

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Л. Б. Жорняк
М. В. Антонова
В. В. Василевський

**ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ АВТОМАТИКИ
ТА КЕРУВАННЯ**

Навчальний посібник

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2022

УДК 621.316.36
Ж81

*Рекомендовано до друку Вченою радою Національного
університету «Запорізька політехніка»
(Протокол № 1 від 31.08.2022 р.)*

Рецензенти:

Нізімов В. Б. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпровського державного технічного університету;

Садовой О. В. – доктор технічних наук, професор кафедри «Електропривод» Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;

Середа О. Г. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Електричні апарати» Національного технічного університету «ХПІ».

Жорняк Л. Б

Ж81 Електричні апарати автоматики та керування / Л. Б. Жорняк, М. В. Антонова, В. В. Василевський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 414 с.

ISBN 978-617-529-377-5

Навчальний посібник присвячений курсу «Електричні апарати автоматики та керування». Розглядаються загальні питання теорії контактних та електромагнітних механізмів, реле автоматики та сигналізації, електричні апарати керування та розподілу енергії, датчики, електромагнітні та магнітні муфти, підвіси та опори. Навчальний посібник призначений для студентів-бакалаврів електротехнічних факультетів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.316.36

ISBN 978-617-529-377-5

© Національний університет
«Запорізька політехніка», 2022
© Жорняк Л. Б., 2022
© Антонова М. В., 2022
© Василевський В. В., 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ПРИЗНАЧЕННЯ, ГОЛОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ АВТОМАТИКИ ТА КЕРУВАННЯ.....	14
1.1 Класифікація електричних апаратів низької напруги.....	14
1.2 Основні технічні параметри електричних апаратів керування та захисту.....	20
1.3 Контрольні питання	31
2 КОНТАКТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АПАРАТІВ.....	32
2.1 Матеріали контактів	40
2.2 Види контактних груп.....	49
2.3 Контрольні питання	51
3 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ МАГНІТНИХ КІЛ.....	52
3.1 Закони магнітних кіл	53
3.2 Електромагнітні зусилля.....	57
3.3 Характеристики електромагнітів: навантажувальна, протидіюча та тягова.....	61
3.4 Контрольні питання.....	65
4 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ РЕЛЕ.....	66
4.1 Електромагнітні реле постійного струму.....	73
4.2 Електромагнітні реле змінного струму.....	78
4.2.1 Пульсація електромагнітної сили.....	78
4.2.2 Вібрація якоря.....	80
4.3 Поляризовані електромагнітні реле.....	81
4.4 Індукційне реле.....	91
4.4.1. Момент обертання індукційної системи.....	91
4.4.2 Індукційне реле напрямку потужності.....	98
4.5 Магнітоелектричні реле.....	103
4.6 Електродинамічне реле.....	106
4.7 Теплові реле (термореле).....	108
4.8 Реле струмового захисту.....	114
4.9 Герконові реле.....	119
4.9.1 Герметизовані магнітокерзовані контакти та герконові реле.....	119
4.9.2 Механічна (протидіюча) і тягова	

характеристики геркона.....	122
4.9.3 Засоби керування реле на геконах.....	123
4.9.4 Фериди.....	125
4.10 Особливості вибору і тенденції розвитку електромеханічних реле.....	128
4.11 Контрольні питання та задачі.....	130
5 НАПІВПРОВІДНИКОВІ (ТВЕРДОТІЛЬНІ) РЕЛЕ.....	133
5.1 Контрольні питання.....	146
6 КОНТАКТОРИ ТА МАГНІТНІ ПУСКАЧІ.....	147
6.1. Пристрої контакторів та пускачів, їх відмінності.....	147
6.2 Електромагнітні контактори.....	152
6.3 Конструкція та принцип роботи контактора постійного струму.....	159
6.3.1 Пристрій контактно-дугогасної системи.....	165
6.3.2 Методика розрахунку параметрів електромагнітного контактора постійного струму.....	169
6.4 Магнітні пускачі.....	175
6.4.1 Конструкція та принцип роботи магнітного пускача.....	178
6.4.2 Категорії застосування магнітних пускачів.....	184
6.4.3 Живлення та характеристиками магнітних пускачів.....	185
6.4.4 Схеми включення магнітних пускачів.....	188
6.5 Тиристорні контактори та пускачі.....	195
6.5.1 Тиристорні контактори.....	195
6.5.2 Тиристорні пускачі.....	200
6.6 Гібридні контактори.....	203
6.7 Контрольні питання.....	209
7 ВИМИКАЧІ.....	210
7.1 Класифікація вимикачів низької напруги.....	211
7.2 Конструкція та принцип роботи автоматичних вимикачів.....	217
7.2.1 Повітряні автоматичні вимикачі.....	226
7.2.2 Автоматичні вимикачі загального призначення із мікропроцесорними розчіплювачами.....	229
7.3 Модульний автоматичний вимикач.....	237
7.3.1 Розшифровка маркування модульних автоматичних вимикачів.....	238
7.3.2 Пристрій та принцип роботи модульного автоматичного вимикача.....	240

7.4 Пристрій захисту від залишкового струму.....	243
7.5 Селективні автоматичні вимикачі.....	256
7.6 Контрольні питання.....	263
8 ЗАПОБІЖНИКИ.....	264
8.1 Змінна плавка вставка.....	267
8.2 SMD запобіжники.....	273
8.3 Контрольні питання.....	280
9 АВАРІЙНІ РЕЖИМИ В КОЛАХ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ.....	281
9.1 Засоби та ефективність захисту електричних кіл та споживачів.....	281
9.2 Особливості роботи апаратів у мережах 0,4 кВ.....	284
9.3 Режими роботи низьковольтних комплектних пристроїв.....	288
9.4 Вибір габаритних розмірів низьковольтних комплектних пристроїв та особливості їх монтажу.....	292
9.4 Контрольні питання.....	296
10 ВИБІР АПАРАТІВ КЕРУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ТА ОБЛАДНАННЯ.....	297
10.1 Методика вибору контакторів та магнітних пускачів для керування та захисту електричних двигунів.....	297
10.2 Приклад вибору контактора (магнітного пускача) для керування та захисту асинхронного двигуна серії 4А.....	302
10.3 Методика вибору автоматичних вимикачів для захисту електричних кіл та електричного обладнання.....	308
10.4 Приклад вибору автоматичних вимикачів з урахуванням селективності їх роботи.....	311
10.5 Приклад вибору автоматичного вимикача для захисту кола від короткого замикання та перевантаження в асинхронному двигуні.....	318
10.6 Контрольні запитання.....	320
11 АПАРАТИ РУЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	322
12 ДАТЧИКИ КОНТРОЛЮ І РЕГУЛЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....	336
12.1 Контактні датчики.....	340
12.2 Потенціометричні датчики.....	342
12.3 Омічні тензодатчики.....	348

12.4 Термоелектричні перетворювачі (термопари).....	355
12.5 Індуктивні та трансформаторні датчики.....	361
12.5.1 Індуктивні датчики.....	362
12.5.2 Трансформаторні датчики.....	367
12.6 Ємнісні датчики.....	369
12.7 Активні датчики.....	372
12.7.1 Датчик частоти обертання тахогенератор.....	373
12.7.2 Датчик кутового прискорення.....	374
12.7.3 Датчик Віганда.....	376
12.8 Особливості конструктивно-технологічних характеристик електромагнітних датчиків.....	380
12.9 Контрольні питання та задачі.....	381
13 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І МАГНІТНІ МУФТИ.....	383
13.1 Фрикційні електромагнітні муфти.....	384
13.2 Індукційні муфти.....	388
13.3 Електростатичні (порошкові) муфти.....	390
13.4 Контрольні питання.....	393
14 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І МАГНІТНІ ПІДВІСИ ТА ОПОРИ...394	
14.1 Коротка класифікація існуючих підвісів.....	395
14.2 Індукційні електромагнітні підвіси та опори.....	395
14.3 Магнітофероридні опори.....	399
14.4 Безконтактні магнітні підшипники. Можливості, переваги та недоліки.....	400
14.5 Контрольні питання.....	405
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	406

ВСТУП

Електричні апарати широко застосовуються в електроенергетиці, системах електропостачання та електроприводу, електротехнології та електрообладнанні промисловості та сільського господарства, на всіх видах транспорту, у побутовій та медичній техніці.

Електричні апарати (ЕА) – це електротехнічні пристрої, що застосовуються при використанні електричної енергії, починаючи від її виробництва, передачі, розподілу та закінчуючи споживанням.

Під електричними апаратами розуміють електротехнічні пристрої, які виконують такі функції:

- увімкнення та вимкнення електричних кіл в електроустановках, призначених для виробництва, перетворення, передачі та споживання електроенергії;
- контроль та вимірювання параметрів електрообладнання;
- захист електроустановок в аварійних режимах, захист людини та майна при пошкодженні електрообладнання;
- регулювання параметрів електротехнічних пристроїв;
- керування технологічними процесами;
- перетворення неелектричних величин на електричні;
- створення магнітного поля із заданими параметрами та конфігурацією [2, 5, 18, 28, 45].

Така різноманітність функцій призвела до появи багатьох видів електричних апаратів, що істотно різняться за принципом дії та конструкції, але мають одне призначення. У сучасному контексті електричний апарат – електротехнічний пристрій для керування потоками енергії та інформації.

З урахуванням наведеного вище та відмінностей у традиціях світових електротехнічних шкіл класифікація апаратів досить умовна. Їх поділяють, передусім, на великі групи за принципом дії.

- електромеханічні, що містять рухомі елементи, в результаті переміщення яких здійснюється функціонування апарату;

- статичні (так звані безконтактні) або силові електронні, що не мають рухомих частин і функціонують за допомогою зміни

параметрів і характеристик елементів і блоків, що входять до їх складу.

Електромеханічні апарати з'явилися на початковому етапі промислового використання електроенергії, пройшли довгий шлях удосконалення конструкцій, застосування нових матеріалів і технологій, і з різних причин досі домінують, головним чином, у сегменті комутаційної апаратури.

Статичні апарати є відносно новими пристроями (силові напівпровідникові прилади з'явилися в середині ХХ ст.) і мають розширені функціональні можливості. Вони дозволяють в одному пристрої об'єднати апарат керування (з необмеженим ресурсом виконання операції «ввімкнено-вимкнено»), надшвидкодіючий апарат захисту та регулятор потужності, що підключається до навантаження. Тому наразі різні електромеханічні регулятори (наприклад, вугільний регулятор напруги) найчастіше витісняються статичними апаратами. Область використання статичних апаратів постійно розширюється. Однак для гарантованого роз'єднання частин електрообладнання за правилами електробезпеки завжди застосовуватимуться апарати з механічним розривом кола.

Керувати потоками енергії необхідно на всіх стадіях її застосування (виробництво, передача, перетворення та споживання.) Однак комутаційні, обмежувальні та вимірювальні апарати високої та низької напруги, незважаючи на ідентичність функціонального призначення, конструктивно різко відрізняються. Це зумовлено як істотно різними вимогами з електричної ізоляції, а також пов'язані з необхідністю з допомогою апаратів високої напруги керувати потоками енергії дуже великий потужності.

У зв'язку з цим і класифікація апаратів за середовищем, що використовується для гасіння дуги, більш характерна для комутаційних апаратів високої напруги, натомість в той час як апарати низької напруги виконуються, як правило, повітряними.

Отже згідно з функціональним призначенням електричні апарати поділяються на:

- комутаційні апарати;
- обмежувальні апарати;

- апарати автоматичного регулювання;
- апарати автоматики;
- вимірювальні апарати.

У свою чергу комутаційні апарати поділяють на:

- апарати розподілу (вимикачі різних типів, перемикачі, роз'єднувачі, короткозамикачі, відокремлювачі тощо);
- апарати керування (контактори, пускачі, сильноточні реле).

Автоматичні вимикачі, запобіжники, теплові реле, апарати, керовані диференційним струмом, часто виділяють в окрему групу – апарати захисту.

Розподіл комутаційних апаратів низької напруги на апарати розподілу та апарати керування виник історично в силу різних вимог, що висуваються до цих груп апаратів (за комутаційним ресурсом, комутованим та наскрізним струмами тощо) на стадіях розподілу енергії та споживання. Відмінність у вимогах призвела до принципово різних конструкцій, загальною ознакою для яких залишається наявність контактної-дугогасної системи.

Апарати розподілу енергії призначені для відносно рідких оперативних комутацій, переважно у розподільчих мережах, та здійснюють захист обладнання та мереж в аварійних режимах роботи (струми короткого замикання та перевантаження, зниження напруги), а також захист людей від ураження електричним струмом.

Апарати керування призначені для частих оперативних відключень та включень нормальних струмів навантаження та нечастих відключень струмів навантаження, які зазвичай перевищують номінальні в 5...20 разів. Для поліпшення умов комутації струму в апаратах керування іноді застосовують напівпровідникові прилади, які шунтують механічні контакти. У таких гібридних апаратах тривале проведення струму здійснюють контакти, тоді як напівпровідникові прилади фактично знеструмлені.

У момент комутації при розмиканні контактів струм короткочасно відводиться в напівпровідниковий прилад, який потім вимикається, внаслідок чого практично усувається дугоутворення в апараті та суттєво підвищується термін його

служби. Такі апарати часто називають апаратами з обмеженим дугоутворенням.

Обмежувальні апарати використовуються для обмеження струмів коротких замикань (реактори та дугові електродинамічні струмообмежувачі) або як засіб захисту від перенапруги (шунтуючі реактори, дугові розрядники та статичні обмежувачі перенапруги на основі елементів з нелінійною вольт-амперною характеристикою).

Апарати автоматичного регулювання (регулятори) в більшості випадків є статичними та призначені для автоматизації виробничих процесів, перетворення, накопичення енергії та керування параметрами якості електроенергії (стабілізація напруги, підвищення коефіцієнта потужності тощо) в умовах переважання нелінійних навантажень. Вони переживають бурхливий період розвитку, особливо з появою силових напівпровідникових приладів, що повністю керуються. Крім застосування в системах промислового та міського електропостачання вони широко використовуються як стабілізатори напруги, коректори та регулятори потужності, у вторинних джерелах живлення та в автономній енергетиці. Спільно з об'єктом регулювання, такі апарати утворюють замкнену систему регулювання [51].

Апарати автоматики – слаботочні реле, датчики, підсилювачі, перетворювачі, контролери тощо широко використовуються як засоби автоматизації у всіх галузях техніки. Вони працюють за умови невисокої напруги (до сотень вольт) і струмах (до 5 А) і зазвичай виконують функції контролю будь-якого електричного параметра (наприклад, реле) та неелектричного вхідного параметра (наприклад, датчики). Коли вхідний (контрольований) параметр реле досягає заданої значення, відбувається спрацьовування електричного реле і «видача сигналу» на виході.

Це відбувається через розмикання чи замикання контактів (контактні чи електромеханічні реле) або через різку зміну електричного опору на виході (безконтактні чи статичні реле). У будь-якому випадку відбувається стрибкоподібна зміна струму в оперативному колі, до якого підключений вихідний елемент. Тому крива залежності вихідного сигналу від вхідного зазвичай має релейний характер. У датчиках залежність вихідного сигналу від

вхідного має плавний характер, тобто мала зміна вхідного сигналу викликає невелику пропорційну зміну сигналу на виході.

Електромеханічні реле використовуються, як правило, в мережах простої електроавтоматики. У пристроях середньої складності, як надійніші та гнучкіші, застосовуються статичні реле на мікроелектронній базі. У пристроях зі складним алгоритмом роботи, з відносно великою кількістю входів і виходів нині використовуються мікропроцесорні програмовані контролери. Сучасний релейний захист будується на основі мікропроцесорних пристроїв. Загалом, варто зазначити, що електромеханічні апарати автоматики інтенсивно витісняються статичними пристроями на мікропроцесорній основі, однак вони продовжують успішно застосовуватися в окремих електромеханічних пристроях, наприклад, апарати з герметизованими контактами — герконами.

Відомо, що все більше застосування сучасної спеціалізованої цифрової техніки для систем керування викликає зміну структури випуску (застосування) низьковольтних апаратів. Через тенденцію зближення культури та технології виробництва приладобудування та електротехнічної апаратури у таких системах всі логічні та розподільчі функції керування бере на себе мікропроцесорна техніка, що суттєво зменшує застосування реле керування. Ці системи передбачають використання контакторів на напівпровідникових елементах, оскільки їх застосування або інших більш складних електронних блоків керування виправдовує себе в об'єктах, що вимагають більшої швидкодії і частоти роботи. Крім того, необхідне суттєве поліпшення перешкодо безпеки елементів та систем електронного керування в умовах промислової експлуатації дозволяє застосовувати інтегральні схеми для розрахунково-вирішальних та логічних частин пристроїв керування, а також зменшити розміри пристроїв керування, та вдало поєднує їх з комп'ютерною технікою. Але ж мікромініатюризація схем керування з неминучим зниженням рівнів сигналів керування вимагає більш складних заходів забезпечення надійності та перешкодозахищеності в умовах промислового використання, тому переважне поширення в промисловості отримують дискретні елементи з великими рівнями сигналів керування, особливо у периферійних частинах систем керування [4, 5, 17, 24, 30, 31, 33, 45].

У сучасних англійських джерелах вказується, що вимикачі для силових кіл на напівпровідникових елементах за вартістю складають не більше 5 % від вартості загального випуску вимикачів, і зараз поки що немає перспектив істотного розширення їх застосування [5, 20, 28, 43, 45, 49, 64]. Разом з великими чисто технічними перевагами систем керування на напівпровідникових елементах, вони ще й набагато дорожче контактних систем керування, і в об'єктах із середнім та низьким рівнями автоматизації, а також з відносно невисокими вимогами щодо швидкодії та надійності економічно не завжди себе виправдовують.

Сучасні апарати для автоматизації виробничих процесів характеризуються повільним зниканням відмінностей між традиційними електротехнічними елементами систем керування та елементами, що є традиційними для приладобудування. В той же час наразі спостерігається підвищення питомої ваги випуску елементів, що займають проміжне положення між приладами та апаратами: командоапаратів безперервної та дискретної дії, електромеханічних реле рахування імпульсів, датчиків механічних величин тощо.

