. № 19.
138. Алексеев Е. Р. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9 / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова — М : ИТ Пресс, 2006. — 496 с.
139. Лоусон Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон [пер. с англ.]. — М. : Наука, 1986. — 232 с.
140. Демидович Б. Л. Основы вычислительной математики / Б. Л. Демидович, И. А. Марон — М. : Наука, 1970. — 663 с.
141. Курс дифференциального и интегрального исчисления / [сост. Г. М. Фихтенгольц в 3-х томах, том II] — М. : Наука, 1964. — 800 с.
142. Ильин В. А. Основы математического анализа Часть 1 / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк — М. : Наука, 1982. — 616 с.
143. Дольник А. Г. Микрофоны / А. Г. Дольник, М. М. Эфруси : Справочник — М. : Энергия, 1967. — 32 с.
144. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов — М. : Машиностроение, 1981. — 240 с.
145. Сотсков Б. С. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры / Б. С. Сотсков — М — Л. : Госэнергоиздат, 1950. — 217 с.
146. Разгонов А. П. Акустичний моніторинг електромагнітних реле / А. П. Разгонов, Г. Л. Морозов, Б. М. Бондаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2011. — №2. — С. 85-93.
147. Разгонов А. П. Проверка реле с помощью измерительного диагностического комплекса / А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, В. И. Профатилов, Б. М. Бондаренко // Автоматика, связь, информатика. — 2009. — № 10. Москва : РЖД — С. 14-17.
148. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин — М. : Наука, 1978. - 512 с.
149. Разгонов А. П. Метод автоматизированного определения контактного давления реле железнодорожной автоматики / А. П. Разгонов, Б. М. Бондаренко, В. И. Профатилов //

Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. — 2011. — № 1. — С. 31-36.

150. Хольм Р. Электрические контакты / Р. Хольм; [пер. с англ.]. — М. : Изд - во иностр. лит., 1961. — 464 с.

151. Шишенок Н. А. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники / Н. А. Шишенок, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский. — М. : Сов. радио, 1964. — 551 с.

152. Большая советская энциклопедия. — М. : Советская энциклопедия. 1969 - 1978. - 20000 с.

153. Авдеевский В.С. Надежность и эффективность в технике. Том 9 Техническая диагностика : Справочник в 10 т. Т.9. Техническая диагностика / В. С. Авдеевский, В. В. Ключева, П. П. Пархоменко. — М. : Машиностроение, 1989. — 352 с.

154. Dengel D. Wichtige Gesichtspunkte fur die Hartemessung nach Vickers und nach Knoop im Bereich der Kleinlast - und Mikroharte / D. Dengel — Z.f. Werkstofftechnik 4 (1973), PP. 292-298.

155. 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.

ДОДАТОК А

Склад ВДК

Рис. А.2 Склад вимірювально-діагностичного комплексу:

1 – вимірювальна чарунка; 2 – блок живлення; 3 – аналогово-цифровий перетворювач; 4 – комп'ютер

Рис. А.3 Корпус вимірювальної чарунки із розташованим в ньому блоком випробуваного реле, вимірювальними блоками та вузлами

Рис. А.4 Монтажні плати блока живлення

Рис. А.5 Склад блока живлення

Рис. А.6 Скануюча платформа і схема формування напруги положення

Рис. А.7 Принципова схема електричних з'єднань скануючої платформи

Рис. А.8. Принципова схема блока навантажень

Рис. А.9 Монтажна плата та загальний вигляд блока навантажень

Рис. А.10 Принципова схема блока спряження

Рис. А.11 Монтажна плата та загальний вигляд блоку спряження

Рис. А.12 Принципова схема блоку управління

Рис. А.13 Монтажна плата і загальний вигляд блоку управління

Рис. А.14 Монтажна плата і загальний вигляд підсилювача оптичного каналу вимірювання

Рис. А.15 Загальний вигляд мікрофонного підсилювача

Рис. А.16 Принципова схема підсилювача оптичного каналу вимірювання

Рис. А.17 Індукційний датчик та його монтажна плата

ДОДАТОК Б

ТАБЛИЦІ СИГНАЛІВ, ВХОДІВ ТА ВИХОДІВ

Таблиця Б.1

Сигнали управління роботою ВДК

D0-D11

напруга на обмотках

((XX00d) 000h-0V

(XX00d) FFFh-25.7V/3=8.57V

D12

коротке замикання

(0d) - ВИМКНЕННЯ

(1d)- КЗ

D13

Обрив живлення на обмотках

(0d)- напруга на обмотках (D0-D11)

(1d) - вимкнення живлення реле (D0-D11 XXXh)

D14

ЖИВЛЕННЯ ДВИГУНА

(0d)-ВЫКЛ

(1d)-ВКЛ

D15

ЗАПис В РЕГІСТР (D0-D7)

0d-1d

D0

D7

ШУНТ

ШУНТ 0

(D0-0d,D7-0d)-(166.7=4.7+62+100)

(D0-0d,D7-1d)-(104.7=4.7+100)