Закордонні електротехнічні фірми, що випускають низьковольтні апарати, дедалі ширше освоюють перераховані апарати, а фірми General Electric, Tesch, Baumgartner, Schleicher та інші (Німеччина) спеціалізуються на їх випуску [43, 76, 93, 95].

Як у складних, так і в найпростіших системах керування чітко простежуються тенденції до зменшення розмірів апаратури та її уніфікації, а також до створення та застосування комбінованих апаратів, що поєднують, наприклад, функції керування та захисту, керування та сигналізації, тощо. Відносно значна кількість контактних апаратів у складних об'єктах керування потребує зменшення габаритів безпосередньо самих станцій керування, а це, як відомо, в загальнопромислових пристроях досягається двома способами: застосуванням щільного монтажу електроапаратури за рахунок нормалізації її розмірів, а також застосуванням малогабаритних реле автоматики, що працюють, як правило, при низьких рівнях напруги і струмів (від 24 В до 48 В та 0,5 А), і це дозволяє зменшити їх розміри. За цих умов комутація струму відбувається без утворення дуги, проте для надійного

контактування потрібні спеціальні контакти, що забезпечують цю вимогу і водночас можуть надійно включати пускачі, контактори, електромагніти та електромагнітні муфти, які працюють при напрузі 24 В постійного струму та величині струму до 2 А. Розширюється застосування електромагнітів постійного струму, які забезпечують більш надійну роботу, ніж електромагніти змінного струму. Також широко застосовуються пристрої керування на напівпровідникових елементах та герконах напругою 24 В та 48 В постійного струму, і тому питома вага апаратури керування з такими напругами постійного струму безперервно зростає.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ, ГОЛОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ АВТОМАТИКИ ТА КЕРУВАННЯ

1.1 Класифікація електричних апаратів низької напруги

Відомо, що незалежно від призначення, принципу дії, конструктивного призначення, а також решти ознак, всі електричні апарати можна розрізнити двома окремими групами, а саме:

- електромеханічними, які обов'язково мають рухливі елементи, переміщення яких призводить до функціонування самого апарату;

- статичними (що зазвичай називаються безконтактними) або силовими електронними, що не мають рухливі елементи, і, відповідно, виконуючими функцію, яка може бути здійснена завдяки зміні параметрів та характеристик елементів, що входять у склад їх елементів, або блоків.

Електричні апарати загальнопромислового призначення, електропобутові апарати та пристрої випускаються напругою до 1 кВ та високовольтні – понад 1 кВ. Тому за цією ознакою розрізняють апарати низької (до 1000 В) напруги (ЕАНН) і апарати високої (понад 1000 В) напруги (ЕАВН). До апаратів до 1 кВ можна віднести апарати ручного, дистанційного керування, апарати захисту та датчики.

Всі електричні апарати в усіх літературних джерелах [2, 3, 5, 18, 22, 28, 37, 45, 47, 53] класифікуються за наступними ознаками:

- призначення, тобто основна функція, що виконується апаратом;

- принцип дії;

- характер роботи;

- рід струму;

- величина струму;

- величина напруги (до 1 кВ і більше);

- виконання;

- ступеня захисту (ІР);

- конструкція апарату.

Класифікація електричних апаратів в залежності від призначення є наступною:

– апарати керування, які призначені для пуску, реверсування, гальмування, регулювання швидкості обертання, напруги, струму електричних машин, верстатів, механізмів, або для пуску та регулювання параметрів інших споживачів електроенергії в системах електропостачання. Основна функція цих апаратів – це керування електроприводами та іншими споживачами електричної енергії. Особливостями таких апаратів є часте включення, відключення до 3600 на годину, тобто до одного разу на секунду. До них відносяться електричні апарати ручного керування – пакетні вимикачі та перемикачі, рубильники, універсальні перемикачі, контролери та командоконтролери, реостати та інші, а також електричні апарати дистанційного керування – електромагнітні реле, пускачі, контактори тощо;

– апарати захисту, що використовуються для комутації електричних кіл, захисту електрообладнання та електричних мереж від надструмів, тобто струмів навантаження, пікових струмів, струмів короткого замикання. До них відносяться плавкі запобіжники, теплові реле, струмові реле, автоматичні вимикачі тощо;

– контролюючі апарати, призначені для контролю за заданими електричними або неелектричними параметрами. До цієї групи належать датчики. Ці апарати перетворюють електричні або неелектричні величини в електричні і видають інформацію як електричних сигналів. Основна функція цих апаратів полягає у контролі за заданими електричними та неелектричними параметрами. До них відносяться датчики струму, тиску, температури, положення, рівня, фотодатчики, а також реле, що реалізують функції датчиків, наприклад, реле контролю швидкості (РКШ), реле часу, напруги, струму.

За принципом дії електроапарати поділяються залежно від характеру імпульсу, що впливає на них. Виходячи з тих фізичних явищ, на яких ґрунтується дія апаратів, найбільш поширеними є такі категорії:

– комутаційні електричні апарати для замикання та розмикання електричних кіл за допомогою контактів, з'єднаних

між собою для забезпечення переходу струму з одного контакту в інший або віддалених один від одного для розриву електричного кола (рубильники, перемикачі, тощо);

- електромагнітні електричні апарати, дія яких залежить від електромагнітних зусиль, що виникають під час роботи апарату (контактори, реле, тощо);

- індукційні електричні апарати, дія яких заснована на взаємодії струму та магнітного поля (індукційні реле);

- котушки індуктивності (реактори, дроселі насичення).

Класифікація електричних апаратів за характером роботи відбувається залежно від режиму того електричного кола, в якому вони встановлені:

- апарати, що працюють довго;

- призначені для короткочасного режиму роботи;

- працюючі в умовах повторно-короткочасного навантаження.

Класифікація електричних апаратів за родом струму: постійного та змінного.

Вимоги до електричних апаратів визначаються особливо різноманітними конструктивними різновидами сучасних електричних апаратів. Але все ж таки існують деякі загальні вимоги незалежно від призначення, застосування або конструкції апаратів. Вони залежать від призначення, умов експлуатації, необхідної надійності апаратів.

Ізоляція електричного апарату має бути розрахована залежно від умов можливої перенапруги, які можуть виникнути у процесі роботи електричного обладнання.

Апарати, призначені для частого включення та відключення номінального струму навантаження, повинні мати високу механічну та електричну зносостійкість, а температура струмопровідних елементів не повинна перевищувати допустимих значень.

При коротких замиканнях струмопровідна частина апарату піддається значним термічним та динамічним навантаженням, які викликані великим струмом. Ці екстремальні навантаження не повинні перешкоджати подальшій роботі апарата.

Електричні апарати в схемах сучасних електротехнічних пристроїв повинні мати високу чутливість, швидкодію, універсальність.

Загальною вимогою до всіх видів апаратів є простота їх встановлення та обслуговування, а також їхня економічність (малогабаритність, найменша вага апарату, мінімальна кількість високовартісних матеріалів для виготовлення окремих частин).

Режими роботи електротехнічних пристроїв можна класифікувати наступним чином:

– номінальний режим роботи – це такий режим, коли елемент електричного кола виконує роботу при значеннях струму, напруги та потужності, які зазначені у технічному паспорті, що відповідає найвигіднішим умовам роботи з точки зору економічності та надійності (довговічності);

– нормальний режим роботи – це режим, коли апарат експлуатується при параметрах режиму, що незначно відрізняються від номінального;

– аварійний режим роботи – це такий режим, коли параметри струму, напруги та потужності перевищують номінальні значення у два та більше разів. В цьому випадку об'єкт повинен бути відімкнений. До аварійних режимів відносять проходження струмів короткого замикання, струму перевантаження, зниження напруги у мережі;

– надійність – це безвідмовна робота апарату протягом усього часу експлуатації, тобто властивість електричного апарату виконувати задані функції, зберігаючи протягом вказаного часу значення встановлених експлуатаційних показників у заданих межах, що відповідають заданим режимам та умовам використання, технічного обслуговування та ремонтів, зберігання та транспортування.

Виконання електричних апаратів відповідно до ступеню захисту. Ступінь захисту від проникнення твердих тіл та рідини регулюється стандартами ІЕС 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254) [30, 42, 45, 55]. Ingress Protection Code (у перекладі з англ. – це «коди захисту від проникнення») – класифікація способу захисту, що забезпечується оболонкою технічного пристрою від доступу до небезпечних частин, попадання зовнішніх твердих предметів та

(або) води та перевіряється стандартними методами випробувань [22, 42]. Маркування ступеня захисту оболонки електрообладнання здійснюється за допомогою міжнародного знаку захисту (IP) та двох цифр, з необов'язковим додаванням літери, що конкретизує, перша з яких означає захист від попадання твердих предметів, друга – від проникнення води [12]. Код має вигляд **IPXX**, де на позиціях X знаходяться цифри або символ X, якщо ступінь не визначено. За цифрами можуть бути одна або дві літери, що дають допоміжну інформацію.

Відповідно до ступеню захисту встановлюється 7 ступенів від 0 до 6 від попадання всередину твердих тіл (перша цифра позначення) та від 0 до 8 від проникнення рідини (друга цифра позначення). Для позначення ступеня захисту використовується абrevіатура IP (див. таблицю 1.2). Наприклад, побутова електрична розетка може мати ступінь захисту IP22 – вона захищена від проникнення пальців і не може бути пошкоджена вертикально або майже вертикально водою, що капає. Максимальний ступінь захисту за цією класифікацією — IP68: тобто пилонепроникний прилад, що витримує тривале занурення у воду під тиском. В даний час максимальна міра захисту – IP69-K – це маркування корпусів виробів, що витримують високотемпературне миття під високим тиском [45].

Щодо електричних апаратів існують такі види виконання:

- захищені IP21, IP22 (не нижче);
- бризказащищені, краплезащищені IP23, IP24;
- водозащищені IP55, IP56;
- пилозащищені IP65, IP66;
- закриті IP44 – IP54, у цих апаратів внутрішній простір ізольовано від зовнішнього середовища;
- герметичне IP67, IP68, такі апарати виконані з особливо щільною ізоляцією від довкілля.

Кліматичне виконання електричних апаратів визначається згідно з ГОСТ 15150-69 [14]. Відповідно до кліматичних умов позначається такими літерами: У (N) – помірний клімат, ХЛ (NF) – холодний клімат, ТБ (ТН) – тропічний вологий клімат, ТС (ТА) – тропічний сухий клімат, О (U) – всі кліматичні райони, на суші,

річках і озерах, М – помірний морський клімат, ОМ – всі райони моря, В – всі мікрокліматичні райони на суші та на морі.

Категорії розміщення електричних апаратів:

- на відкритому повітрі,
- приміщення, де коливання температури та вологості не суттєво відрізняються від коливань на відкритому повітрі,
- закриті приміщення із природною вентиляцією без штучного регулювання кліматичних умов. Відсутні дії піску та пилу, сонця та води (дощ),
- приміщення із штучним регулюванням кліматичних умов, тобто відсутність дії піску та пилу, сонця та води (дощу), зовнішнього повітря,
- приміщення з підвищеною вологістю (тривала наявність води або конденсованої вологи)

Кліматичне виконання та категорія розміщення вводиться в умовне позначення типу електротехнічного виробу.

Вибір електричних апаратів є завданням, при вирішенні якого повинні враховуватися:

- комутовані електричним апаратом струми, напруги та потужності;
- параметри та характер навантаження – активне, індуктивне, ємнісне, низького або високого опору та ін.;
- число кіл, що комутуються;
- напруги та струми кіл керування;
- напруга котушки електричного апарату;
- режим роботи апарату – короткочасний, тривалий, повторно-короткочасний;
- умови роботи апарату – температура, вологість, тиск, наявність вібрації та інші;
- способи кріплення апарату;
- економічні та масогабаритні показники;
- зручність сполучення та електромагнітна сумісність з іншими пристроями та апаратами;
- стійкість до електричних, механічних та термічних навантажень;
- кліматичне виконання та категорія розміщення;

- ступеню захисту IP,
- вимоги техніки безпеки;
- висота над рівнем моря;
- умови експлуатації.

1.2 Основні технічні параметри електричних апаратів керування та захисту

Одним з основних технічних параметрів більшості апаратів є *номінальна напруга* ($U_{\text{ном}}$) – це напруга, на яку розрахований електричний апарат, як з точки зору комутації, керування та регулювання, а також ізоляції його струмопровідних частин. Відповідно до ДСТУ EN 50160-2014 [23] шкала напруги для електричних апаратів змінного струму становить: 36; 127; 220; 380; 660; 1140 В; для електричних апаратів постійного струму: 6; 12; 24; 27; 48; 110; 220; 440; 600; 750 В. При цьому менші значення напруги відносяться до кіл керування. Передбачається надійна робота електричних апаратів при підвищенні напруги до $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$, а в колі керування при його зміні від $0,85 \cdot U_{\text{ном}}$ до $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$. У колах високої напруги шкала номінальної напруги має наступні значення: 3; 6; 10; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750 кВ [23].

Іншим основним технічним параметром є *номінальний струм*, тривале протікання якого (наприклад, протягом 8 год) не викликає нагрівання струмопровідних частин електричного апарату вище допустимих значень, що визначаються класом ізоляції, з якою ці частини мають точки дотику. Нормативні документи визначають наступну шкалу номінальних струмів: 1; 3; 6; 10; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000 та 6300 А.

У колах високої напруги: 200; 400; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000; 12500; 16000; 20000; 25000; 31500 А.

При визначенні повторно-короткочасного режиму роботи апарату часто користуються поняттям «допустимий еквівалентний струм тривалого режиму» [19].

Номінальний робочий струм – це струм, який визначає застосування апарату в даних умовах, що обумовлюються

підприємством-виробником залежно від номінальної робочої напруги, номінального режиму роботи, категорії застосування, типовиконання та умов експлуатації, тобто, це струм реально існуючий у колі, де експлуатується електричний апарат. Номінальний робочий струм не може бути більшим за номінальний струм апарату. А *номінальна робоча напруга* дорівнює напрузі мережі, в якій в даних умовах електричний апарат може робити.

Для апаратів керування та, зокрема, для контакторів та магнітних пускачів найважливішим параметром є *категорія застосування* апарату. Визначеними є чотири основні категорії застосування контакторів змінного струму і п'ять категорій застосування контакторів постійного струму. Категорія застосування визначає область застосування електричного апарату залежно від характеру навантаження та умов експлуатації. У категорії застосування вказуються режими нормальних (частих) та рідкісних комутацій (див. таблицю 1.1). Причому в кожному режимі розглядаються процеси включення та відключення та вирізняються чотири показники, що характеризують кожну категорію застосування [5, 28, 44, 45, 51].

1) *Область застосування апарату* (тип навантаження, що комутується). Апарат у кожній категорії застосування може робити з певним типом навантаження. Наприклад, апарат, який працює в категорії застосування АС-3, повинен включати пускові струми асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, а відключати той же двигун, що працює в номінальному режимі. Апарат, який працює в категорії застосування АС-4, повинен включати пускові струми асинхронного двигуна і відключати статорну обмотку двигуна, що повільно обертається або нерухомого двигуна (загальмований двигун). Значно легшими є функції апарату в категорії застосування АС-1, коли навантаженням є активне, або слабоіндуктивне коло.

Аналогічно диференційоване навантаження в колах постійного струму, коли в найбільш важкому режимі апарат знаходиться в категорії застосування ВС-5 (включення пускових струмів електродвигунів з послідовним збудженням і відключення нерухомих або повільно обертових двигунів).

Таблиця 1.1 — Категорія застосування апаратів

Рід струму	Категорія застосування	Номинальний робочий струм, А	Включення				Відключення				
			Співвідношення струму, що комутується з номінальним робочим струмом	Співвідношення напруги перед включенням з номінальною робочою кола cos φ ±0,05	Стага часу кола τ, мс±15%	Співвідношення струму, що комутується з номінальним робочим струмом	Співвідношення напруги перед включенням з номінальною робочою кола cos φ ±0,05	Стага часу кола τ, мс±15%			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Режим нормальних комутацій											
Змінний	АС-1 АС-21	Всі значення	1	1			1		0,95		-
			2,5	1			1		0,65		
	АС-3	до 17	6			1			0,35		-
		більше 17	6			1			0,65		
АС-4	до 17	6			1			0,65		-	
	більше 17	6			1			0,35			

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Змінний	АС-11	Всі значення	10		0,7				0,4		
	АС-22	до 17	1		0,65		1		0,65		
	АС-23	більше 17									0,35
Постійний	DC-1	Всі значення	1			1	1	1		1	
	DC-21										
	DC-2					2		1	0,1		7,5
	DC-3			2,5				2,5	1		2
	DC-4				1			1	0,3		10
	DC-5							2,5			7,5
	DC-11						до 300				до 300
	DC-22				1			2	1		2
	DC-23							7,5			7,5

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Режим рідких комутацій													
Змінний	АС-1	Всі значення	1,5	1,1	0,95	-	1,5	1,1	0,95	-			
	АС-21												
	АС-2	до 17	4		0,65		4		0,65				
	АС-3	17-100	10		0,35		8		0,35				
		більше 100	8		0,65		6		0,65				
	АС-4	до 17					0,35		8		0,35		
		17-100					0,7		11		0,7		
		більше 100			10		***		****		****		
	АС-11	Всі значення	11		0,65		3		0,65				
	АС-20		****										
	АС-22	до 17	3		10		0,35		6		0,35		
	АС-23	17-100			8								
		більше 100											

Кінець таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Постійний	DC-1	Всі значення	-	-	-	-	-	-	-	-
	DC-21									
	DC-2		1,1							
	DC-3			2,5						
	DC-4		4	15		4	1,1			
	DC-5									
DC-11	1,1				**	1,1			**	
Постійний	DC-20	Всі значення	****	1,1	-	****	****	1,1	-	****
	DC-22		4	2,5		4	2,5			
	DC-23			15			15			

Позначки: * Змінний струм визначається діючим значенням симетричної складової.

** Для категорій застосування DC-11 стала часу при включенні зазначена як $t_{0,95}$ (час, ме, необхідний для досягнення 0,95 від значення струму, що встановлюється, яке розраховується за емпіричною формулою $t_{0,95} = 6R$, де R – потужність електромагніту, не більше 50 Вт. Якщо потужність перевищує 50 В, t приймається рівною 300 мс).

*** Для номінального робочого струму понад 100 А мінімальне значення комутованого струму: 1000 А – для категорій застосування AC-3 та AC-23 при включенні та AC-4 при відключенні; 800 А – для категорій застосування AC-3 та AC-23 при відключенні; 1200 А – для категорій застосування AC-4 під час увімкнення.

**** Якщо для категорій застосування AC-20 та DC-20 комутаційна здатність не дорівнює нулю, то значення струму та коефіцієнта потужності (або сталої часу) кола повинні відповідати встановленим у стандартах або технічних умовах на конкретні види або серії та типи апаратів.

2) *Струм комутації* I_0 , тобто зазвичай надаються співвідношення комутованого струму до номінального робочого струму. Цей показник характеризує комутаційну здатність апарату, його контактну-дугогасної системи.

3) *Напруга* U , що визначається у співвідношенні з номінальною робочою напругою. У режимі рідких комутацій апарат повинен витримувати 10% перевищення напруги над номінальним.

4) *Характер навантаження комутації*, що визначається коефіцієнтом потужності $\cos \varphi$ кола, що комутується (для кіл змінного струму), або сталої часу кола τ , мс (для кіл постійного струму).

Важливо визначити функціональні можливості апарату, що призначений для комутації навантаження даного типу. Наприклад, при виборі контакторів для керування прямим пуском АТ з короткозамкненим ротором він повинен в режимі нормальних комутацій включати пускові струми (категорії застосування АС-3 і АС-4), а в режимі рідких комутацій відключати номінальні струми (категорія застосування АС-3) або ударні пускові струми (категорія застосування АС-4).

Одним з основних технічних параметрів для апаратів керування є *режим роботи апарату*. Контактори можуть працювати в одному, декількох або у всіх наступних режимах: у тривалому, короткочасному, повторно-короткочасному та переривчасто-тривалому [14, 19, 45, 47, 53]. Характер режиму роботи апарату визначається характером зміни температури нагрівання струмопровідних частин апарату у його роботи. Окремо необхідно зазначити повторно-короткочасний режим роботи апарату, який часто характеризується *відносною тривалістю включення* [51]:

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_p}{t_p + t_{пз}} \cdot 100\%.$$

де t_p та $t_{пз}$ – час роботи та час паузи, відповідно.

Насправді прийняті нормовані значення відносної тривалості включення ПВ%: 15, 25, 40, 60%.

Частота включень апарату тісно пов'язана з режимом роботи апарату та визначається кількістю комутацій електричного апарату за годину. Нормовані значення частоти включень контакторів за годину становлять: 6; 30; 150; 600; 1200; 2400; 3600; 7200.

При виборі контактора чи магнітного пускача необхідно знати умови, у яких вони працюватимуть. Визначено 10 типів *кліматичного виконання* виробу, які розрізняються на дві групи: вироби, що призначені для експлуатації на суші, річках, та вироби, що призначені для експлуатації в районах з морським кліматом [39]. Як вже було зазначено раніше серед них найбільш поширених є такі кліматичні виконання апаратів:

- У – з помірним кліматом;
- УХЛ – з помірним та холодним кліматом;
- Т – із сухим та вологим тропічним кліматом;
- О – для будь-яких районів, крім районів із дуже холодним кліматом.

Крім того, виділено п'ять *категорій розміщення* апаратів та пристроїв залежно від умов, в яких вони повинні робити: робоче та граничне значення температури повітря, відносна вологість повітря, норми наявності пилу, характер атмосфери тощо. Зазначають такі категорії розміщення апаратів:

- 1 – на відкритому повітрі;
- 2 – під навісом, але з тією ж температурою, що й на повітрі;
- 3 – у закритих приміщеннях з природною вентиляцією;
- 4 – у приміщеннях зі штучно регульованим кліматом;
- 5 – у приміщеннях з підвищеною вологістю (у тому числі шахтах, підвалах та ін.).

Кліматичне виконання та категорія розміщення контакторів, магнітних пускачів, автоматичних вимикачів та інших апаратів вказуються в їх позначеннях. Наприклад, контактор постійного струму КП-207-УЗ може бути використаний у середовищах з помірним кліматом (У), у закритих приміщеннях з природною вентиляцією (3) та з температурою навколишнього середовища, що дорівнює 40 °С.

Для запобігання попадання всередину апарату сторонніх тіл і води та виключення дотику обслуговуючого персоналу зі струмопровідними та рухомими частинами встановлюється захисна оболонка. *Ступінь захисту* позначається літерами IP та двома цифрами. Перша цифра характеризує ступінь захисту апарату від проникнення всередину сторонніх тіл і від дотику обслуговуючого персоналу з деталями апарату, а друга цифра характеризує захист апарату від проникнення води (див. таблицю 1.2). Наприклад, магнітний пускач, що має ступінь захисту IP54, не захищений повністю від проникнення всередину оболонки пилу, проте пил не впливає на нормальну роботу самого апарату. Крім того, вода, що розбризкується на оболонку в будь-якому напрямку, не повинна шкідливо впливати на апарат.

Електричні апарати встановлюються у виробничих приміщеннях, де працюють різні машини та механізми, які створюють вібрацію та удари. Ці впливи сприймаються апаратами, і може статися порушення їх нормальної роботи. Вимоги щодо вібро- та ударостійкості апаратів регламентуються нормативними документами.

Усього є 29 груп механічних впливів. Наприклад, у групі експлуатації M1 (безпосередньо на стінах підприємств, фундаменту тощо) апарат повинен витримувати вібраційні навантаження частотою до 35 Гц та прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$.

Розглянемо декілька технічних параметрів, що характеризують техніко-економічний рівень апаратів. Серед них *механічна та комутаційна зносостійкість*. Вони визначаються кількістю комутацій електричного апарату до тих пір, поки він стане непридатним для нормальної роботи з точки зору працездатності його механічних частин і комутують контактів, які піддаються впливу електричної дуги включення та відключення. Відокремлюється три категорії комутаційної зносостійкості (А, Б і В) залежно від матеріалу контактних накладок апарату.

Контакти, виконані з контактними накладками на основі срібла (наприклад, СОК-15) відносяться до категорії А і мають підвищену зносостійкість. Механічна та комутаційна зносостійкість апаратів керування визначають надійність і довговічність їх роботи в режимі нормальних комутацій.

Для електричних апаратів розподільчих пристроїв, наприклад, автоматичних вимикачів та запобіжників, важливим параметром є *гранична комутаційна спроможність (здатність)* (ГКЗ). Гранична комутаційна спроможність – це здатність апарату відключати (включати) великі струми, залишаючись при цьому придатним для подальшої роботи, тобто це найбільша здатність електричного апарату відключати і включати навантаження. Найбільша здатність апарату відключати визначається діючим значенням струму КЗ в колі, який апарат здатний розімкнути і успішно погасити при цьому електричну дугу, яка виникає.

Таблиця 1.2 – Ступень захисту апаратів (IP)

Позначення ступенів захисту	Захист від проникнення твердих тіл та дотику персоналу зі струмопровідними частинами, що обертаються.	Захист від проникнення води
1	2	3
0	Спеціальний захист відсутній.	
1	Захист від проникнення всередину оболонки великої ділянки людського тіла, наприклад, руки та твердих тіл розміром понад 50 мм	Краплі води, що падають вертикально на оболонку, не мають шкідливо впливати на апарат
2	Захист пальців або предметів довжиною не більше 80 мм та твердих тіл розміром понад 12 мм.	Краплі води, що падають на оболонку вертикально, не мають шкідливо впливати на апарат при нахилі оболонки до 15 ⁰ відносно нормального положення
3	Захист від інструментів, дротів та твердих тіл діаметром менших за 2,5 мм	Дош, який падає на оболонку під кутом 60 ⁰ від вертикалі, не має шкідливо впливати на апарат

Кінець таблиці 1.2

1	2	3
4	Захист від твердих тіл розміром більших за 1 мм	Бризки, що падають на оболонку в будь-якому напрямку, не мають шкідливо впливати на апарат
5	Захист від пилу в кількості, що недостатня для порушення роботи виробу	Струмені, що викидаються в будь-якому напрямку, не мають шкідливо впливати на апарат
6	Захист від пилу повний (пилонепроникний)	Захист від хвиль (вода при хвилюванні не має потрапити всередину в кількості, що спричиняє пошкодження апарату)
7	Захист при зануренні у воду	Вода не повинна потрапити всередину оболонки в кількості, що спричиняє пошкодження апарату, при зануренні у воду на короткий час
8	Захист при тривалому зануренні у воду	Вода не повинна потрапити всередину оболонки в кількості, що спричиняє пошкодження апарату, при зануренні у воду на при тривалому зануренні у воду

Найбільша здатність апарату включати визначається найбільшим амплітудним значенням струму короткого замикання в колі, який апарат здатний включити без ушкоджень, у тому числі без приварювання контактів. Найчастіше користуються поняттям *одноразової граничної комутаційної здатності*, під якою розуміється здатність апарату один раз відключити ударний струм КЗ. Після цього він може виявитися непридатним для подальшої роботи або потребує ремонту.

1.3 Контрольні питання

1.3.1 Які аварійні режими можуть виникати в електричних колах? Їхні особливості.

1.3.2 Які споживачі електроенергії є найпоширенішими? У чому особливості їх функціонування?

1.3.3 Що таке захисна характеристика апарату? Як вона узгоджується з навантажувальною характеристикою об'єкта, що захищається?

1.3.4 Які особливості електричних мереж 0,4 кВ? Від чого залежить струм короткого замикання у таких мережах?

1.3.5 Які технічні параметри електричних апаратів називають основними? Чому?

1.3.6 Що таке категорія застосування електричних апаратів керування? Що вона характеризує?

1.3.7 Що таке гранична комутаційна здатність та комутаційна зносостійкість апарату?

2 КОНТАКТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АПАРАТІВ

Контактом називається місце механічного з'єднання струмопровідних елементів електричного кола, призначених для його замикання або розмикання.

Основні терміни та поняття, згідно зі стандартом (ГОСТ14312-79) [13] наступні:

– робоча поверхня контакт-деталі (к.-д.) – це частина поверхні, яка призначена для забезпечення електричного контакту;

– умовна площа контакту – це частина робочої поверхні к.-д., на якій відбувається зіткнення з іншою к.-д.;

– ефективна площа контакту – це частина умовної площі контакту, через яку електричний струм переходить з однієї к.-д. до іншої;

– зазор контакту електричного кола – це найкоротша відстань між рухомою та нерухомою к.-д. при їх розімкненому стані;

– провал контакту електричного кола – це відстань або надлишковий хід контактного елемента, який визначається як відносне зміщення, що має місце у контактному елементі після того, як контакт займе своє замкнене (розімкнене) положення для замикального (розмикального) варіанту контакт - деталі.

– натискання – це сила, що діє між двома замикальними контакт-деталлями, нормальна до поверхні їх зіткнення F_k ;

– опір контакту електричного кола складається з опору к.-д. $R_{к.-д.}$ та перехідного опору контакту $R_{пер}$ електричного кола, тобто $R_k = R_{к.-д.} + R_{пер}$;

– перехідний опір $R_{пер}$ контакту електричного кола – це електричний опір зони контактування, що визначається ефективною площею контакту, і дорівнює співвідношенню падіння напруги на контактному переході до струму через цей перехід.

На рис. 2.1 наведена стисла класифікація електричних контактів.

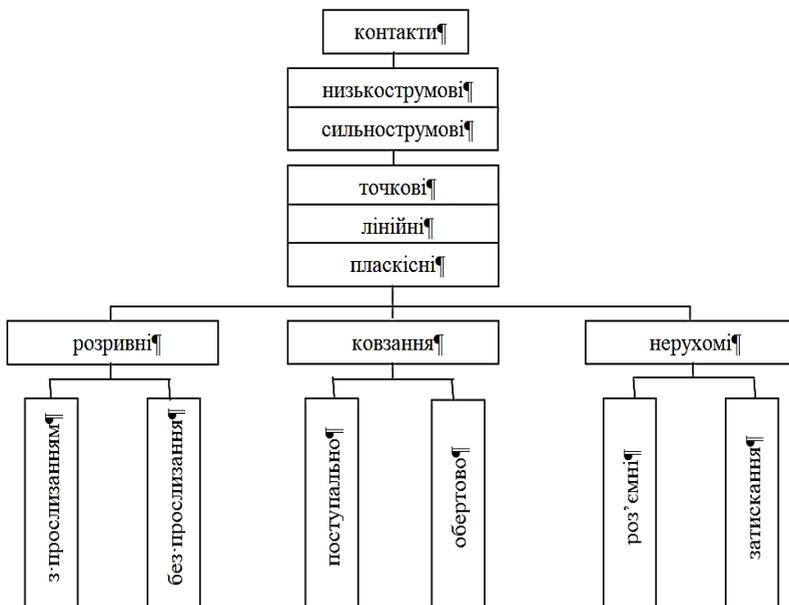


Рисунок 2.1 – Стисла класифікація електричних контактів [51]

Фізичні процеси, що протікають при роботі контактів визначаються конструкцією, властивостями матеріалу, умовами довкілля, процесами в замкненому електричному колі, при вмиканні та вимиканні [2, 6, 8, 34, 40].

Відомо, що умови роботи електричних контактів у замкненому стані визначаються рядом теплофізичних, механічних і електричних процесів, що відбуваються в площині контакту. Мікротопографія поверхні електричного контакту характеризується макровідхиленнями форми, хвилястістю і шорсткістю.

Насправді, навіть ідеально гладкі поверхні стискаються не більше ніж в трьох точках (місцях) відповідно до мікрогеометрії перерізу (рис. 2.2, а).

При цьому електричний струм проходить лише в місцях безпосереднього контакту, а отже зменшується площа S_k , через яку проходить струм. Добре видно, що лінії струму ніби стягуються до

реальної площі натискання (рис. 2.2, б, з), а це, в свою чергу, призводить до появи опору стягнення R_c . На поверхні контактів утворюються плівки головним чином при зіткненні матеріалу з довкіллям. Особливо це має значення для малопотужних контактів.

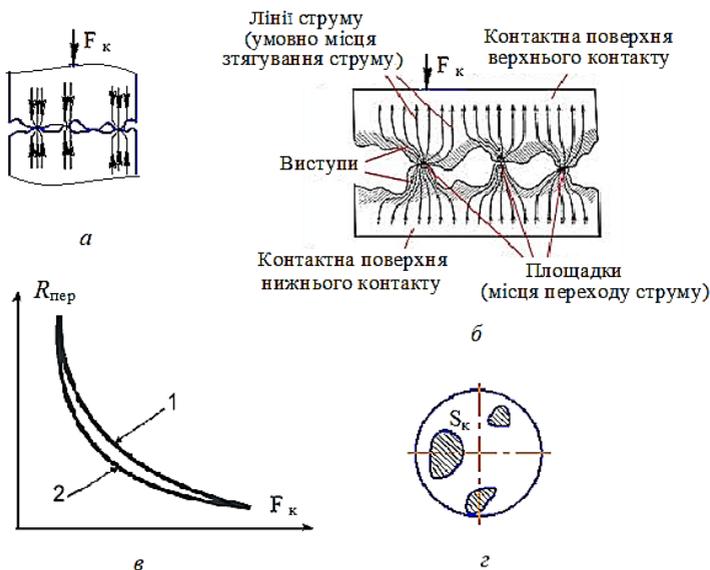


Рисунок 2.2 – Картина проходження струму через контактне з'єднання:

- а – поперечний переріз; б – місця стягування струму;
- в – графік залежності від прикладеної сили натискання;
- г – місця реальних точок контактування

До основних видів плівок відносяться: адсорбовані кисневі (адгезійні) плівки та плівки потьмарення (окисні або сульфідні). Плівки сприяють появі опору плівок $R_{пл}$. Окрім тих плівок, що утворюються при зіткненні з середовищем, контакти можуть забруднюватися при виробленні реле органічними (вуглеводневими) речовинами пластмасового каркаса котушки та ізоляції провідників котушки, а якщо проводиться паяння, то і

частками припою та флюсу. Але ці забруднення необхідно ретельно видаляти перед герметизацією реле.

Кожна одинична пляма контакту може складатися з різних ділянок:

- з чисто металевим контактом;
- з квазіметалевим контактом (коли контактні елементи розділені тонкою адгезійною плівкою або тонкою до 20 \AA плівкою потьмарення);
- з неметалічним контактом, вкритим товстими плівками потьмарення.

У загальному випадку до двох опорів R_c та R_{nl} додається опір, утворений викривленням кристалічної решітки в зоні деформації $R_{кр}$. Тоді сумарний опір буде рівний

$$R_{пер} = R_c + R_{nl} + R_{кр}. \quad (2.1)$$

Зазвичай $R_{кр}$ не перевищує декількох сотих од відсотків від R_c і $R_{кр}$, тому в більшості випадків його можна не враховувати. Чисті контакти мають опір $R_{пер} \approx 0$. Адгезійні плівки зазвичай дуже тонкі, мають тунельну провідність, оскільки здатні пропускати електрони. Така контактна пляма називається квазіметалевою. Окисні і сульфідні плівки пробиваються електрично, тобто електричним пробоем, що виникає при певному значенні електростатичного поля всередині плівки. Такий пробій носить назву фрітінг. Фрітінг приводить до збільшення сил молекулярного зчеплення між чистими металами і подальшому мікрозахопленню з глибинним вириванням при вимиканні. На практиці від плівок позбавляються конструктивними, технологічними та профілактичними методами. Наприклад, при тривалому режимі час роботи обмежується 8 годинами, при цьому передбачається руйнування плівок при періодичних вмиканнях і вимиканнях, випалюванні дугою, перекочуванням і таке інше. Якщо ж за умовами роботи не можна відключати електричний апарат, то при розрахунках номінальні струми I_n необхідно зменшити приблизно на 20% задля зменшення нагрівання, тощо. Крім того, оскільки опір контакту в основному залежить від

матеріалу контакту, числа площадок торкання і сили натискання, тому мідні контакти покриваються сріблом, або робочі ділянки контактів забезпечуються срібними накладками. При ремонтних роботах на нерухомих контактних з'єднаннях застосовують мікрозсуви для руйнування плівок. Позитивний вплив плівок полягає в тому, що вони запобігають можливості розвинення надмірно великих сил міжмолекулярного зчеплення на поверхні торкання котактів.