(D0-1d,D7-0d)-(66.7=4.7+62)

(D0-1d,D7-1d)-(4.7)

D1,D2

ВИБІР ОБМОТОК РЕЛЕ

(D2-0d,D1-0d) - (L1, L2- ПОСЛІДОВНО)

(D2-0d,D1-1d) - (L1 - ПІДКЛЮЧАЄТЬСЯ)

(D2-1d,D1-0d) - (L2 - ПІДКЛЮЧАЄТЬСЯ)

(D2-1d,D1-1d) - (L1, L2 - ПАРАЛЕЛЬНО)

D3

УПРавління НАВАНТАЖЕННЯМ КОНТАКТІВ РЕЛЕ

(0d)-45mA

(1d)-0.5A

D4

УПравління Світлодіодною матрицею

(0d)- вимкнення

(1d)- ВВІМКНЕННЯ

D5

РЕВЕРС ДВИГУНА

(0d) - НАЗАД

(1d) - ВПЕРЕД

D6

ШВИДКІСТЬ ДВИГУНА

(0d) - НИЗКА ШВИДКІСТЬ

(1d) - Висока ШВИДКІСТЬ

Таблиця Б.2

Сигнали напруги положення скануючої платформи

D0

D1

ПЛАТФОРМА ПОЗАДУ

ПЛАТФОРМА ПОПЕРЕДУ

(D1-1d,D0-1d)-(НЕМА ЖИВЛЕННЯ)

(D1-0d,D0-1d)-(ПЛАТФОРМА ПОЗАДУ)

(D1-1d,D0-0d)-(ПЛАТФОРМА ПОПЕРЕДУ)

(D1-0d,D0-0d)-(ПЛАТФОРМА ВСЕРЕДИНИ: РУХАЄТЬСЯ АБО СТОЇТЬ)

D2-D15

GND

0

Таблиця Б.3

Аналогові сигнали ВДК на вході АЦП

X1

ТИЛОВИЙ - (73) (0-5V), (0-4.5V)

7

X2

ФРОНТОВИЙ -(72) (0-5V), (0-4.5V)

7

X3

ТИЛОВИЙ -(83) (0-5V), (0-4.5V)

8

X4

ФРОНТОВИЙ -(82) (0-5V), (0-4.5V)

8

X5

ТИЛОВИЙ -(53) (0-5V), (0-4.5V)

5

X6

ФРОНТОВИЙ -(52) (0-5V) (0-4.5V)

5

X7

ТИЛОВИЙ -(63) (0-5V), (0-4.5V)

6

X8

ФРОНТОВИЙ -(62) (0-5V), (0-4.5V)

6

X9

ТИЛОВИЙ -(33) (0-5V), (0-4.5V)

3

X10

ФРОНТОВИЙ -(32) (0-5V), (0-4.5V)

3

X11

ТИЛОВИЙ -(43) (0-5V), (0-4.5V)

4

X12

ФРОНТОВИЙ -(42) (0-5V), (0-4.5V)

4

X13

ТИЛОВИЙ -(13) (0-5V), (0-4.5V)

1

X14

ФРОНТОВИЙ -(12) (0-5V), (0-4.5V)

1

X15

ТИЛОВИЙ -(23) (0-5V), (0-4.5V)

2

X16

ФРОНТОВИЙ -(22) (0-5V), (0-4.5V)

2

Y1

НАПРУГА РЕЛЕ (V) (0-8.57V)

Y2

СТРУМ РЕЛЕ -(I) (0-8.57V)

Y3

ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК (0-4.5V)

Y4

ЗВУКОВИЙ ДАТЧИК -(МІКРОФОН) (0 - 0.25V)

Y5

ІНДУКЦІЙНИЙ ДАТЧИК (0-8.57V)

Y6

0 - РЕЗЕРВ

Y7

0 - РЕЗЕРВ

Y8-Y16

0

Таблиця Б.4

Електричні з'єднання аналогового виходу ВДК і входу АЦП

Контакт

АЦП

НАЗВА

LPT

1

21,3

GND

1,14

2

22

X16

2(23)

3
23
X15
3(22)

4
24
X14
4(13)

5
25
X13
5(12)

6
26
X12
6(43)

7
27
X11
7(42)

8
28
X10
8(33)

9
29
X9
9(32)

10
30
X8
10(63)

11
31
X7
11(62)

12
32

X6
12(53)

13
33
X5
13(52)

14
34
X4
25(83)

15
35
X3
24(82)

16
36
X2
23(73)

17
37
X1
22(72)

18
21,3
GND
1,14

19
19
Y1
18-U

20
21,3
GND
1,14

21
18
Y2
17-I

22

21,3
GND
1,14

23
17
У3
16-Опт

24
21,3
GND
1,14

25
16
У4
15-Звук

26
21,3
GND
1,14

27
15
У5
20-резерв

28
21,3
GND
1,14

29
14
У6
19-резерв

30
21,3
GND
1,14

31
13
У7
21-резерв

32
21,3
GND
1,14

ДОДАТОК В

Таблиця В.1

Фізичний зазор при мінімальному струмі реле НМШ-2900

Час

t (с)