Для інженерних розрахунків перехідного опору можна застосувати наступну емпіричну формулу [2, 3, 29, 47, 53, 55]:

$$R_{пер} = \frac{K_1 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \Delta\theta \right)}{(0,102 F_k)^m}, \quad (2.2)$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує матеріал і стан контактних поверхонь;

α – температурний коефіцієнт матеріалу контакту;

$\Delta\theta = \theta_p - \theta_0$ – температура перегріву контакту, при робочій температурі θ_p у зрівнянні з температурою довкілля θ_0 ;

F_k – сила контактного натискання;

m – коефіцієнт форми контактної поверхні, який приймається 0,5 для точкового контакту; 0,5...0,8 – для лінійного та 1,0 – для площинного.

Крім того опір $R_{пер}$ також залежить від обробки поверхні контактів. При шліфуванні поверхня виступів є більш пологою з більшою площею. Зминання таких виступів можливе лише при великих силах натискання. Тому опір шліфованих контактів (крива 2) вищий, ніж контактів із грубішою обробкою (крива 1) (див. рис. 2.2, в).

Розрізняють контакти нерухомі (рис. 2.3 а) та рухомі. Останні поділяються на ковзні та стикові. Типова конструкція ковзного контакту (рис. 2.3 б) містить рухомий контакт (1) і вилку (2). Натискання контактів забезпечується пружністю матеріалу вилки та плоских пружин (3). Як стикові використовуються місткові контакти (рис. 2.3, г) та ін. Для збільшення зносостійкості

застосовують важільні контакти з перекочуванням одного контакту щодо іншого (рис. 2,3, в). У розімкненому стані рухомий контакт (1) знаходиться відносно нерухомого (2) у вказаному на рис. (2.3, в) положенні. Початок зіткнення контактів при їх замиканні відбувається в точці А, а при дотисканні точка контакту контактів переміщається в точку Б. В результаті контакти менше піддаються ерозії від електричної дуги. Для прискорення її гасіння при розмиканні контактів застосовуються «роги» (3), вздовж яких дуга переміщається, розтягується та гасне.

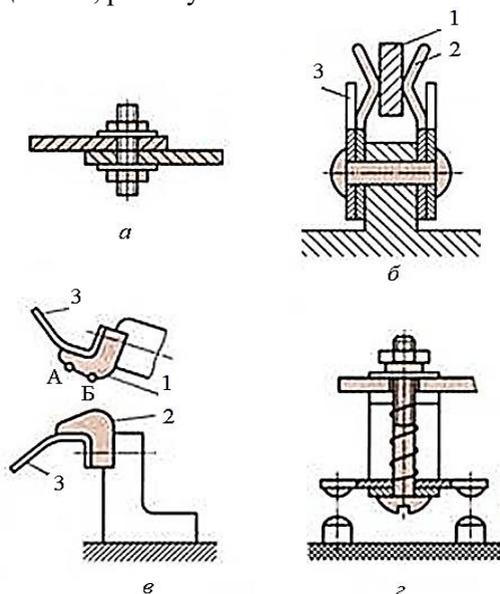


Рисунок 2.3 – Конструкції рухомих та нерухомих контактів [83]

Відключення електричного кола не може бути миттєвим. При розриві кола струму виникнення більшої чи меншої ЕРС самоіндукції є неминучим. Під дією цієї ЕРС і напруги мережі проміжок між контактами, що розходяться, пробивається і виникає електрична дуга. Значна температура дуги призводить до руйнування чи зварювання контактів. Особливо небезпечна дія дуги в апаратах високої напруги при відключеннях струмів короткого замикання. Відключення кіл синусоїдального струму

істотно спрощується, оскільки синусоїдальний струм періодично набуває нульового значення, що призводить до гасіння дуги. Значно важче відключення кіл постійного струму високої напруги. Вимикачі постійного струму повинні бути розраховані на поглинання значної енергії, що виділяється під час тривалого горіння дуги постійного струму.

Матеріали, які використовуються для електричних контактів, мають велике значення, адже від них залежить успішне функціонування тієї чи іншої схеми. Ці матеріали відіграють важливу роль у таких великих сферах, як електричні машини та електричне обладнання. Отже, вибір відповідного матеріалу для електричних контактів справді дуже важливий. Успішне використання електричних контактів для специфічного застосування є наслідком різних чинників. При виборі відповідного матеріалу для електричних контактів необхідно врахувати безліч різноманітних факторів, щоб підібрати саме той матеріал, який оптимально підійде для конкретної ситуації. Деякі з найважливіших факторів продемонстровані нижче.



Рисунок 2.4 – Фактори, що впливають на якість контактного матеріалу

Сила натискання контакту впливає на контактний опір пари контактів залежить від сили при замкненій позиції контактів. Контакти мають виявляти стійкість протягом їх експлуатації, при якій збільшується необхідний контактний площа контактів. Ця контактна сила дуже ефективна в тому випадку, якщо контакти мають викривлену поверхню порівняно з контактами, які мають рівну поверхню. Також контактна сила може бути від 1 грама до 1 кілограма. Матеріали, які використовуються для електричного контакту, повинні мати можливість витримати цю контактну силу.

Ефективність роботи контактів залежить від *напруги та електричного струму*, який контакти повинні як пропускати, так і не пропускати під час своєї роботи. Тому звісно необхідно приділити чимало уваги цьому фактору при підборі відповідного матеріалу для контакту. Ті контакти, які використовуються при постійному струмі, повинні бути з такого матеріалу, який зможе здійснити передачу з поверхні контакту, з якого йде постійний струм, на інший контакт. Відповідно, на одному з цих контактів повинен бути бугор, а на поверхні іншого контакту має бути отвір (на тому контакті, з якого йде постійний електричний струм). Напрямок передачі може перетворювати як позитивний в негативний, так і навпаки. Це залежить від полярності іонів, що створюються матеріалом.

Основна функція багатьох електричних контактів полягає в тому, щоб проводити електричний струм. Звідси впливає, що електричний контакт повинен мати дуже маленький *контактний опір*, щоб не мати небажаного падіння напруги, що проходить через контакт, особливо в тому випадку, якщо номінальне значення напруги невелике. Опір контакту можна розділити на дві складові, які суттєво відрізняються одне від одного та мають різну величину. Контактний опір складається з опору на матеріалі та опору поверхні між контактами. Опір матеріалу контакту дуже низький порівняно з опором взаємної дії. Поверхні взаємного впливу контакту є рівними. Кожна рівна поверхня має кілька маленьких точок проекції. Ці невеликі точки проекції обмежують область торкання поверхонь, які взаємно впливають одна на одну (див. рис. 2.2). Внаслідок цього, ефективна область взаємного впливу, через яку проходить електричний струм, дуже мала

порівняно із загальною областю поверхонь взаємного впливу. Тому опір на контакті взаємного впливу дуже великий. Для зменшення цього контактного опору, необхідно зробити поверхні взаємної дії настільки гладкими, наскільки це можливо, щоб збільшити область поверхонь взаємного впливу, які торкаються одне одного. Контактний опір може змінюватись разом із забрудненням поверхні взаємного впливу, що має хімічну природу, а саме воно виражається в окисненні матеріалу контакту. Таке окислення матеріалу, з якого зроблений контакт, є основною проблемою, пов'язаною з електричними контактами. Ці сполуки формують тонкий шар плівки на поверхнях контактів. Дані з'єднання не проводять електричний струм, перебуваючи у природі. Ця обставина призводить до того, що контактний опір значно зростає.

2.1 Матеріали контактів

Під час вибору матеріалу, який би підходив для електричних контактів, необхідно враховувати, що цей матеріал повинен мати більший опір по відношенню до корозії при робочій температурі. Також матеріал для електричних контактів має бути вільним від окислення під час дугового розряду. В іншому випадку, хімічні сполуки, які були перераховані вище і які будуть утворюватися в процесі окислення, можуть утворювати шар тонкої плівки, що не проводить, на поверхнях контактів, внаслідок чого відбудеться збільшення контактного опору [83, 84, 92].

Під час роботи електричних контактів, що використовуються в схемах зі значним номінальним значенням електричного струму, дуговий розряд створює дуже високу температуру. Через те, що температура висока, є ймовірність того, що контакти можуть склеїтись або приваритися один до одного (*клейкість або зварюваність*). Звідси випливає, що при виборі матеріалів, які підходять для електричних контактів, потрібно враховувати, що матеріал для даної функції повинен мати здатність витримувати таку високу температуру. Матеріал не повинен зварюватися при такому навантаженні на нього.

Під час роботи електричних контактів виникає електрична дуга. Для того, щоб експлуатація електричних контактів була ефективною, ця електрична дуга має бути погашена, якомога раніше. Відповідно, при виборі матеріалу контактів потрібно враховувати, що він повинен мати *здатність*, яка допомагатиме *гасити електричну дугу*.

Загальний опір електричних контактів повинен бути як найменшим для зменшення втрат при перемиканні. Тому матеріал, який позиціонується як матеріал для електричних контактів, повинен мати *значну електричну провідність*, щоб задовольняти вимогам, що виконують електричні контакти в схемі.

У ході експлуатації електричних контактів, які застосовують у схемах зі значним номінальним значенням електричного струму, дуговий розряд створює тепло, яке призводить до дуже високої температури. Щоб уникнути концентрації цього тепла на поверхні контактів, це тепло має бути розподілене по поверхні контакту і віддаватися в атмосферу. Тому при пошуку матеріалу, який підходив би для електричних контактів, варто звернути увагу на те, щоб даний матеріал мав *значну провідність тепла*.

Рухомі та нерухомі контакти для пускачів типу ПМ12, ПМА, ПМЛ, ПМЕ, контакторів серій КТ, ККД, КТП, КПВ, КТПВ, МК або контролерів ККТ, ККП, КА, для вітчизняних та імпортованих електронавантажувачів, електровізків, електровозів, електропоїздів, а також контактні вузли призначені для ліфтової комутаційної апаратури можуть бути мідними, мідними з лудінням, латунними, зі срібною напайкою (з технічного срібла) різної товщини.

Нерухомі та рухомі електричні контакти виготовляють з нижче перерахованих матеріалів.

Мідні контакти – відповідають практично всім перерахованим вимогам, крім вимоги до корозійної стійкості, а також оксиди міді мають дуже низьку провідність. Мідь – це найпоширеніший матеріал контактних з'єднань і використовується як для комутуючих, так і розбірних контактів. У складі розбірних контактних з'єднань використовуються антикорозійні покриття їхньої робочої поверхні. У складі комутуючих контактів мідь може застосовуватися при силах натискання, що перевищують 3 Н для

будь-яких режимів роботи, за винятком тривалого. Мідь не рекомендується використовуватися при тривалому режимі, але якщо вона буде застосована, то обов'язково необхідно вжити спеціальних заходів для якісної боротьби з окисленням всіх робочих поверхонь. Матеріали з міді можуть бути використані у складі дугогасних контактів. Не рекомендується застосовувати мідні контакти при невеликих контактних натисканнях ($F < 3 \text{ Н}$) (рис. 2.5).

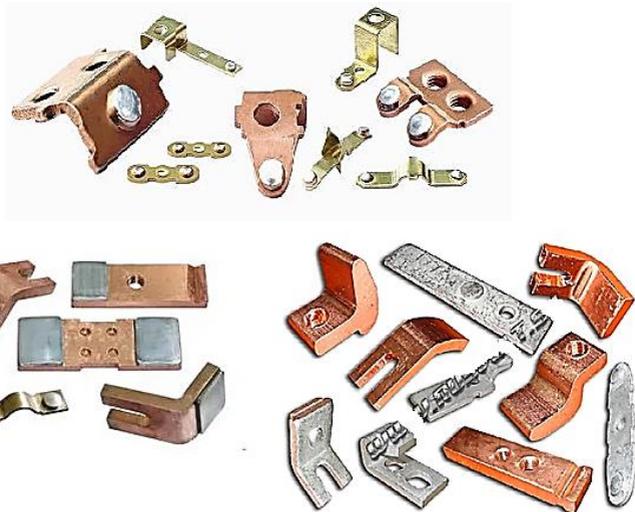


Рисунок 2.5 – Електричні контакти комутації рухомі та нерухомі для реле, контакторів, пускачів, контролерів [8, 18, 84]

Нікельовані (луджені) або покриті оловом контакти мають дуже хороші показники механічної зносостійкості. Нікельовання (лудіння) – це найвідоміший гальванотехнічний процес. Висока корозійна стійкість, привабливий вигляд та механічні властивості цього матеріалу сприяють ширшому використанню нікелю, а також олова у складі електричних контактів. Для запобігання корозії латунь або мідь обов'язково покривають дуже щільним без пористості та товстим шаром нікелю або олова. Наприклад, в хімічній промисловості обов'язково покривають товстим шаром олова і нікелю деталі, на які можуть впливати будь-які міцні луги.

Срібні контакти (такі, що містять срібло) – відмінний контактний матеріал, який задовольняє всім вимогам, крім дугостійкості при дуже значних струмах. При малих струмах посріблені електричні контакти мають досить хорошу зносостійкість. У оксидів срібла є аналогічна провідність, як і чистому сріблі. Матеріали зі срібла широко використовуються в головних електричних контактах, приладах на дуже великі струми, для всіх нерухомих, а також рухомих контактів при тривалому режимі роботи. Також використовується в контактах на невеликі струми при невеликих натисканнях (контакти допоміжних кіл, контакти реле). Саме срібло зазвичай застосовують у разі як накладок (напайок) – вся деталь повністю виготовлена з міді чи іншого матеріалу, на який припаюється (приварюється) срібна напайка (накладка), що утворює своєю чергою робочу поверхню (див. рис. 2.5).

Алюмінієві контакти – в порівнянні з мідними мають значно меншу механічну міцність і провідність. Вони утворюють тверду оксидну плівку, що погано проводить, і це дуже сильно обмежує застосування даного матеріалу. Алюміній може бути використаний у розбірних контактних з'єднаннях (наприклад, шинопроводи або монтажні дроти), але для цього всі контактні робочі поверхні необхідно посріблити, зменшити або армувати міддю. Обов'язково потрібно враховувати невисоку механічну міцність алюмінієвих з'єднань, внаслідок чого ці з'єднання поступово можуть ослабнути і контакт зникне (потрібно уникати завищення контактного натискання). Для використання в комутуючих контактах алюміній є абсолютно непридатним.

Застосування методів порошкової металургії дозволяє створити так звані металокерамічні контакти, тобто контакти, виготовлені методом твердофазного спікання суміші порошків різних металів та окисів, підібраних у певних пропорціях. Відповідний підбір інгредієнтів дозволяє отримати металокерамічні контакти, які у певній мірі задовольняють більшості суперечливих вимог до стикових контактів комутаційних апаратів та апаратів керування і долають недоліки: невелику міцність, схильність до зварювання, сульфідну корозію.

Технологія виготовлення металокерамічних контактів передбачає такі етапи:

1) змішування (віброзмішування) порошків у заданих пропорціях;

2) пресування;

3) спікання при температурі, яка є меншою за температури топлення компонентів;

4) опресовування та повторне спікання з метою ущільнення й надання контактам остаточної форми.

Гетерогенні чи неоднорідні середовища, до яких належать і композити (композиційні матеріали), поширені у природі та широко використовуються у техніці. Порівняно простий спосіб отримання полягає у механічному об'єднанні кількох компонентів, що різняться за своїми властивостями. Шляхом усіляких поєднань складових елементів і видозміною структурної побудови можна створювати композити з великою різноманітністю фізико-механічних характеристик, найчастіше невластивих кожному окремо взятому компоненту. Наповнювач розподіляється в матриці з утворенням різних структур (рис. 2.6): матричної (острівкової), статистичної, орієнтованої або шаруватої. Крім того, частинки наповнювача можуть розподілятися у просторі між гранулами або глобулами полімеру [83].

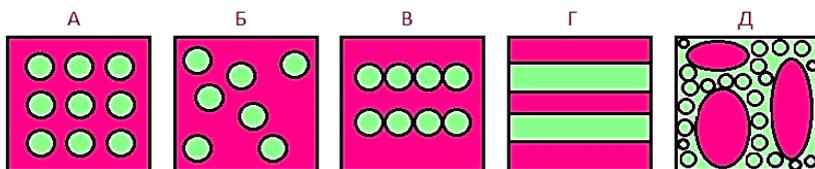


Рисунок 2.6 – Різні типи структур, що утворюються частинками наповнювача в полімері:

А – матричні (проста кубічна решітка); Б – статистична; В – орієнтована;
Г – шарувата; Д – частинки перебувають між гранулами (глобулами) полімеру.

Усі перелічені структури, крім, мабуть, матричної, зустрічаються у реальних композитах. Матричні структури є моделями для теоретичних розрахунків.

На властивості композиційних матеріалів впливає багато факторів. Зокрема багатьма дослідженнями підтверджено, що вони залежать від типу наповнювача та його концентрації, від форми та розміру частинок, їх здатності до структуривання та фізико-хімічного стану поверхні, від типу полімеру та його фізичного стану, від способу та технологічних параметрів виготовлення та переробки матеріалу, і навіть від зовнішніх чинників – частоти електромагнітного поля, температури, тиску, впливу електричного і магнітного полів під час виготовлення композита.

Основними перевагами металокерамічних контактів перед контактами, виготовленими з чистих металів є майже повна безвідходність та можливість отримувати властивості контактних матеріалів, які є непритаманними чистим металам та стопам.

Серед найбільш розповсюджених металокерамічних композицій варто зазначити такі:

- А10 – $85,0 \pm 0,5\%$ срібла, решта – окис кадмію (у ГОСТ 19725 наводиться лише позначення для дрібнодисперсної композиції – А10м);

- А30 – $70,0 \pm 0,5\%$ срібла, решта – нікель, а також модифікації: дрібнодисперсна композиція А30м та композиція А30мд, яка передбачає подвійне спікання.

Композиційні матеріали із рідкими металами утворюють специфічну групу композиційних контактних матеріалів, що виробляються методом просочення. Такі матеріали являють собою пористий каркас вольфрамовий (порошковий – жорсткий або дротяний – пружний), просочений легкоплавким металом або сплавом.

Композити з рідкими металами поєднують у собі переваги як твердих, так і рідких контактів: твердий каркас надає контакту механічну міцність та незалежність робочих характеристик від положення в просторі, а рідкий метал забезпечує малий перехідний опір незалежно від контактного натискання, а також виключає зварюваність. Такі матеріали на основі порошкового каркасу одержують з вольфрамового порошку, а на основі пружного каркасу – з вольфрамової сітки. В якості рідкого металу може використовуватися, наприклад, галій або його евтектичні

сплави, що знаходяться в рідкому стані при температурах вище за 3⁰С. Цей тип контактів застосовується переважно для сильноточних комутаційних апаратів.

У сильноточних вузлах струмознімання електричних машин, транспорту тощо використовуються метали або сплави тільки для найдефіцитніших контактних елементів (колектор, контактні кільця, контактний провід тощо) . Натомість для змінних контактних елементів (щітки, контактні вставки тощо) широко застосовуються багатокомпонентні композиції, що самозмащуються.

Матеріали на основі вуглецю відіграють домінуючу роль як антифрикційні самозмащувальні матеріали, включаючи підшипники, ущільнення, контактні щітки, контактні вставки. Більшість контактних матеріалів на основі вуглецю одержують методами вугільної кераміки або порошкової металургії з порошоків графіту, вугілля, сажі та деяких інших. У вуглецевих композиціях і металографітних сумішах з великим вмістом графіту застосовуються також сполучні речовини, що надають масі властивості, необхідної для формування.

Графіт має досить високу провідність, не формує плівок потемніння, дугостійкий та не зварюється, зберігає свої властивості за високих температур. Тому графітові або вугільні контакти широко застосовуються в системах із високим рівнем вимог до характеристик контактних матеріалів. Синтетичний графіт може бути отриманий піроліз коксу при температурах вище 2200 °С. Також піролізу можуть бути піддані багато типів термореактивних смол, насамперед, фенольних.

Найбільша сфера використання вуглецевих матеріалів – це щітки електричних машин. Графіт, вугілля, сажа тощо входять до складу більшості типів щіток та забезпечують їх відносно низьке тертя, хороші властивості, що комутують. Їм властиві характерні висока хімічна стійкість, низький коефіцієнт лінійного розширення, задовільні тепло- і електропровідність, антифрикційні властивості. Це зумовило високі експлуатаційні якості контактних матеріалів на основі вуглецевих речовин під час роботи в нормальних умовах. За рахунок зміни співвідношення компонентів у рецептурі та загальній схемі технологічного

процесу переробки порошкових композицій на даний час отримана широка номенклатура вуглецевих щіткових матеріалів. Істотний недолік контактних матеріалів з вуглецем – висока чутливість до стану доквілля.

Контакти марки КМК-А30 мають високу електроерозійну стійкість (в порівнянні зі сріблом) і низький стабільний перехідний опір. Дрібнодисперсний контактний матеріал з розміром частинок 1 мкм (КМК-А30м) має електроерозійну стійкість в 1,5...2 рази вищу ніж матеріал з частинками 10...100 мкм (КМК-А30). Основний недолік контактів марки КМК-А30 – низька стійкість до зварювання. Для збільшення стійкості до зварювання при перевантаженнях та струмах короткого замикання контакти марок КМК-А30м використовують в автоматичних вимикачах у парі з контактами КМК-А41 (97±0,5% срібла, решта – графіт).

В контакторах як на рухомих, так і на нерухомих контактах донедавна широко застосовувалася металокерамічна композиція марки КМК-А10 (85% срібла та 15% оксиду кадмію), яка має унікальну дугогасну здатність, стабільність контактного опору, а також відносно високу стійкість до ерозії та зварювання [28, 83].

Для роботи при високих електричних та механічних навантаженнях та швидкісних режимах використовуються композиційні матеріали з металевою матрицею та функціональним наповнювачем. Металева матриця служить каркасом, що сприймає механічне навантаження, а наповнювач забезпечує необхідні електричні та теплові властивості. В даний час для ковзких контактів розроблено велику кількість технологій отримання контактних матеріалів, що самозмащуються, в яких в металевій матриці рівномірно розподілений графіт та інші тверді мастила.

У сучасному електрообладнанні знаходять застосування контактні матеріали, що виготовляються методом гарячого пресування з використанням термореактивних смол. Синтетичні смоли забезпечують зв'язність і пластичність маси, що формується, надають сформованому матеріалу монолітність, однорідність та міцність. При низькотемпературному відпалі у цих матеріалах не утворюється струмопровідна коксова решітка, що збільшує електричний опір, обмежуючи при цьому вміст

сполучення кількома відсотками. Це важливо насамперед для виготовлення резистивних елементів.

Характерною рисою вуглецевих волокон є їхня висока міцність при розтягуванні. Такі волокна можуть бути введені в матрицю графіту або металу для підвищення міцності, жорсткості та зносостійкості [92].

Малопотужні розривні контакти реле виробляються з благородних і тугоплавких металів Au, Ag, W, Mo, Pt, Pd, Rh, Ir, Ru їх сплавів [4, 17, 51]. Це найкращі матеріали, оскільки вони або не окислюються, або не утворюють сірчистий непровідний шар (плівку), чим забезпечують стабільний $R_{пер}$. Найбільший струм дугоутворення в них (0,35...0,45) А, а в Pt – навіть 0,9 А.

Платина Pt в чистому виді використовується для контактів дуже рідко через малу твердість, але ж застосовуються такі сплави:

- Pt + Ir – стійкий проти електричної ерозії;
- Pt + Ru – мало схильний до зварювання і міцніший за Pt + Ir;

- Pt + Ni – стійкий до іглоутворення і зварювання;
- Pt + Rh – має малу летючість при високих температурах.

Паладій Pd – як контактний матеріал поступається Pt, та його вартість приблизно в 4 рази менше. Його сплави характеризуються такими властивостями:

- Pd + Ag – має стабільне $R_{пер}$;
- Pd + Cu і Pd + Ir – має високу твердість, але потребує спеціальну термообробку.

Золото Au та його сплави більш схильні до дугоутворення, ніж Pt і Pd, та в чистому виді застосовується лише для прецизійних (високоточних) контактів, що працюють при малому натисканні і малій напрузі. Сплави піддаються електричній ерозії та мають такі властивості:

- Au + Ag – не утворює сірчистих плівок;
- Au + Pt та Au + Ag + Cu – мають підвищену твердість;
- Au + Ni та Au + Ag + Ni – окрім твердості набуває стійкості проти голкоутворення;
- Au + Pd + Ni – найтвердіший тугоплавкий сплав.

Срібло Ag – має найбільше значення електро- та теплопровідності, що забезпечує порівняно менший нагрів контактів, але ж він дуже дефіцитний матеріал, тому гостро стоїть питання економії і заміни його в електротехніці та електроніці. Його окисли електропровідні і при нагріванні руйнуються. Його сплави мають такі властивості:

– Ag + Cu – має підвищену твердість, застосовуються при великих натисканнях, але при малих – він непридатний через нестійкість $R_{неп}$;

– Ag + Cd – застосовується як металокераміка.

Вольфрам W має підвищену стійкість до дугоутворення, електричної ерозії та зварюванню. Застосовується при великих натисканнях. Особливо часто застосовується сплав із молібденом W + Mo. Як припої при паянні контактів до контактних пружин застосовуються сплави Ag + Cu, або Ag + Cu + Zn.

З метою економії дефіцитних матеріалів широкого поширення набула заміна суцільнометалевих контактних елементів шаруватими. Їх виробляють плакуванням підкладки (подложки) з неблагородного металу, благородним металом або матеріалом на його основі. Товщина робочого шару зазвичай становить 2...50% від загальної товщини контакту. Для виготовлення шаруватих контактів використовують матеріали систем Ag-Ni, Ag-C, Ag-CdO, Ag-CuO, Ag-Ni-C, Ag-W (Mo), Cu-Ag-W тощо. Основою може служити мідь, сплави на її основі, нікель, сталь. Основні методи нанесення матеріалу на деталь з недефіцитного металу: прокатка, волочіння, зварювання, напилення, наплавлення, гальваніка та електроерозійний метод.

2.2 Види контактних груп

За способом роботи контактів електромагнітних реле вони бувають:

– нормально замкненими (закритими, розмикаючими), які скорочено позначаються НЗ, або НС;

– нормально розімкненими (відкритими, замикаючими), які позначаються НО, або НО ;

– перекидними (перемикаючими), які відрізняються зовні, оскільки мають три пластини з контактами, до того ж у них зазвичай пізнається тільки загальний контакт – пишуть «загальний» або «common».

Загалом за наведеними назвами контактів зрозуміло, як вони працюють (рис. 2.7).

Нормально замкнені контакти у початковому стані замкнені, і крізь них протікає струм (рис. 2.7, б). При спрацьовуванні реле контакти розмикаються, коло навантаження розривається.

Нормально відкриті (зрозуміліше – нормально розімкнені) контакти, навпаки, у початковому стані розімкнені (рис. 2.7, а). Коли реле спрацьовує, контакт замикається, і в колі виникає струм.

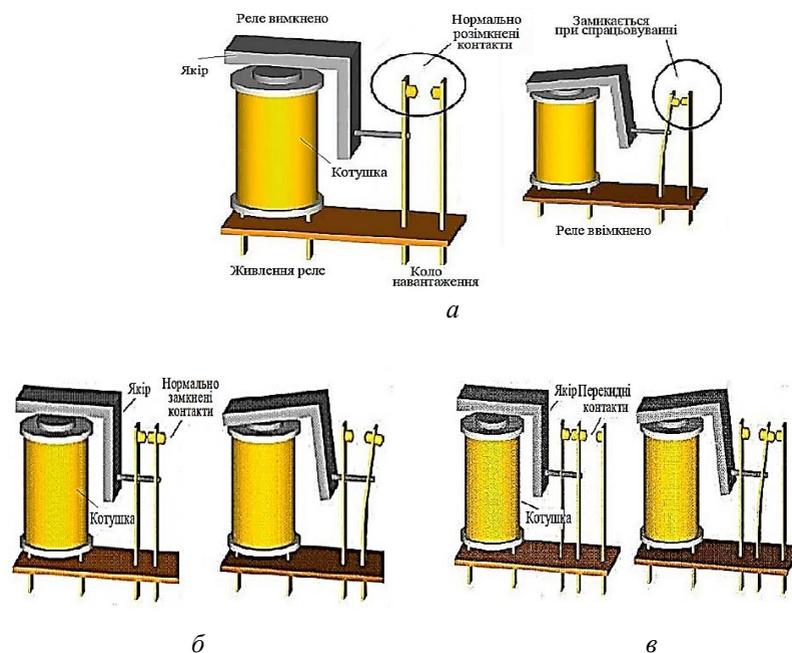


Рисунок 2.7 – Види контактних груп [80, 81]:

а – нормально розімкнені контакти (NO); б – нормально замкнені контакти (NC); в – перекидні (перемикаючі) контакти.

Напевно, вже зрозуміло як працюють перемикачі контакти. На відміну від перших двох, перемикаючий контакт складається з трьох пластин. По краях – дві нерухомі та одна рухома – в центрі. Рухомий контакт зазвичай називають загальним. У нормальному положенні рухома пластина торкається одного з контактів, струм протікає цим шляхом (на рисунку рис. 2.7, в – праворуч). Принцип роботи електромагнітного реле з перемикаючими контактами полягає в тому, що при спрацьовуванні реле, рухомий контакт змінює положення завдяки упорній рамці (на рисунку – це просто штир, припаяний до рухомої пластини). А рамка прикріплена до якоря. Після спрацьовування реле, у першому колі з'являється розрив, у другому – починає протікати струм.

Це всі типи контактів, що здається нібито не так багато. Але ж в одному реле можуть бути зібрані всі три види, і кількість груп кожного виду буває різною. Їх обирають залежно від потреби реле.

2.3 Контрольні питання

2.3.1. Що таке площа контакту та чим вона відрізняється від вдовоної поверхні контактів?

2.3.2. Що таке перехідний опір контактів?

2.3.3. Які існують контактні системи комутаційних апаратів?

2.3.4. Перелічіть матеріали для малопотужних розривних контактів з благородних та тугоплавких металів – платиноїдів.

2.3.5. Композиційні матеріали із рідкими металами.

2.3.6. Матеріали на металевій матриці.

2.3.7. Вуглецеві матеріали.

2.3.8. Матеріали на полімерній матриці.

2.3.9. Матеріали з урахуванням вуглецевих волокон.

2.3.10. Як вирахувати мінімальний струм плавлення та струм зварювання?

2.3.11. Які сили необхідно враховувати при конструюванні контактів?

2.3.12. В чому головна перевага рідкометалевих контактів?

2.3.13. Як пов'язані між собою перевищення температури контактної плоскості над температурою границі зони стягування та падіння напруги на контакті?

3 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ МАГНІТНИХ КІЛ

Відомо, що магнітне коло (МК) – це деяке спрощене уявлення про магнітну систему та її магнітне поле, в якому електромагнітні процеси можна описувати рівняннями, які мають такі дефініції, як магніторушійна сила (МРС), різниця скалярних магнітних потенціалів (магнітна напруженість), магнітний потік, магнітний опір, магнітна провідність. Ці поняття формально аналогічні електрорушійній силі, електричній напрузі, струму, опору, провідності електричного кола відповідно. Тому поняття «магнітне коло» було запроваджено для розрахунків магнітних систем методами теорії полів, що були розроблені головним чином для електричних кіл. Електричний струм протікає в середовищі, провідність якого значно перевищує провідність ізоляції, що оточує провідник. Подібно до цього, провідність середовища, по якому проходить головний магнітний потік (магнітопровід), перевищує провідність немагнітного середовища, яке оточує магнітопровід. Ця аналогія формальна тому, що магнітне поле та поле електричного струму – це різні фізичні види матерії.

Магнітні кола більшості електричних апаратів є розімкненими немагнітними зазорами, що не переривають магнітний потік, а лише збільшують магнітний опір на його шляху. У таблиці 3.1 наведена аналогія між параметрами електричних і магнітних кіл, в якій кількість витків обмотки позначена літерою W [2, 40, 47, 51, 55, 56]. Відомо, що між магнітними полюсами виникає магнітне поле, силову дію якого можна графічно пояснити за допомогою рис. 3.1. Тут прийняті такі позначення: $F_{П.Т.}$ – силові лінії у подовжньому напрямі, або сили «подовжнього тяжіння», та $F_{Б.Р.}$ – у поперечному напрямі, або сили «бічного розпору».

Крім того, магнітні силові лінії мають властивість замикатися по найкоротшому шляху. Сили «бічного розпору» утворюють так зване «випинання» магнітного потоку в бічному напрямі.

На рис. 3.2 представлений електромагніт, що складається з магнітопроводу (ярмо – 1, якір – 2, осердя – 3), виробленого з магнітного матеріалу (сталі), який має невеликий магнітний опір, що дозволяє збільшити робочий магнітний потік Φ_δ в повітряних зазорах 4 і 5, де магнітний опір є високим у порівнянні зі сталлю.

Таблиця 3.1 – Аналогія між параметрами електричних і магнітних величин [51]

Електричні величини			Магнітні величини		
Величина	Рівняння	Одиниці	Величина	Рівняння	Одиниці
Сила струму	$I = \frac{\partial Q}{\partial t}$	А	Напруга індукції	$U = -W \frac{\partial \Phi}{\partial t}$	В
Напруга	$U = E \cdot d$	В	Магніторухайна сила	$E = H \cdot l$	А
Заряд	$Q = I \cdot t$	Кл = А·С	Магнітний потік	$\Phi = B \cdot S$	Вб = В·С
Місткість	$C = \frac{Q}{U}$	$\Phi =$ Кл/В	Індуктивність поля	$L = \frac{B \cdot W}{I}$	$\Gamma_H = B \cdot \frac{C}{A}$
Напруженість поля	$E = \frac{U}{d}$	В/м	Напруженість поля	$H = \frac{I \cdot W}{l}$	$\frac{A}{m}$
Електричне зміщення	$D = \frac{Q}{S}$	$\frac{Кл}{m^2}$	Магнітна індукція	$B = \frac{\Phi}{S}$	$T_L = B \cdot \frac{C}{m^2}$
Енергія поля	$E_e = \frac{C \cdot U^2}{2}$	Дж = Вт·С	Енергія поля	$E_e = \frac{L \cdot I^2}{2}$	$\frac{Дж=Вт \cdot C}{C}$
Електрична постійна	$\epsilon = \frac{1}{\mu_0 \cdot C^2}$	$\frac{\Phi}{m}$	Магнітна постійна	$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot C^2}$	$\frac{\Gamma_H}{m}$
Відносна діелектрична проникність середовища, що показує в скільки раз в даній середовищі сила взаємодії між зарядами зменшується в порівнянні з вакуумом	ϵ	–	Відносна магнітна проникливість середовища – показує в скільки разів магнітна індукція поля, створеного струмом в середовищі більше ніж у вакуумі	μ	
Абсолютна діелектрична проникність	$\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$	$\frac{\Phi}{m}$	Абсолютна магнітна проникливість	$\mu_a = \mu \cdot \mu_0$	

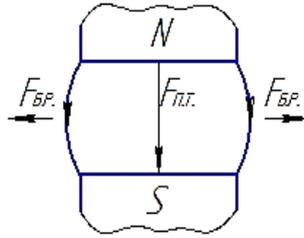


Рисунок 3.1 – Розподіл магнітних силових ліній між полюсами [51]

Магнітний потік Φ_6 , що не замикається через повітряні зазори називається потоком розсіяння. На осерді розташовується обмотка керування – 6.