Струм

I (мА)

Розрахунковий фізичний зазор за кривою струму δ (мм)

Фізичний зазор виміряний в оптичному каналі δ
(мм)

1

2

3

4

0

0

-

2,20

0,01

2,0

2,53

2,20

Початок руху якоря – 0,015

2,2

2,08

2,19

0,02

5,8

1,9

2,1

0,03

7,8

1,85

2,02

0,04

8,1

1,81

1,95

0,05

8,4

1,77

1,89

0,06

8,2

1,75

1,84

0,07

7,8

1,73

1,7

0,08

7,5

1,71

1,63

0,09

7,5

1,70

1,58

0,1

7,1

1,69

1,53

0,11

6,7

1,65

1,49

0,12

6,3

1,53

1,4

0,13

5,7

1,50
1,2

0,14
4,4
1,47
1

0,15
2,9
0,44
0,54

0,16
3,2
0,42
0,58

0,17
5,8
0,39
0,74

0,18
5,1
0,36
0,58

0,19
4
0,34
0,41

0,2
5,2
0,32
0,55

0,21
5
0,30
0,51

0,22
4,9
0,28
0,41

0,23

3,1
0,26
0,39

0,24
2,7
0,25
0,27

Зупинка якоря - 0,242

1,8

0,24

0,25

0,25
2,9
-
0,25

0,26
3,7
-
0,25

0,27
4,1
-
0,25

Продовж. табл. В.1

1
2
3
4

0,28
5,3
-
0,25

0,29
5,9
-
0,25

0,3

6,5

-

0,25

0,31

7

-

0,25

0,32

7,3

-

0,25

0,33

7,4

-

0,25

Таблиця В.2

Фізичний зазор при номінальному струмі НМШ-2900

Час

t (с)

Струм

I (мА)

Розрахунковий фізичний зазор за кривою струму δ (мм)

Фізичний зазор виміряний в оптичному каналі δ
(мм)

0

0

-

2,2

Початок руху якоря –

0,008

2,8

2,42

2,19

0.01

3,5

2,25

2,16

0.02

6

2,2

2,1

0.03

7,5

1,8

1,75

0.04

7,6

1,5

1,4

0.05

6,8

0,34

0,3

Зупинка якоря –

0.06

3,6

0,24

0,25

0.07

3,8

-

0,25

0.08

4,8

-

0,25

0.09

5,6
-
0,25

0.1
6,5
-
0,25

0.11
7,3
-
0,25

0.12
8,1
-
0,25

0.13
9,1
-
0,25

0.14
9,8
-
0,25

0.15
10,6
-
0,25

0.16
11,3
-
0,25

0.17
11,5
-
0,25

0.18
12
-
0,25

0.19
12,2
-
0,25

0.2
12,2
-
0,25

Таблиця В.3
Часові співвідношення параметрів реле НМШ2- 900

Продовж. табл. В.3

Таблиця В.4.
Співвідношення амплітуд шумових сигналів справного і несправних реле
2.1. При $\delta 0$ справного реле
2.2. При зменшеному $\delta 0$
2.3. При збільшеному $\delta 0$