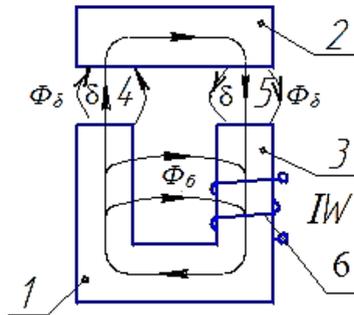


Рисунок 3.2 – Магнітне коло електромагніт клапанного типу з двома робочими зазорами [51]

3.1 Закони магнітних кіл

Закон Ома для простого нерозгалуженого кола [51]:

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{R_M}, \quad (3.1)$$

де R_M – магнітний опір;
 I – струм в обмотці керування;

W – кількість витків обмотки.

Перший закон Кірхгофа. Алгебраїчна сума магнітних потоків в будь-якому перетині магнітопроводу дорівнює нулю:

$$\sum \Phi_x = 0. \quad (3.2)$$

Другий закон Кірхгофа. Падіння магнітного потенціалу по замкненому контуру дорівнює сумі м.р.с., що діють в цьому контурі:

$$\oint \Phi \cdot dR_M = \sum I \cdot W, \quad (3.3)$$

Закон повного струму. Циркуляція вектору напруженості поля H по замкненому контуру дорівнює результуючій силі, що намагнічує, цього контуру

$$\oint H \cdot dl = I \cdot W, \quad (3.4)$$

де l – довжина середньої лінії магнітопроводу;

H – напруженість поля в магнітній системі.

Тоді, якщо припустити, що поле однорідне, можна записати:

$$H \cdot l = I \cdot W. \quad (3.5)$$

Магнітний опір визначається по аналогії з електричним колом, а саме для ділянки з кінцевою довжиною l буде

$$R_M = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S},$$

а, відповідно, магнітна провідність визначається як

$$\Lambda = \frac{1}{R_M} = \mu \cdot \frac{S}{l},$$

де μ – відносна магнітна проникність матеріалу;

S та l - відповідно перетин та довжина ділянки магнітного кола системи.

Закон Біо-Савара-Лапласа (закон Біо) встановлює значення та напрямок вектора магнітної індукції dB в будь якій точці C магнітного поля, яке утворюється елементом dl провідника зі струмом I рис. 3.3.

Тоді закон у скалярній формі запишемо:

$$dB = \mu_0 \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin (dl, r)}{r^2}, \quad (3.6)$$

де r – радіус-вектор, проведений від елемента провідника в ту точку магнітного поля, в якій індукція визначається;

μ_0 – абсолютна магнітна проникність повітря, що дорівнює $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Г/м;

μ_0 – відносна магнітна проникність середовища.

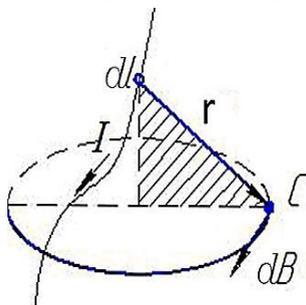


Рисунок 3.3 – Елемент електромагнітного поля. Визначення величини та напрямку магнітної індукції [51]

Напрямок dB визначається за правилом Максвелла (правило буравчика – якщо вкручувати буравчик за напрямом струму в провіднику, то напрям руху рукоятки буравчика вказує напрям лінії магнітної індукції).

3.2 Електромагнітні зусилля

Для визначення електромагнітних зусиль можна використовувати декілька методів. Наприклад, фізичний, або енергетичний підходи [2, 3, 47, 51, 55, 56].

Фізичний підхід полягає у вивченні фізики взаємодії магнітного поля з феромагнетиком. Згідно із законом Біо-Савара-Лапласа на елемент тіла об'ємом dV з об'ємною щільністю струму \vec{j} буде діяти зі сторони магнітного поля з індукцією \vec{B} сила, яка визначається формулою

$$d\vec{F} = \left[\vec{B} \cdot \vec{j} \right] dV, \quad (3.7)$$

отже повна сила:

$$\vec{F} = \oint_V \left[\vec{B} \cdot \vec{j} \right] dV. \quad (3.8)$$

Максвелл перетворив цю формулу до вигляду:

$$F = \frac{l}{\mu} \cdot \oint_S \left[\left(\vec{B} \cdot \vec{n} \right) \cdot B + \frac{1}{2} \cdot B^2 \right] \cdot dS, \quad (3.9)$$

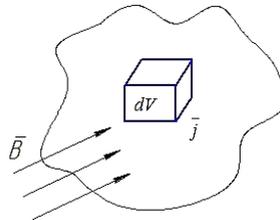


Рисунок 3.4 – Феромагнетик в електричному полі. Визначення електродинамічних зусиль

де B – індукція зовнішнього поля;
 S – площа поверхні феромагнетикау;
 $\vec{j} = n_0 \cdot e \cdot \vec{v}$ – щільність струму,

де n_0 – число електронів провідності в одиниці об'єму,
 e – абсолютне значення заряду електрона,
 \bar{V} – середня швидкість упорядкованого руху електронів.

Тоді, якщо в будь-якій точці поверхні $\bar{B} \perp S$, або колінеарні $\bar{B} \parallel \bar{n}$, та їх похідна дорівнює нулю, сила визначатиметься як

$$F = \frac{l}{\mu_0} \cdot \oint B^2 \cdot dS, \quad (3.10)$$

а для рівномірного поля, коли індукція в будь-якій точці однакова:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (3.11)$$

або, якщо потік $\Phi = B \cdot S$, тоді

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}. \quad (3.12)$$

Співвідношення (3.11) і (3.12) називають формулами Максвелла, які використовуються для орієнтовних розрахунків електромагнітної сили, через допущення, що поле рівномірне (при порівняно невеликих повітряних зазорах), та магнітні силові лінії перпендикулярні до поверхні якоря (магнітна проникність матеріалу рівна нескінченності, або магнітні опори сталі дорівнюють нулю).

Енергетичний підхід полягає у вивченні перетворення енергії в продовж роботи електромагніту.

Для кола електромагніту справедливо:

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt}. \quad (3.13)$$

Помножимо обидві частин рівняння на $i \cdot dt$, про інтегруємо, після чого отримаємо рівняння енергетичного балансу:

$$\int_0^t U \cdot i \cdot dt = \int_0^t i^2 R \cdot dt = \int_0^{\Psi} i \cdot d\Psi . \quad (3.14)$$

W_e – електрична енергія W_t – теплові витрати W_{EM} – електромагнітна енергія

Якщо $W_{EM} = W_e - W_t$, тобто електрична енергія перетворюється в електромагнітну, разом з тим утворюються втрати у вигляді тепла. Крім того, впродовж переміщення якоря відбувається перетворення електромагнітної енергії в механічну.

В загальному випадку повна електромагнітна енергія, що була накопичена магнітною системою, продовж змінення зазору δ , струму I та потокозчеплення ψ визначатиметься площею «0–1–2–3–0» на рис. 3.5. На першому етапі, коли якір залишається нерухомим ($\delta = \delta_1$), потокозчеплення нарощується до значення ψ_1 вдовж кривої намагнічування δ_1 . Причому енергія, пропорційна «0–1–4–0» перетворюється у магнітну.

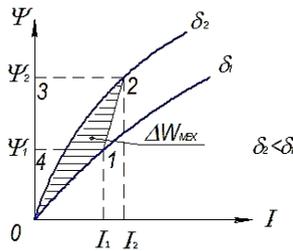


Рисунок 3.5 – До питання визначення ΔW_{mex}

При струмі I_1 якір починає свій рух, а потокозчеплення змінюється по перехідній кривій 1 - 2. При цьому енергія, яка пропорційна площі «1–2–3–4–1», перетвориться в магнітну енергію. Запас магнітної енергії в системі при ($\delta = \delta_2$) характеризується площею «0–2–3–0», а енергія, що окреслюється площею «0–1–2–0» продовж руху якоря вже витратилась, тобто

робота зроблена за рахунок електромагнітної сили задля подолання протидіючих сил, сил тертя, інерції рухомих частин.

Це є механічна енергія ΔW_{mex} . Тоді електромагнітна сила дорівнюватиме:

$$F_{EM} = \frac{\Delta W_{mex}}{\Delta x} = -\frac{\Delta W_{mex}}{\Delta \delta}, \quad (3.15)$$

або при нескінченно малому переміщенні:

$$F_{EM} = \frac{dW_{mex.}}{dx} = -\frac{dW_{mex.}}{d\delta}, \quad (3.16)$$

де Δx та $\Delta \delta$ – переміщення якоря та зазор, а через те, що при русі якоря зменшується зазор, то $\Delta x = -\Delta \delta$.

Отже, якщо криві намагнічуваності задані у графічному виді, то електромагнітну силу для середнього значення зазору між δ_1 та δ_2 можна визначити площею 0–1–2–0, якщо розділити її на переміщення якоря. Якщо припустити, що площа фігури 0–1–2–0 є площею трикутника, то можна ввести термін «лінійної магнітної системи», а відтак – застосувати енергетичний підхід. Для лінійної магнітної системи формула для визначення електромагнітної сили має вигляд

$$F_{EM} = -\frac{1}{2} \cdot \left(I \cdot \frac{d\psi}{d\delta} - \psi \cdot \frac{dI}{d\delta} \right), \quad (3.17)$$

а для електромагнітів з якорем, що обертається, отримаємо електромагнітний момент:

$$M_{EM} = -\frac{1}{2} \cdot \left(I \cdot \frac{d\psi}{d\phi} - \psi \cdot \frac{dI}{d\phi} \right). \quad (3.18)$$

Струм не змінюватиметься в сталому режимі для електромагнітів постійного струму через те, що згідно із законом Ома його значення визначається напругою живлення та опором обмотки ($I=U/R$). Перетворимо формулу сили з урахуванням

індуктивності обмотки, кількості її витків і потокозчеплення ($\Psi = L \cdot I = W \cdot \Phi = W \cdot (I \cdot W) \cdot \Lambda = W^2 \cdot \Lambda \cdot I$), отримаємо:

$$F_{EM} = -\frac{1}{2} \cdot (I \cdot W)_{\delta}^2 \cdot \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta}, \quad (3.19)$$

де W – кількість витків обмотки;

Λ_{δ} – провідність робочих повітряних зазорів;

$(I \cdot W)_{\delta}$ – робоче значення МРС робочих повітряних зазорів, що визначається як $(I \cdot W)_{\delta} = I \cdot W - (I \cdot W)_{СТ+ПЗ}$ ($I \cdot W$ – повна МРС електромагніту, $(I \cdot W)_{СТ+ПЗ}$ – втрати в сталі і паразитних зазорах) [40, 50, 51].

Отримана енергетична формула для розрахунку сили більш універсальна, ніж формула Максвелла, оскільки вона дає можливість визначити сили для насичених магнітних систем з урахуванням неоднорідності магнітного поля в робочих зазорах.

3.3 Характеристики електромагнітів: навантажувальна, протидіюча та тягова

Характеристика навантаження – це залежність електромагнітної сили F_{EM} , або електромагнітного моменту обертання M_{EM} від величини електричного сигналу, який подається на обмотку при певному положенні якоря (для поступального руху якоря – $F_{EM} = f(I, IW, U)$ при $\delta = \text{const}$; та для обертального руху якоря – $M_{EM} = f(I, IW, U)$ при $\varphi = \text{const}$). Тобто вона показує, якою силою можна навантажити електромагніт при визначених положенні якоря та електричного сигналу (рис. 3.6).

Припустимо, що магнітний опір дорівнює нулю, тоді згідно з формулою $F_{EM} = -\frac{1}{2} (IW)_{\delta}^2 \cdot \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta}$ отримаємо квадратичну залежність у вигляді параболи (1 – позначена «—»). Але ж реальні характеристики (2 – позначена «—») будуть відрізнятися від параболи тому, що частина МРС обмотки втрачається через падіння магнітної напруги в сталі та паразитних зазорах, що особливо помітно за умови великих струмів, коли магнітна

система насичується. На якір реле діє сила реакції (протидіюча сила) механічної системи F_{EM} , яка приводить якір до руху.

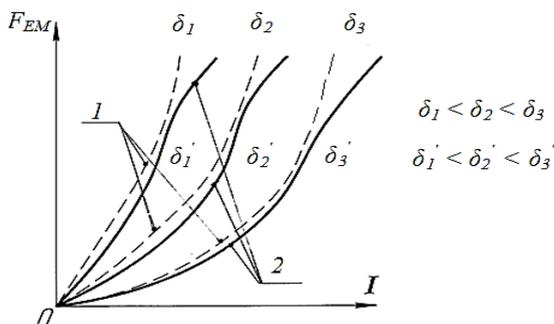


Рисунок 3.6 – Характеристика навантаження [51]

Ця сила направлена протилежно по відношенню до електромагнітної сили, тому її називають протидіючою силою $F_{ПР} = f(\delta)$, або протидіючим моментом залежно від положення якоря $M_{ПР} = f(\varphi)$. Механічна система реле зазвичай складається з декількох складових (вузлів) конструкції, що вступають в дію при переміщенні якоря.

Розглянемо просту систему, контакти якої розімкнені в нормальному положенні (рис. 3.7 а), яка включає повертальну пружину (1) та контактні пружини (2, 3). При подачі напруги на котушку (4) електромагніту якір починає рухатися, а отже, одразу починає діяти реакція від пружини (1) на рис. 3.7, б (ламана крива (1')), одночасно діє реакція від маси рухомих частин 2' (самого якоря, передавальних вузлів і т. ін.), причому ця вага може відніматися, залежно від того, що має в своєму розпорядженні реле при експлуатації (лінія 2''). Потім починає працювати пружина (3) при певному значенні зазору δ_β (залежність 3'). Відстань β , яку проходить рухомий контакт до зіткнення з нерухомим (на протидіючій характеристиці відповідає відстані, що дорівнює $\beta = \delta_{\max} - \delta_\beta$). Тоді сумарна залежність $\Sigma F_{ПР}$ це є повною протидіючою характеристикою.

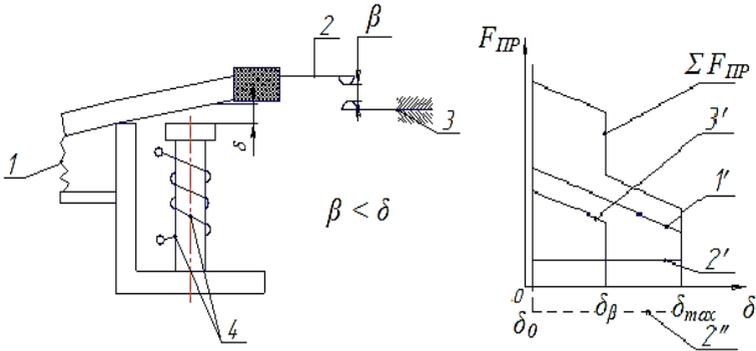


Рисунок 3.7 – Спрощена конструкція електромагнітного реле та його протидіюча характеристика:

a – схема кінематична принципова *б* – протидіюча характеристика

Зазначимо, що:

- 1) характеристики сили пружин не починаються з нуля, оскільки є їх попереднє стискання (розтягування), тому реакцією при цьому буде вертикальна лінія;

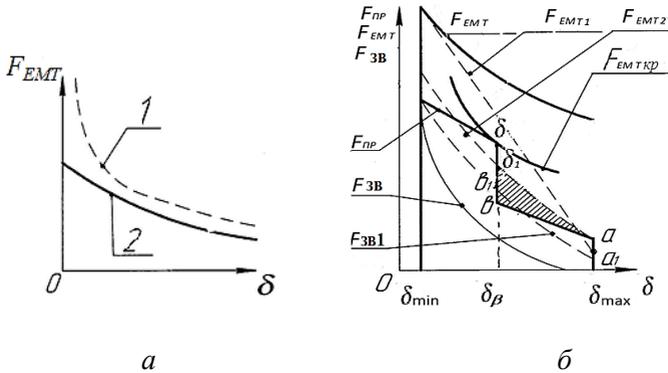


Рисунок 3.8 – Статистична та динамічна тягові характеристики реле (*a*) та узгодження характеристик реле (*б*) [2, 7, 51]

- 2) в залежності від орієнтації реле відносно вертикальної площини реакція від маси рухомих частин може бути позитивною,

або негативною. На цю реакцію для малопотужних реле зазвичай не зважають;

3) реакцією від тертя так само нехтують.

Тягова характеристика – це є залежність електромагнітної сили $F_{EMT} = f(\delta)$ або електромагнітного моменту від положення якоря $M_{EMT} = f(\varphi)$. Розрізняють статичну і динамічну характеристики (рис. 3.8).

Статична характеристика будується при незмінній МРС обмотки, що можливо при нескінченно повільному русі якоря (крива 1, рис. 3.8, а).

Динамічна характеристика будується з урахуванням перехідних процесів, що протікають при спрацьовуванні або поверненні електромагніту (крива 2, рис. 3.8, а).

Для рівномірного поля в зазорі провідність $\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot S}{\delta}$, тоді похідна $\left(\frac{\mu_0 \cdot S}{\delta}\right)' = -\frac{\mu_0 \cdot S}{\delta^2}$, тому відповідно до формули (3.19)

отримаємо $F_{EMT} = \frac{1}{2} \cdot (I \cdot W)_{\delta}^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot S}{\delta^2}$. З графіка видно, що при зменшенні зазору сила різко зростає і при $\delta \approx 0$ набуває нескінченного значення. Це статична характеристика.

Насправді ж, при зменшенні зазору зростає падіння магнітної напруги в сталі, в результаті чого зменшується робоче значення МРС $(I \cdot W)_{\delta}$, отже, за формулою (3.19) реальне значення сили буде менше, ніж без урахування опору сталі, а при $\delta \approx 0$ сила матиме кінцеве значення.

На рис. 3.8, б наводиться принцип узгодження тягової і протидіючої характеристик реле. Узгодження характеристик зводиться до того, щоб тягова характеристика F_{EMT} має лежати обов'язково вище протидіючої $F_{ПР}$, а зворотна $F_{ЗВ}$ – обов'язково нижче протидіючої. Таке розташування можна отримати, якщо:

- а) зменшити жорсткість пружин, тобто «відпустити» $F_{ПР}$;
- б) застосувати полюсний наконечник, тобто змінити характер F_{EMT} ,
- в) змінити рушійну силу (тобто змінити Φ_{δ}) і тощо.

Якщо характеристика буде F_{EMT1} – ввімкнення не станеться, оскільки при відпущеному якорі точка « a_1 » лежить нижче за точку « a ». Якщо F_{EMT2} , то у момент контактування відбудеться затримка зрушення і контакти можуть зваритися, або, якщо рушійна частина реле матиме запас кінетичної енергії (заштрихована площа на графіку), то можуть ввімкнутися, проте станеться миттєвий перегрів місця контактування. У точці δ не слід мати великий запас F_{EMT} , оскільки у момент замикання виникне сильний удар. $F_{ЗВ}$ має проходити нижче $F_{ПР}$. У випадку, коли зворотна сила буде дорівнювати $F_{ЗВ1}$, то в точці b_1 через низьке значення сили натискання (при цьому точка b розташована нижче) контакти можуть зваритися.

3.4 Контрольні питання

- 3.4.1. Які джерела електромагнітного поля?
- 3.4.2. Як визначити електромагнітну силу (фізичний та енергетичний підходи)?
- 3.4.3. Що таке парамагнетика, діамагнетика, феромагнетика, антиферомагнетика та ферити?
- 3.4.4. Що таке намагнічування та магнітні матеріали?
- 3.4.5. Магнітом'які та магнітотверді матеріали.
- 3.4.6. Які основні відмінності між магнітним та електричним колами?
- 3.4.7. Що таке немагнітний зазор, робочий зазор, потік розсіювання, потокозчеплення?
- 3.4.8. Які основні закони магнітних кіл?
- 3.4.9. Як визначити магнітні опори?
- 3.4.10. Як змінюється магнітний потік вздовж осердя магнітного системи з розподіленою МРС?
- 3.4.11. Як розрахувати магнітні провідності?
- 3.4.12. Що розуміють під наведенням магнітної провідності розсіювання по потоку та потокозчеплення?
- 3.4.14. Навіщо потрібні коефіцієнти розсіювання?
- 3.4.15. Чим відрізняються магнітні системи змінного струму від магнітних систем постійного струму?

4 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ РЕЛЕ

Енциклопедії і технічні словники визначають реле (*relay* - зміна; франц. *relais*, від *relayer* — змінювати, замінювати) як пристрій для автоматичної комутації електричних кіл відповідно до зовнішнього сигналу. Будь-який релейний пристрій має у своєму складі релейний елемент (з двома станами стійкої рівноваги) та групу електричних контактів, що замикаються (або розмикаються) при зміні стану релейного елемента [4, 5, 7, 17, 19, 24, 25, 30, 35, 46].

Реле широко застосовуються в пристроях автоматичного керування, контролю, сигналізації, захисту та комутації. В залежності від фізичної природи сигналу, що керує, реле розрізняються на електричні, теплові, механічні, оптичні магнітні, акустичні тощо. Електричні реле реагують на такі електричні параметри як струм, напруга, потужність, електричний струм, тощо, або ж на температуру, кількість теплоти тощо. Реле, в яких використовується теплова дія струму, мають відношення до електричних, і відповідно назву електротеплові. Механічні реле реагують на силу, тиск, швидкість, переміщення, тощо. Часто реле, які мають реагувати на неелектричні величини, виконують за допомогою датчиків, з'єднаних з релейними електричними елементами [4].

Завдяки технічному прогресу з'явилися напівпровідникові та мікропроцесорні комутатори.

В залежності від області використання розрізняють реле: промислової автоматики, захисту електроенергетичних систем, радіоелектроніки, летальних апаратів, морських і річкових суден, систем регулювання руху залізничного транспорту та безпеки на залізничних дорогах, гірничо-рудної та нафтовидобувної промисловості, тощо [4, 5, 7, 19, 29]. Загалом релейний елемент є електротехнічним пристроєм, який здійснює стрибкоподібну зміну вихідного (керованого) значення енергії Y при певному значенні вхідного (що керує) сигналу енергії X . Треба зауважити, що стрибкоподібна зміна значення Y відбувається в залежності від значення вхідного сигналу енергії X , а не в залежності від часу. Така залежність $Y=f(X)$ має форму петлі (кусочно-лінійна

функція) і називається релейною характеристикою. Тут мається на увазі стрибкоподібна зміна Y в часі, залежно від величини X .

Реле – це апарати, призначені здійснювати стрибкоподібні зміни сигналів у вихідних колах при заданих значеннях електричних сигналів керування. Різноманітність видів реле дуже велика і кожен призначений для виконання певного завдання Реле мають складну класифікацію та діляться на кілька груп.

За сферою застосування:

- керування електричними та електронними системами;
- захист електричних систем;
- автоматизація систем та сигналізація.

За принципом дії:

- теплові;
- електромагнітні (нейтральні, поляризовані);
- індукційні (з обертальним полем, з таким, що біжить);
- магнітоелектричні;
- електронні, напівпровідникові та цифрові (твердотільні).

За параметром, що надходить і викликає спрацьовування комутаційних пристроїв (КП):

- від струму;
- від напруги;
- від потужності;
- від частоти.

За принципом на керуючу частину пристрою:

– контактні, що впливають на силове коло групою електричних контактів, через те, що їх стан (замкнений або розімкнений) може забезпечити комутацію (розімкнення або замкнення) вихідного силового кола;

– безконтактні впливають на силове коло через різку зміну його параметрів (ємності, індуктивності, опору), або сили струму і напруги.

За потужністю сигналу керування:

- великої потужності – більше 10 Вт;
- середньої потужності – 1...9 Вт;
- малої потужності – менше 1 Вт.

Виробники налаштовують сучасні комутаційні пристрої таким чином, щоб спрацьовування відбувалося лише за певних

умов, наприклад, зі збільшенням сили струму, що надходить на вхідні клеми КП.

Електромагнітні реле – це електромеханічний комутаційний пристрій, принцип дії якого заснований на впливі магнітного поля, створеного струмом у статичній обмотці, на якір. Цей вид КП поділяється власне на електромагнітні (нейтральні) пристрої, які реагують лише на значення струму, що подається на обмотку, та поляризовані, робота яких залежить як від струмової величини, так і від полярності. Електромагнітні реле, що використовуються в промисловому обладнанні, знаходяться на проміжній позиції між сильноточними пристроями (магнітними пускачами, контакторами і т.ін.) і слабкоточним обладнанням. Найчастіше цей вид реле застосовується у колах керування.

Стисла класифікація електромагнітних реле за функціональними ознаками показана на рис. 4.1.

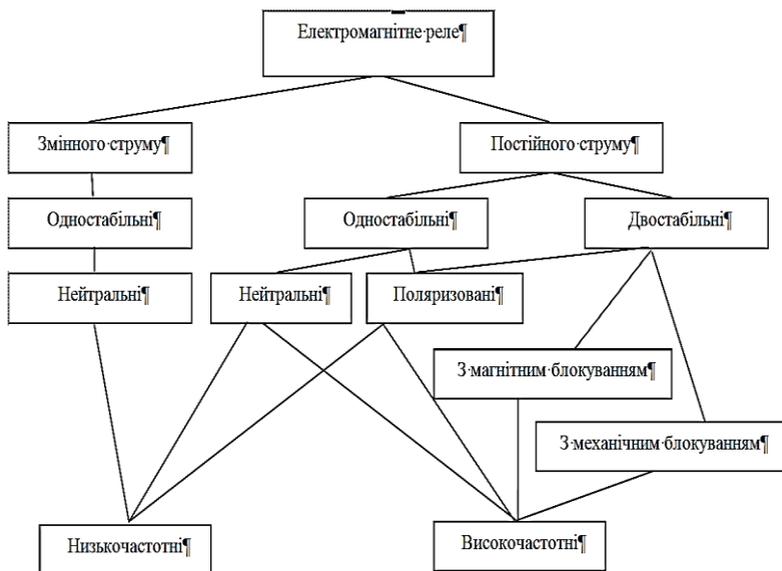


Рисунок 4.1 – Класифікація електромагнітних реле [51]

Одностабільні реле — такі, що змінюють свій стан під впливом вхідного сигналу, але повертаються в початковий стан (положення), коли знімається цей сигнал.

Двостабільні реле — такі, що змінюють свій стан під впливом вхідного сигналу, але повертаються в початковий стан (положення) лише при появі іншого сигналу.

Нейтральні реле — такі, що використовують імпульси будь-якої полярності, а поляризовані — лише визначеної полярності.

Електромагнітні реле за родом струму розрізняються на реле постійного та змінного струму.

За частотою реле, що комутують струм, розділяються на низькочастотні та високочастотні. Низькочастотні реле — такі, що мають живлення (коло керування) постійним, або змінним струмом з номінальною частотою 50 або 400 Гц, і призначені для комутації (замикання, розмикання, перемикання) електричних кіл з частотою до 100 кГц. Високочастотні призначені для комутації сигналів з частотою понад 1000 кГц.

За чутливістю вхідного сигналу та величиною струму комутації реле розділяються на надчутливі ($10^{-7} \dots 10^{-10}$) А при напрузі 10^{-5} В, високо- та нормальночутливі, а також слабострумові ($10^{-6} \dots 10$) А.

Більш потужні реле, що комутують струми понад 50 А і напругою понад 1000 В, називаються, відповідно, контакторами і високовольтними реле. За часом спрацьовування (t_{cnp}) розрізняють такі реле:

- безінерційні, коли $t_{cnp} \leq 0,001$ с;
- швидкодіючі, коли $t_{cnp} = 0,001 \dots 0,05$ с;
- уповільненої дії, коли $t_{cnp} = 0,05 \dots 1,0$ с;
- реле часу, коли $t_{cnp} > 1,0$ с.

За масою (об'ємом) розрізняють такі реле:

- мікромініатюрні — масою до 6 г та об'ємом до 2 см^3 ;
- мініатюрні — масою до 16 г та об'ємом $2 \dots 6 \text{ см}^3$;
- малогабаритні — масою 16...40 г та об'ємом до $6\text{--}15 \text{ см}^3$;
- нормальні — масою більш 40 г та об'ємом більше 15 см^3 .

На рис. 4.2 наведено найпростішу конструкцію електромагнітного реле з контактом, що замикає, та консольно закріпленими контактними пружинами. Тут зазор між контактами

позначений як β , зазор між полюсом та якорем, як δ . Причому $\delta > \beta$ [91, 94].

Реле постійного струму зазвичай мають штифт відлипання (або немагнітну прокладку), який служить для запобігання «залипання» якоря реле через залишкову намагніченість внаслідок тривалої роботи у включеному стані. Інколи замість немагнітної прокладки в якорі видавлюється опуклість. Для зменшення площі зіткнення з осердям (це не впливає на якість роботи реле постійного струму, оскільки значення струму при цьому не залежить від зазору між якорем і осердям) у сучасних реле застосовується еластична полімерна немагнітна прокладка.

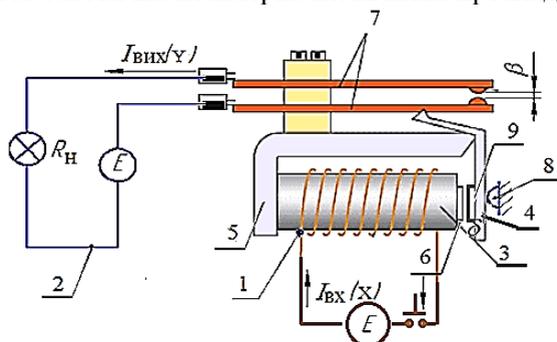


Рисунок 4.2 – Спрощена конструкція електромагнітного реле:

1 – обмотка кола керування; 2 – коло комутації (навантаження);
3, 4, 5 – магнітне коло (3 – осердя, 4 – якір, 5 – ярмо); 6 – полюсний наконечник; 7 – контакт-деталі; 8 – упор; 9 – штифт відлипання.

Релейні елементи характеризуються параметрами, що відносяться до входних та вихідних впливів:

– *спрацьовування* – це мінімальне значення впливу (електричного сигналу) на вході, при такому його зростанні, коли релейний елемент змінює свій стан і одночасно впливає на виході відповідно до релейної характеристики;

– *відпускання* – це мінімальне значення впливу (електричного сигналу) на вході, при такому його зменшенні, коли релейний елемент повертається до свого початкового стану.

У зв'язку з неідеальністю релейної характеристики ці величини зазвичай не збігаються одна з одною (петля гістерезису).

У ряді випадків релейний елемент може мати властивості фіксації, тобто залишатися в зайнятому їм стані і після зняття впливу на вході. У цьому випадку релейний елемент повертається в початковий стан зазвичай після подачі на інший його вхід (або подачі протилежного знаку сигналу на той же вхід) (рис. 4.3).

Максимальне значення такого впливу при його зростанні, що викликає повернення релейного елемента у початковий стан, називається параметром повернення. Співвідношення параметра відпускання та параметра спрацьовування називається *зворотнім коефіцієнтом (відпускання)*:

$$K_{зв} = \frac{X_{зв}}{X_{спр}} < 1.$$

Чим ближче до одиниці значення коефіцієнта повернення, тим у більш вузьких межах реле здійснюватиме контроль вхідного параметра.

Робоче значення величини впливу X_p – це максимальне значення, під впливом якого сприймаючий елемент може перебувати довго, не перегріваючись (не руйнуючись).

Коефіцієнт запасу зі спрацьовування $K_з$ – це співвідношення робочого значення впливу та величини спрацьовування:

$$K_з = \frac{X_p}{X_{спр}} > 1.$$

Характеристикою релейного елемента служить так само *швидкодія*, що визначається часом спрацьовування і часом відпускання або повернення. У ряді випадків важливими характеристиками релейного елемента є: споживання енергії, вага, об'єм, що займається тощо.

Потужність спрацьовування $P_{спр}$ – це потужність, що споживається реле при його спрацьовуванні.

Потужність керування $P_{кер}$ – це електрична потужність вихідного кола, яку виконавчий елемент може пропускати тривалий час, що відповідає Y_{max} . У контактних реле – це

потужність, яку контакти зможуть комутувати при номінальній напрузі.

Коефіцієнт підсилення – це співвідношення потужності керування до потужності спрацьовування

$$K_{\text{підс}} = \frac{P_{\text{кер}}}{P_{\text{спр}}} .$$

На рис. 4.3 представлені типові характеристики керування апаратів релейного принципу дії [51].

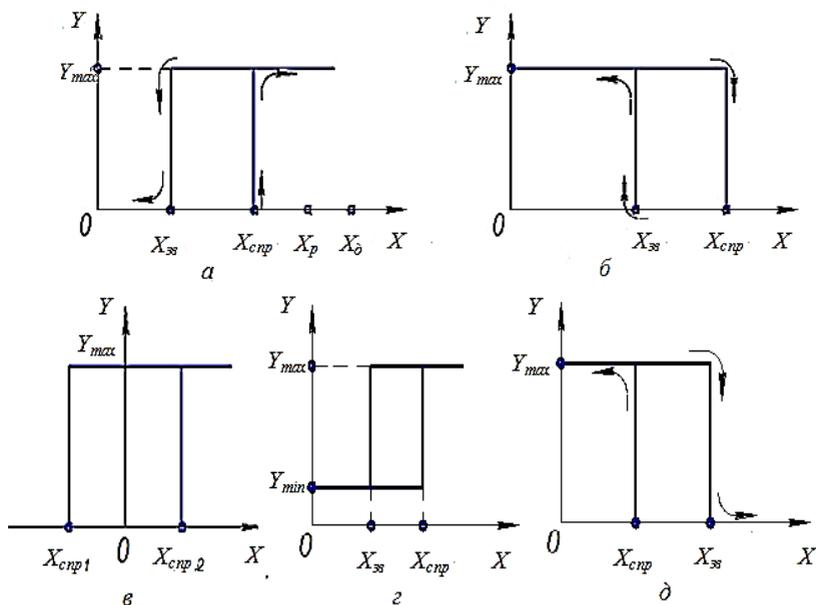


Рисунок 4.3 – Типові характеристики керування апаратів релейного принципу дії:

- a, б, в, д* – електромеханічних; *г* – статичних електричних;
- a, б, г, д* – одностабільних; *в* – двостабільних; *a, б, г* – максимальних;
- д* – мінімальних; *a, г, д* – тих, що працюють на замикання;
- б* – тих, що працюють на розмикання.

На цих рисунках прийняті такі позначення: $X_{\text{спр}}$ – параметр спрацьовування; $X_{\text{зв}}$ – параметр повернення (зворотній); X_p – робочий сигнал (параметр); $Y_{\text{max}}, Y_{\text{min}}$ – максимальне і мінімальне значення вихідного сигналу (параметра); X_d – допустиме значення сигналу. У реле змінного струму штифт відлипання і полюсний наконечник відсутні, а у магнітній системі передбачено екранування частини магнітного полюса для розділення загального магнітного потоку.

4.1 Електромагнітні реле постійного струму

Залежно від розташування якоря і характеру впливу на нього магнітного потоку застосовуються такі основні магнітні системи (рис. 4.4). Характерною особливістю схем «б» та «в» є те, що якір (1) притягується і знаходиться як в полі робочого зазору, так і в полі розсіювання, що впливає на збільшення електромагнітної сили. Це поле утворюється котушкою (2), яка посаджена на осердя, з'єднаного з ярмом (3). Причому додаткова сила при великих значеннях робочого зазору порівнянна з основною силою [2, 46, 55]. При магнітній системі «г» якір рухається «впоперек» магнітних силових ліній в робочому зазорі. Завдяки цьому можна отримати характеристики спеціального вигляду. На рисунку також показані нерухомі (5) та рухомі (4) контакти, які обмежуються стопорами (6).