U, В
 σ^2
 σ
U, В
 σ^2
 σ
U_{ср}, В
 σ^2
 σ

0,048
0,000441
0,021
0,056
0,000783
0,0280
0,04
0,000318
0,0178

0,056
0,000372
0,019
0,072
0,000236

0,0154
0,048
0,000105
0,0102

0,08
0,000201
0,014
0,104
0,000492
0,0222
0,068
0,000210
0,0145

0,08
0,000201
0,014
0,104
0,000492
0,0222
0,068
0,000210
0,0145

0,08
0,000201
0,014
0,108
0,000530
0,0230
0,072
0,000236
0,0154

0,096
0,000116
0,011
0,124
0,000699
0,0264
0,084
0,000321
0,0179

0,096
0,000116
0,011
0,128

0,000745
0,273
0,0848
0,000327
0,0121

0,216
0,00022
0,019
0,28
0,003564
0,579
0,184
0,001539
0,0392

0,224
0,000273
0,017
0,288
0,00377
0,614
0,188
0,001607
0,0401

0,24
0,000397
0,02
0,308
0,004312
0,657
0,204
0,001892
0,0435

0,248
0,000468
0,022
0,312
0,004425
0,665
0,208
0,001967
0,0443

0,288
0,00091
0,03

0,36
0,005891
0,00768
0,24
0,002618
0,0512

0,28
0,00081
0,028
0,352
0,005632
0,0750
0,236
0,002532
0,0503

0,2
0,00013
0,011
0,252
0,002887
0,0537
0,164
0,001223
0,0350

0,2
0,00013
0,011
0,256
0,002979
0,0546
0,168
0,001283
0,0358

0,16
0,000008
0,0029
0,208
0,001967
0,0443
0,136
0,000841
0,0290

0,168
0,000021

0,0046
0,216
0,002121
0,0461
0,14
0,000891
0,0298

0,112
0,000054
0,0074
0,14
0,000891
0,0298
0,092
0,000385
0,0196

0,104
0,000082
0,0091
0,136
0,000841
0,0290
0,088
0,000352
0,0188

0,088
0,000156
0,0125
0,116
0,000612
0,0247
0,076
0,000263
0,0162

0,096
0,000116
0,0108
0,12
0,000653
0,0256
0,08
0,000291
0,0171

0,064

0,000309
0,0176
0,08
0,000291
0,0171
0,052
0,000123
0,0111

Ucp=0,1465
0,00027
0,015
Ucp=
0,187273
0,002037
0,0407
Ucp=
0,12367
0,000888
0,03

ДОДАТОК Г

Динамічні характеристики комутації контактів

Рис. Г.1 Динамічні характеристики комутації рухомих контактів:

- а) – справного реле НМШ- 2 900; б) – при зносі антимагнітного штифта;
- в) – якір затиснутий обмежувальною скобою

На рис. Г.1 представлені динамічні характеристики комутації рухомих контактів справного реле (рис. Г.1, а), при зносі антимагнітного штифта (рис. Г.1, б) і у разі, коли якір затиснутий обмежувальною скобою (рис. Г.1, в). Лінії: а, б, в, г дають можливість візуально оцінити неодночасність роботи контактних груп для кожного з даних випадків. Часовий зазор - д характеризує зміну часу розмикання фронтних груп контактів. У випадку, малої висоти антимагнітного штифта час розмикання фронтних груп контактів збільшився, це обумовлено більшою утримуючою силою при меншому фізичному зазорі (рис. Г.1, б) і відповідає збільшеному часу відпадання якоря реле. Часовий зазор – “е” характеризує час для встановлення надійного контакту з тисовими контактними групами. На діаграмах (рис. Г.1, а, б) між часовими лініями – “в” і “г” (на діаграмах між 1,7 та 2,0 секундою) спостерігається поява і пропажа контакту на протязі близько 200 мС, яка викликана явищем "брязкоту" контактів і пов'язана з амплітудою і часом вібрації якоря, при його відпаданні. На діаграмах (рис. Г.1, в) у контактних групах 61-63 і 81-83 помітно зникнення контакту при відпаданні якоря реле, це обумовлено зменшенням контактного тиску із-за збільшення тертя в рухомій системі реле і, пов'язаного з цим зменшенням максимальної величини фізичного зазора при знеструмленому реле.

ДОДАТОК Д

Рис. Д.1 Графік залежності перехідного опору фронтових контактів нейтральних реле від контактного тиску і сумісного ходу

ДОДАТОК Е

Рис. Е.1 Зміна перехідного опору контактів під час їх сумісного руху (ковзання): а) чистих контактів, б) забруднених контактів

ДОДАТОК Ж

Ж.1 Вимірювання перехідного опору контактів

Перехідним опором контактів реле НМШ та РЕЛ є міжконтактний опір пари срібло-срібло і срібло-вугілля. Його величини знаходяться в області малих опорів (менше 1 Ом). Для вимірювання малих опорів застосовують методи моста постійного струму і амперметра-вольтметра.

Величина перехідного опору контактів залежить від безлічі чинників, у тому числі і від струму, який тече крізь них, тому технічними умовами нормується вимір перехідного опору при струмі 0,5 А та встановлюється час на перевірку [14-16].

Недолік методу постійного струму в тому, що він не задовольняє технічним умовам. Метод же амперметра-вольтметра вимагає у вимірювальній схемі додаткового регульованого джерела струму або напруги.

Для вимірювання перехідного опору контактів в комплексі використаний метод генератора стабільного струму, що підключається до контактів реле [101,102]. Його перевага полягає в тому, що величина струму, що протікає крізь контакти, постійна і не залежить від їх опору. Це дозволяє з більшою точністю реалізувати закон Ома для заданого діапазону виміру. При цьому напруга на контактах прямо пропорційна їх опору. Схема заміщення для методу вимірювання перехідного опору контактів представлена на рис.Ж.1.

У схемі вимірювання є вимірювальні провідники R_p , величина опору яких порівнянна з перехідним опором контактів. Для усунення похибки, провідників, що вносяться опором, використовується 4-х провідна схема вимірів. У ній коло генератора стабільного струму GSI має свою пару провідників R_{pi} , а схема вимірювання АЦП свою R_{pv} , що підключається безпосередньо до контактів реле R_k .

Рис. Ж.1 Схема заміщення для вимірювання перехідного опору контактів

Метод реалізується пропусканням струму і вимірюванням напруги на контактах реле R_k . Проте струм протікає через один набір провідників R_{pi} , що підводять його, тоді як напруга сприймається іншим набором провідників R_{pv} . Напруга вимірюється безпосередньо на контактах, а не в тій точці, де підключене джерело струму. Це означає, що опір провідників, що підводять, повністю виключається з вимірювальної схеми.

Вхідний опір АЦП на 10 порядків перевищує опір провідників, тому їх впливом на точність вимірів в такій схемі можна нехтувати.

Дослідження підтверджують залежність перехідного опору контактів від контактного тиску [21,50,149]. Для автоматизації і контролю процесу вимірювання контактного тиску пропонується скористатися графоаналітичним методом. Залежності перехідного опору від контактного тиску для кожного окремого типу реле отримують та зберігають у числовому вигляді для зрівняння з даними отриманими під час профілактичних перевірок. Трьохмірний графік залежності перехідного опору фронтів контактів нейтральних реле від контактного тиску і сумісного ходу представлений на рис. Д.1 у додатку Д.

Отримано параметри перехідного опору контактів можна використовувати для діагностування реле за параметром контактного тиску використовуючи залежності перехідного опору контактів від контактного тиску для окремого типу реле, а сумісно з методами запропонованими у параграфах 3.2 - 3.5 – для усунення похибки вимірювання.

Ж.2 Вимірювання опору обмоток і напруги (струму) підйому і відпускання якоря реле

В лабораторії опори обмоток реле, напруга (струм) підйому і відпускання вимірюється окремо, кожен параметр - своїм методом і за допомогою своїх схем. Вимірювання опорів обмоток за існуючою технологією здійснюється методом моста постійного струму, а напруги (струму) підйому і відпускання – методом амперметра-вольтметра [34,105]. Для скорочення часу перевірки підвищення рівня надійності і контролю, метод вимірювання повинен забезпечити високу точність і швидкість вимірювання, що може бути виконано шляхом автоматизації процесу вимірювання [18,106]. Але перераховані методи не забезпечують виконання однієї з найважливіших умов – автоматизації процесу вимірювання. Крім того, економічно доцільно поєднати вимірювання перерахованих параметрів в один цикл, за рахунок використання багатоканального АЦП.

Для вирішення досліджуваного завдання в комплексі пропонується використовувати АЦП підключений до швидкісного USB порту комп'ютера. Суть вимірів току та напруги при роботі реле полягає підведенні стабілізованої напруги U_k до котушок реле при цьому вимірюється струм I_k , що протікає крізь обмотки. Оскільки величина U_k задається цифровим кодом, а величина I_k перетворюється в цифровий код, то у будь-який момент часу відомі коди величин U_k і I_k , що дозволяє вимірювати ще декілька електричних параметрів в паралельних каналах АЦП.

Вимірювання опору обмотки здійснюється при сталих значеннях U_k та I_k в обмотці реле і обчисленням опору $R_{обм}$ за законом Ома.

Для вимірювання напруги (струму) повного підйому напругу U_k збільшують до величини, при якій відбувається притягання якоря до упору. Величина U_k (I_k) зафіксована у момент притягання якоря до упору, і є напруга (струм) повного підйому.

Для вимірювання напруги (струму) відпускання U_k встановлюють рівним напрузі перевантаження, а потім зменшують до величини, при якій відбувається розмикання фронтів контактів. Величина U_k (I_k) зафіксована у момент розмикання фронтів контактів, і є напругою (струмом) відпускання.

Метрологічні вимоги забезпечуються за рахунок використання вимірювальної схеми на прецизійних резисторах (R_1 - R_4 , рис. А.9, додаток А), точність якої досягає 99%, при цьому вхідний опір АЦП складає більше 200 Мом і практично не додає похибки, а його роздільна здатність визначається дванадцятьма розрядами.

Перевагою вибраного методу є висока точність за рахунок застосування цифрових методів вимірювання та обчислення за допомогою АЦП та комп'ютера, що надає можливість автоматизації всього технологічного процесу вимірювання параметрів реле.

Ж.3 Графоаналітичний метод визначення параметрів у динамічному режимі роботи реле

Початкові геометричні параметри реле НМШ для перевірочних розрахунків і випробувань прийняті наступні:

(Ж.1)

По формулі Гопкінса магнітний потік визначається з урахуванням магнітних опорів ділянок магнітопроводу, (рис. 2.17) [104]:

(Ж.2)

де F - магніторушійна сила, створювана обмоткою НМШ, що намагнічує.

При розрахунках і дослідження магнітного потоку реле НМШ прийнято допущення, що магнітний потік не виходить за межі лінійної ділянки основної кривої намагнічення.

Перевіримо правильність розрахункових характеристик реле НМШ при цьому використаний наступний алгоритм розрахунку. Визначаються магнітні опори 6-ти ділянок магнітопроводу (рис.2.17), по рівняннях (у яких магнітна проникність стали прийнята $\mu_{ст}$):

Загальний магнітний опір феромагнетика магнітопроводу складає . При цьому якір реле знаходиться під дією струму в обмотці і притиснутий до сердечника.

З першого рівняння, з урахуванням (2.88) для можемо записати, що проникність
(Ж.3)

де - опір і магніторушійна сила (МРС) повітряного зазора, так як: .

Підставляючи в (2.89) параметри (2.87), одержимо, що проникність
(Ж.4)

З (2.90) витікає, що МРС полюсного наконечника, при,
, а .

Значення магнітних опорів наконечника і повітряного зазора реле НМШ ; , при цьому з одержаних рівнянь (Ж.3) і (Ж.4) магнітний потік, що протікає по повітряному зазору і наконечнику при ,
(Ж.5)

Одиничний потік – потік, що створює МРС і проникність, рівні одиниці . На будь-якій ділянці магнітопроводу, магнітний потік при проникності
(Ж.6)

З (Ж.5) і (Ж.6) витікає, що співвідношення потоків свідчить про те, що між магнітним потоком і магнітною проникністю існує лінійна залежність.

Доцільність знаходження одиничного потоку через параметри наконечника очевидна, оскільки на наконечнику МРС завжди рівна . Одиничний магнітний потік забезпечує рівність магнітних проникнень одиниці на всіх ділянках магнітопроводу.

Магнітний потік реле НМШ рівний одиничному потоку, помноженому на величину магнітної проникності, тобто

Із викладеного витікає, що при МРС наконечника і повітряного зазора рівні між собою.

Знайдемо вираз для МРС ділянок магнітопроводу

Магнітний потік, що протікає по магнітопроводу реле НМШ при різних проникності
, ,
(Ж.7)

Звідси витікає, що при будь-якій величині потоку МРС наконечника:

А (Ж.8)

Рівняння (Ж.8) можна записати у вигляді:
(Ж.9)

Перший співмножник (Ж.9) є магнітний опір наконечника при, а другий – потік, що протікає по магнітопроводу при будь-яких значеннях проникності.

МРС на інших ділянках магнітопроводу з урахуванням магнітного опору і потоку (Ж.9)

А, ;

МРС на ярмі: А;

МРС зуба ярма: А.,

МРС Якорі: А.

З розрахунків виходить, що для створення магнітної проникності рівній одиниці на феромагнітних ділянках магнітопроводу, для реле НМШ витрачена МРС:

А (Ж.10)

По магнітопроводу реле типа НМШ, як відмічено в (Ж.6), протікає одиничний магнітний потік із зростанням потоку більше, ніж Вб, вся додаткова МРС, прикладена до всього магнітопроводу, додається до повітряного зазора:

(Ж.11)

При - число витків обмотки МРС, прикладена до зазора (при).

Це відбудеться у випадку, якщо потік досягне величини , що відповідає рівнянню для

визначення магнітної проникності
(Ж.12)

Дамо оцінку параметрів спрацьовування реле НМШ2.900.

Вище відмічено, що при розрахунку сили тяжіння вимагається визначити МРС на всіх ділянках магнітопроводу при одиничному потоці . Виявилось, що сума МРС ділянок феромагнетиків А.

МРС повітряного зазора визначена з урахуванням величини магнітного потоку між якорем і полюсним наконечником, утворюючого задану силу тяжіння якоря, рівну максимальній протидіючій силі з механічної характеристики. Розрахунки сили проведемо по рівнянню Максвела. Зазор між якорем і наконечником прийнятий м, тоді на повітряному зазорі виникає МРС

А (Ж.13)

Максимальна протидіюча сила, згідно вимірюванням, прийнята 10 Н, тоді потік:

Вб (Ж.14)

МРС, створювана ампер-витками котушки реле НМШ А. В цьому випадку струм в обмотці А. При опорі обмотки 900 Ом напругу джерела струму складе В.

Погрішність розрахунків параметрів спрацьовування реле типа НМШ відносно ТУ не перевищує 6%, що дозволяє рахувати розглянуту методику прийнятної при відомих розмірах, довжинах і перетинах ділянок магнітопроводу.

Магнітна проникність стали магнітопроводу в притягнутому положенні якоря визначається з формули (3) . Одержана проникність указує на те, що магнітопровід працює в лінійній частині основної кривої намагнічення феромагнетиків. Реле з поворотним якорем працює при максимальній магнітній проникності в діапазоні 600-800 [3]. Як показали вимірювання, із зростанням струму в обмотці магнітний потік може насичати лише зуб якоря або сам якір, що створює додатковий опір магнітного кола.

Рис. Ж.2 Графік залежності електромагнітної сили і струму в обмотці реле від зазора

Розглянемо графоаналітичний метод розрахунку основних параметрів реле в динамічному режимі роботи реле. На рис. Ж.2 представлені залежності струму, одержані з осцилограм вимірювального комплексу і тягового зусилля реле, зміряного досвідченим шляхом при різних значеннях зазора і струму (табл. 1)

З рис. Ж.2 бачимо, що при русі якоря в великій ступені змінюється струм в обмотці (за рахунок проти-ЕРС) і сила тяги. Хоча струм, що створює потік (Ж.14), значно менше стаціонарного значення, сила тяги все ж таки зростає швидше, за рахунок зменшення фізичного зазора.

Для перевірки достовірності результатів аналітичних розрахунків сили по формулі Максвела, приймемо як базової критичну точку механічної характеристики, подолання якою електромагнітною силою приводить до спрацьовування реле. Ця сила відома, визначається вагою якорі і складає 2,3 Н, при цьому ток 9,73 мА знайдемо з таблиці

Тоді загальна МРС . Магнітний потік в критичній крапці Вб

Визначимо магнітний опір повітряного зазора в критичній крапці :

Рис. Ж.3 Графік залежності магнітної проникності від фізичного зазора

Для знаходження МРС повітряного зазора скористаємося експериментальною залежністю магнітної проникності від фізичного зазора (рис. Ж.3) - єдиною залежністю, використовуваною при графоаналітичному розрахунку зусилля.

При зазорі проникність знайдена аналітично та відповідає (рис. Ж.3)

При цьому МРС повітряного зазора складає: А. Магнітний потік в магнітопроводі досягає

величини $B\delta$, а зусилля H .

Для перевірки достовірності розрахунку визначимо зусилля при зазорі якоря δ , віддаленому від критичної крапки.

По рис. Ж.3 знаходимо проникність μ , потім магнітний опір зазора R_{δ} і МРС зазора Φ_{δ} . Тоді магнітний потік складе $B\delta$, а зусилля H . Опитна залежність дає зусилля 5,21 Н (рис. Ж.2).

Погрішність оцінки потоку і зусилля склала менше 5%, це дозволяє вважати, що вимірювання і розрахунки за допомогою автоматизованого комплексу дозволяють досягти високої достовірності оцінки параметрів, хоча і зажадають побудову відомої залежності при напрузі спрацьовування реле заданого типу (рис. Ж.3).

Ж.4 Перевірка адекватності математичної моделі оптичного вимірювання положення якоря реле на основі неруйнівного контролю

Таблиця Ж.1

Результати вимірювань фізичного зазора різними методами

№ з/п

Задано

Оптичний метод

Люфтмер

№ з/п

Задано

Оптичний метод

Люфтмер

1

2

3

4

1

2

3

4

1.

0.1

0.09

0.09

11.

1.1

1.15

1.0801

2.

0.2

0.18

0.23

12.

1.2

1.25

1.1971

3.

0.3

0.29

0.30

13.

1.3

1.3

1.2730

4.
0.4
0.39
0.39
14.
1.4
1.45
1.4344

5.
0.5
0.49
0.54
15.
1.5
1.5
1.4695

6.
0.6
0.6
0.64
16.
1.6
1.65
1.5726

7.
0.7
0.75
0.71
17.
1.7
1.75
1.6671

8.
0.8
0.85
0.81
18.
1.8
1.8
1.7728

9.
0.9
0.9
0.91

19.
1.9
1.9
1.8936

10.
1.0
1.05
0.97
20.
2.0
1.95
1.9811

Адекватність вказаних характеристик була перевірена за допомогою критерію Вілкоксона на рівні значимості 5 % [87]. Нульова гіпотеза полягала в тому, що дані являються незалежними зразками з ідентичних розподілів з рівними медіанами, альтернативою було те, що вони не мають рівних медіан.

Конкуруючими являються наступні гіпотези: невідомі неперервні функції розподілу $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$, $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ і $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ (табл. Ж.1). При конкуруючій гіпотезі $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$: $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ нижня критична точка

$EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$, (Ж.1)

де $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$; $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ знаходять за таблицею функції Лапласа за рівністю $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$; знак $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ означає цілу частину числа $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$.

При конкуруючих гіпотезах $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ і $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ нижню критичну точку знаходять за виразом (Ж.1), поклавши $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$; відповідно $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$ знаходять за таблицею функції Лапласа за рівністю $EMBED Equation.DSMT4 \mu \xi$.

Аналіз експериментальних даних виконаний за допомогою Matlab показав, що немає підстав відкинути нульову гіпотезу на 5 % рівні значимості.

Ж.5 Перевірка адекватності математичної моделі вимірювання контактного тиску

Адекватність вказаних характеристик (табл. Ж.2) була перевірена за допомогою критерію Вілкоксона на рівні значимості 5 % [87].

Таблиця Ж.2

Результати вимірювань контактного тиску різними методами

Задано

Метод 1

Метод 2

Задано

Метод 1

Метод 2

Задано

Метод 1

Метод 2

Задано

Метод 1

Метод 2

43.94
42.10
44.39
32.84
36.97
36.19
35.50
37.76
38.78
20.12
18.12
17.97

45.36
43.65
45.58
36.85
35.53
35.13
35.61
38.29
36.66
18.69
17.33
17.92

44.03
43.58
43.17
37.44
37.79
35.34
34.55
36.58
39.35
16.10
18.86
17.89

45.52
44.30
42.80
34.56
35.71
35.33
36.66
35.65

38.60
17.92
18.55
18.41

47.78
44.86
43.97
37.83
36.65
36.08
37.24
37.81
38.06
18.80
17.50
18.00

45.53
43.71
44.07
34.99
35.58
35.94
39.58
37.30
35.07
17.38
17.91
18.34

43.73
44.67
44.44
34.47
37.92
34.07
38.31
37.57
36.37
18.72
17.77
17.91

42.44
46.96
44.42
36.34
35.56

35.01
39.15
37.06
35.67
17.07
18.00
17.54

48.05
46.14
42.30
37.18
37.08
35.45
35.61
36.13
37.08
18.09
17.69
17.41

43.16
46.38
43.64
36.83
35.69
35.70
37.60
37.61
35.91
19.37
17.65
18.48

46.31
44.81
43.60
36.54
37.09
35.43
40.03
38.11
36.48
18.34
18.13
17.76

45.88
43.18

41.30
37.06
37.25
36.48
35.80
37.40
38.25
19.12
17.87
18.16

45.49
44.58
42.43
35.44
35.90
37.05
38.25
36.84
35.76
18.06
18.03
17.94

44.86
44.99
44.71
37.24
35.71
36.80
39.36
37.03
35.19
17.39
17.85
17.71

42.75
45.46
42.66
37.12
35.46
36.24
35.08
36.82
36.20
18.46
17.96
18.15

45.69
45.09
44.13
33.19
35.87
36.86
37.90
35.54
36.65
18.05
18.15
17.57

43.75
43.29
41.94
34.96
35.60
36.95
35.32
37.37
37.52
19.92
17.68
18.36

44.04
42.38
44.19
37.70
34.04
36.39
36.12
38.26
37.00
17.26
18.79
18.52

43.93
42.29
44.83
35.35
35.78
37.68
35.77
37.14
36.56

18.09
18.36
18.76

43.00
43.36
45.12
34.89
36.39
35.67
36.07
36.45
37.11
16.68
16.55
18.25

41.38
44.76
43.39
35.54
35.26
36.20
36.43
37.81
35.84
19.46
17.68
18.37

43.08
46.13
42.79
37.67
35.38
35.48
35.45
38.42
37.17
18.59
18.38
18.30

46.72
43.96
44.73
33.74
35.42
35.32

35.84
37.58
37.85
19.28
18.54
17.49

48.41
45.31
43.82
37.41
36.03
35.01
37.93
37.62
36.87
17.77
17.26
17.89

43.91
42.47
43.93
37.44
35.19
35.21
40.09
37.32
37.98
18.41
18.99
18.13

45.39
45.86
45.22
36.92
34.72
34.74
34.15
36.43
36.58
19.17
18.01
17.43

44.95
44.19
45.87

34.83
37.74
35.62
36.50
37.22
37.83
17.74
17.22
17.85

40.36
45.73
42.91
33.97
35.47
35.26
37.63
38.33
35.65
18.51
17.81
17.31

44.41
44.93
43.33
37.64
36.66
37.29
37.90
37.01
36.93
16.73
17.68
17.83

41.99
43.23
43.96
36.74
34.80
36.37
38.76
37.86
37.41
17.74
18.89
18.05

40.50
42.80
44.60
36.22
38.21
34.16
37.24
37.01
35.92
17.89
16.85
18.10

42.46
41.04
45.34
36.33
36.08
36.94
33.78
37.73
35.53
17.37
17.60
18.25

47.70
43.94
44.49
36.73
37.33
35.41
38.24
36.38
36.34
16.58
18.25
18.39

44.20
43.89
43.40
36.66
36.91
34.48
38.66
35.75
36.65
18.26

18.44
17.85

41.64
43.57
44.97
38.15
36.06
36.37
35.98
34.37
38.14
18.22
17.16
18.38

45.58
45.30
44.51
37.19
36.41
36.99
36.41
37.89
35.96
18.56
18.78
18.41

45.08
44.07
43.69
36.16
35.40
36.15
35.92
37.46
37.85
18.87
17.27
17.88

43.32
45.00
44.52
37.76
36.19
36.25
36.70

37.88
36.65
17.21
17.56
18.00

45.23
45.09
44.09
39.41
37.00
35.18
35.27
37.71
36.32
18.24
17.85
18.35

У таблиці Ж.2 контактний тиск задано за допомогою існуючої технології, метод 1 – розраховано з використанням оптичного методу і систем (3.15) і (3.16), метод 2 – розраховано з використанням графоаналітичного методу визначення контактного тиску, додаток (Ж.3).

Нульова гіпотеза полягала в тому, що дані являються незалежними зразками з ідентичних розподілів з рівними медіанами, альтернативою було те, що вони не мають рівних медіан.

При конкуруючій гіпотезі $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$: $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ необхідно знайти по таблиці нижню критичну точку $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$, де $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$. Якщо $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ – немає підстав відкинути нульову гіпотезу. Якщо $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ – нульову гіпотезу відкидають.

При конкуруючих гіпотезах $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ і $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ нижню критичну точку знаходять за виразом (Ж.1), поклавши $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$; відповідно $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$ знаходять за таблицею функції Лапласа за рівністю $EMBED Equation.DSMT4 \mu \S$.

Аналіз показав, що немає підстав відкинути нульову гіпотезу на 5 % рівні значимості.