Вплив полюсного наконечника на тягову характеристику реле постійного струму можна розглянути за допомогою рис. 4.5.

Припустимо, що клапанні електромагніти відрізняються один від одного лише тим, що один має полюсний наконечник діаметром d_n , а інший не має (рис. 4.5) [2, 4, 46, 53, 55].

Якщо прийняти, що опір сталі $R_{\text{ст}} = 0$, тоді при великому зазорі при енергетичному підході для електромагніту на рис.4.5, a маємо

$$F_{EM} = \frac{1}{2} \cdot (I \cdot W)_8^2 \cdot \frac{\mu_0 \pi \cdot d^2}{4\delta^2}, \quad (4.1)$$

а для електромагніту на рис. 4.5, b відповідно є

$$F'_{EM} = \frac{1}{2} \cdot (I \cdot W)_8^2 \cdot \frac{\mu_0 \pi d_H^2}{48^2}. \quad (4.2)$$

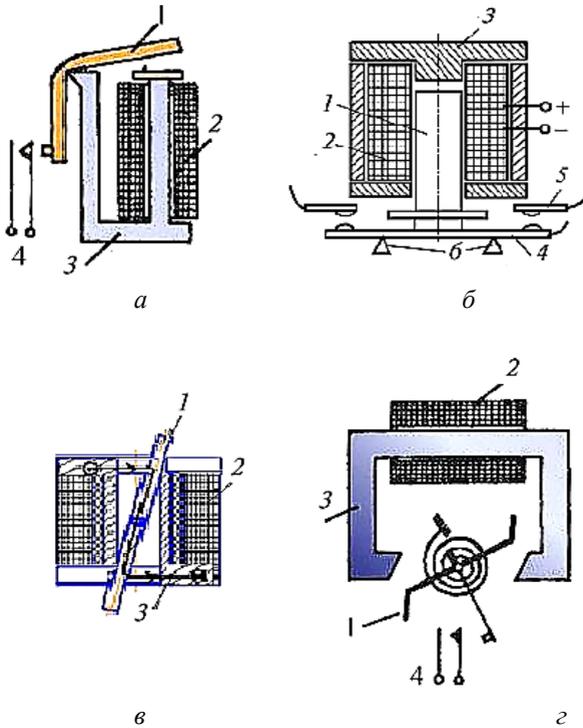


Рисунок 4.4 – Конструкції електромагнітних систем реле:

a – із зовнішнім неврівноваженим якорем клапанного типу; *б* – з якорем соленоїдного типу; *в* – з внутрішньо котушковим урівноваженим якорем; *г* – із зовнішнім урівноваженим якорем поворотного типу, що притягується [51].

Розділимо рівняння (4.2) на рівняння (4.1), отримаємо:

$$\frac{F'_{EM}}{F_{EM}} = \frac{d_H^2}{d^2}. \quad (4.3)$$

З рівняння (4.3) виходить, що $F'_{EM} > F_{EM}$, або наявність полюсного наконечника за інших рівних умов, призводить до збільшення електромагнітної сили в області великих зазорів. При наближенні якоря до осердя та при притягнутому положенні якоря, коли можна припустити, що $B \perp S$, $\vec{B} = \parallel \vec{n}$ із формули (4.3) отримаємо для варіанту конструкції електромагніту без полюсного наконечника (а):

$$F_{EM} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 \frac{\pi d^2}{4}}, \quad (4.4)$$

а для варіанту конструкції з полюсним наконечником (б):

$$F'_{EM} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 \frac{\pi d_H^2}{4}}. \quad (4.5)$$

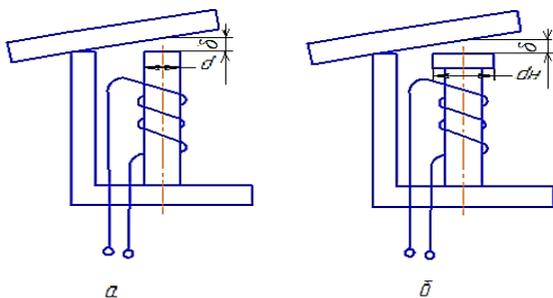


Рисунок 4.5 – До питання призначення полюсного наконечника [51]:

а – схема реле без полюсного наконечника, б – з полюсним наконечником.

Розділимо рівняння (4.2) на (4.3) і отримаємо:

$$\frac{F'_{EM}}{F_{EM}} = \frac{\frac{\Phi^2}{2\mu_0} \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\Phi^2}{2\mu_0} \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{\Phi^2 \cdot 2\mu_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{\Phi^2 \cdot 2\mu_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{d^2}{d_H^2}. \quad (4.6)$$

Звідси витікає, що $F'_{EM} > F_{EM}$, або те, що наявність полюсного наконечника призводить до зменшення електромагнітної сили в області малих зазорів. Можна зробити висновок, що тягова характеристика електромагніту з полюсним наконечником лежить вище за характеристику звичайного електромагніту при великих зазорах і нижче - при малих, як це показано на рис. 4.6. Тобто полюсний наконечник позитивно впливає на те, щоб «зірвати» якір з місця на початку його зрушення, а наприкінці руху, коли тягове зусилля стає менше, відбудеться менший удар на полюс. В конструктивному плані це призведе до зменшення додаткового kleпання на комутуючих контактах тому, що не відбудеться розбивання магнітопроводу.

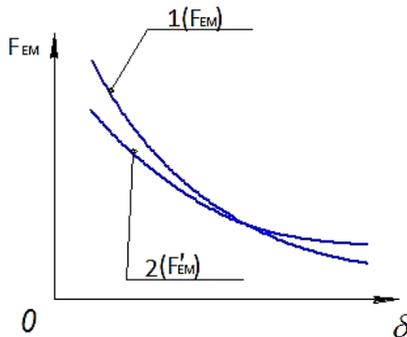


Рисунок 4.6 – Статичні тягові характеристики клапанних електромагнітів постійного струму:

1 – без полюсного наконечника; 2 – з полюсним наконечником.

Треба зауважити, що збільшення діаметру полюсного наконечника доцільно лише до певного значення, оскільки в подальшому із збільшенням діаметру збільшуватимуться втрати від потоків випучування (Φ_{σ}).

Прикладом реле постійного струму є конструкція однокотушкового неполяризованого реле з двома перемикальними контактними групами показана на рис. 4.7. Два полюсні наконечники (7) *L* – образної форми, плоске осердя (5) і ярмір (4) з півсями-цапфами, розташованими уздовж короткої осі симетрії ярміра. Всі деталі магнітної системи виготовлені з електротехнічної сталі. При збиранні ярмір і полюсні наконечники щільно притискаються один до одного площинами, потім полюсні наконечники своїми торцями з'єднуються за допомогою зварювання зі стійкою (10) і планкою (8), виготовленими з нейзильберу. При цьому цапфи ярміра входять в отвори стійки і планки, а у початковому положенні ярмір фіксується поворотною пружиною (9). На осердя (5) розташована котушка (6), а виступаючі кінці осердя приварюються до вільних кінців полюсних наконечників.

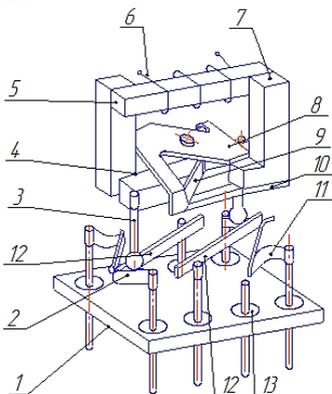


Рисунок 4.7 – Конструкція однокотушкового неполяризованого реле [51]

Контактна система має нерухомий розмикальний та замикальний контакти (11), вкритий тонким шаром золота, рухливу контактну пружину (12), виготовлену з контактної

пружинного сплаву. Деталі контактних груп приєднуються до виводів (1) лазерною зваркою. Перемикання контактів при спрацьовуванні реле і повороті якоря відбувається за рахунок скляних кульок на штовхачах (3). Далі виконується регулювання реле, закриття герметичним кожухом, відкачування повітря і заповнення осушеним газом через отвір, який в корпусі запаюється.

4.2 Електромагнітні реле змінного струму

У реле змінного струму проявляється індуктивний опір $X_L = \omega L$ на відміну від реле постійного струму, де струм обмежується лише активним опором R . Причому $X_L \gg R$, тому при аналізі процесів в електромагнітних системах реле змінного струму на опір обмотки можна не зважати. Зміна струму та напруги в часі, навіть в стаціонарному режимі, приводить до характерних особливостей в порівнянні з електромагнітами постійного струму.

4.2.1 Пульсація електромагнітної сили

Як відомо параметри, що характеризують стан кіл змінного струму, змінюються за синусоїдальним законом:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t; \quad u = U_m \cdot \sin \omega t;$$

$$i = I_m \cdot \sin \omega t; \quad \phi = \Phi_m \cdot c \sin \omega t,$$

де E_m, U_m, I_m, Φ_m – відповідно амплітудні значення напруженості поля, напруги, сили струму та магнітного потоку.

Якщо знехтувати нелінійністю магнітного кола, то при синусоїдальній напрузі джерела живлення магнітний потік в робочому зазорі так само змінюється за тим же законом. Згідно з формулою Максвелла (3.12), отримаємо:

$$F_{EM} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 S} \cdot \sin^2 \omega t = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} - \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} \cdot \cos 2\omega t. \quad (4.7)$$

Тобто миттєве значення сили представляється у вигляді двох складових: постійної $\Phi_m^2/2\mu_0S$ та змінної $(\Phi_m^2/2\mu_0S) \cdot \cos 2\omega t$ (рис. 4.8). Причому остання змінюється з подвійною частотою по відношенню до частоти джерела живлення, яка завжди позитивна $F_{EMCP} = \Phi^2/4\mu_0S$. При змінному струмі говорять про силу, яка розвивається електромагнітом, зважаючи на її середнє значення:

$$F_{EM} = F_{EMCP} + F_{EMCP} \cos 2\omega t. \quad (4.8)$$

За інших рівних умов електромагніт змінного струму розвиватиме зусилля приблизно в два рази менше, ніж електромагніт постійного струму. Дія на якір пульсуючої сили в процесі спрацьовування мало впливає на характер переміщення через порівняно велику інерційність рухомої системи (рис. 4.9).

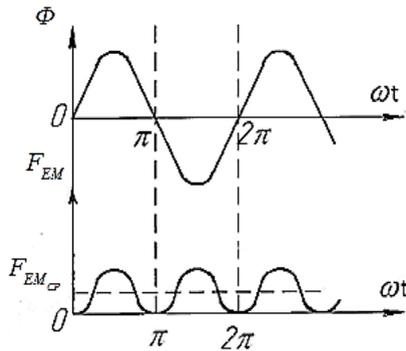


Рисунок 4.8 – Магнітний потік та електромагнітна сила реле змінного струму [51]

В положенні (в проміжок часу), коли $F_{EM} > F_{ПР}$ – якір притягується, а при $F_{EM} < F_{ПР}$ відходить від упору. Це відбувається циклічно з подвійною частотою, і якір вібує.

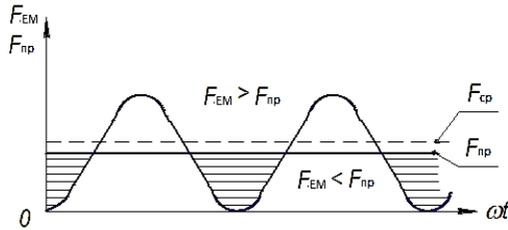


Рисунок 4.9 – Характеристики реле змінного струму [51]

4.2.2 Вібрація якоря

Це явище – вкрай небажане і призводить до вібрації контактів, нагріву котушок, розкитування магнітної системи і неприємного шуму. Тому для боротьби з вібрацією використовується механічне демпфування, випрямлення змінного струму, або магнітна система виконується з двох окремих магнітопроводів, коли котушка одного з них підключається до мережі живлення, а іншого – через ємність, тобто потік у другому магнітопроводі буде зміщеним по фазі по відношенню до першого, але найбільш розповсюдженим є спосіб, заснований на екрануванні однієї з частин полюса короткозамкненим витком (рис. 4.10) [35].

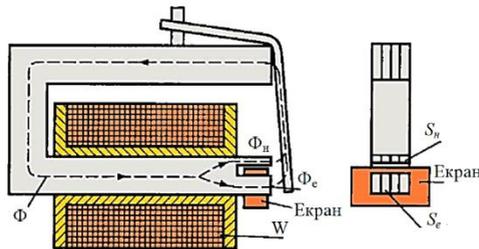


Рисунок 4.10 – Реле змінного струму з короткозамкненим витком

В якості екрана конструктивно може бути або закорочена обмотка, або короткозамкнений виток, який є найбільш поширеним. В магнітному колі він виконує функцію реактивного магнітного опору X_μ , завдяки чому основний потік Φ розділяється на два потоки $\Phi_с$ і $\Phi_н$, зміщені один відносно другого на кут φ

(рис.4.11, а). За рахунок зміни електрорухомої сили (ЕРС) e_e , буде також зміщений виникаючий струм i_e на певний кут, але оскільки індуктивність мала, то кут буде близький до нуля. Взаємодія цього потоку з потоками, які були б при його відсутності в екранованій і неекранованій частинах полюса, утворює зміщення потоків Φ_H і Φ_e , на кут [79]:

$$\varphi = \frac{\arctg X \cdot \mu_{\delta E}}{R_{\delta E}} \quad (4.9)$$

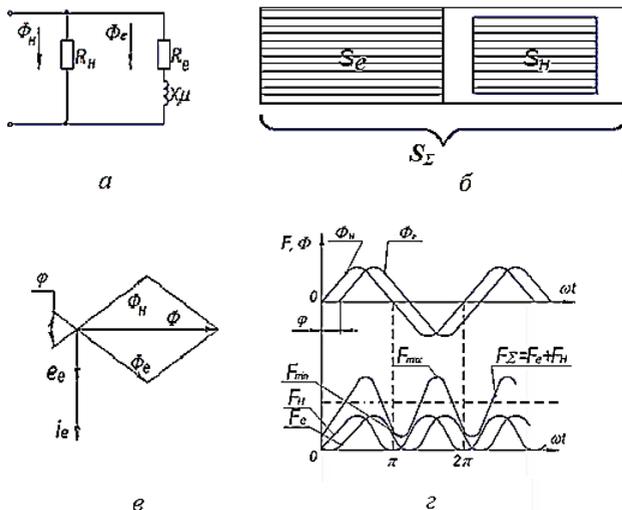


Рисунок 4.11 – Частина магнітної системи з короткозамкненим витком [51]:

а – схема принципова екранування полюса для визначення розподілу магнітного потоку; б – схема електрична заміщення магнітного кола; в – векторна діаграма; г – результуюча електромагнітна сила – F_Σ .

В результаті сила F_Σ , що переміщує якір, складається з двох: F_H (неекранованої частини) і F_e (екранованої частини), та в будь-який момент часу відрізняється від нуля (рис. 4.11, г). Амплітуда змінної складової:

$$F_{\Sigma} = \sqrt{F_{cp,e}^2 + F_{cp,n}^2 + 2F_{cp,e} \cdot F_{cp,n} \cdot \cos 2\varphi}. \quad (4.10)$$

Вважається, що оптимальне співвідношення неекранованої частини полюса S_n та екранованої – S_e , при якому пульсація мінімальна знаходиться в межах $S_e / S_n = 0,68...0,80$ (рис. 4.11, б) [2, 35, 40, 51].

4.3 Поляризовані електромагнітні реле

Поляризовані реле відносяться до реле постійного струму, зміна стану якого залежить від полярності його вхідної діючої величини [4, 9, 15, 30, 46].

На відміну від нейтральних, вони характеризуються наявністю двох незалежних магнітних потоків – поляризуючого – Φ_n , що утворюється зазвичай постійним магнітом, і робочого – Φ_p . Завдяки чому дія реле залежить не лише від значення струму в робочій обмотці, але і від його напрямку. При відімкненій робочій обмотці на якір електромагніту діє сила, що утворюється постійним магнітом (найбільш розповсюджений варіант конструкцій), або спеціальною обмоткою від автономного джерела живлення.

Поляризовані реле підрозділяються на високочутливі, такі, що мають, як правило, один перемикальний контактний вузол, і нормальні, такі, що мають до 12-ти перемикальних вузлів. МРС і P_{cnp} ($P_{cnp} = 10...150$ мкВт) високочутливих реле менше, а швидкодія – вище, ніж у найбільш чутливих нейтральних реле ($P_{cnp} = 20...100$ мВт). Багатоконтактні поляризовані реле, які частіше називаються дистанційними перемикачами, у порівнянні з нейтральними електромагнітними реле мають приблизно однакові МРС. Деякі поляризовані реле мають дві та більше обмоток, завдяки чому можлива гнучка розробка електричних схем, керування струмами різної полярності, крім того використання цих апаратів можливе не тільки в якості комутаційних, але і логічних елементів.

Існують три основні типи магнітного кола реле (рис. 4.12): послідовна, диференційна (паралельна) і мостова. В реле з

послідовним магнітним колом (рис. 4.12, *a*) є лише один шлях замикання поляризуючого $\Phi_{\text{п}}$ та робочого $\Phi_{\text{р}}$ потоків, оскільки джерела МРС включені послідовно, тому опір на шляху $\Phi_{\text{р}}$ більше. Такі схеми застосовуються рідко. В реле з диференційною магнітною системою (рис. 4.12, *б*, *в*) джерела МРС включені паралельно один одному, і $\Phi_{\text{р}}$ майже не проходить через постійний магніт, le - плече електромагнітного моменту $M_{\text{ем}}$, що розвивається. У диференційних схемах на вісь якоря або пласку пружинну підвіску діють значні зусилля через дію електромагнітних сил на якір. Реле з мостовим колом (рис. 4.12, *г*) не мають цього недоліку [7, 9, 65, 80, 91].

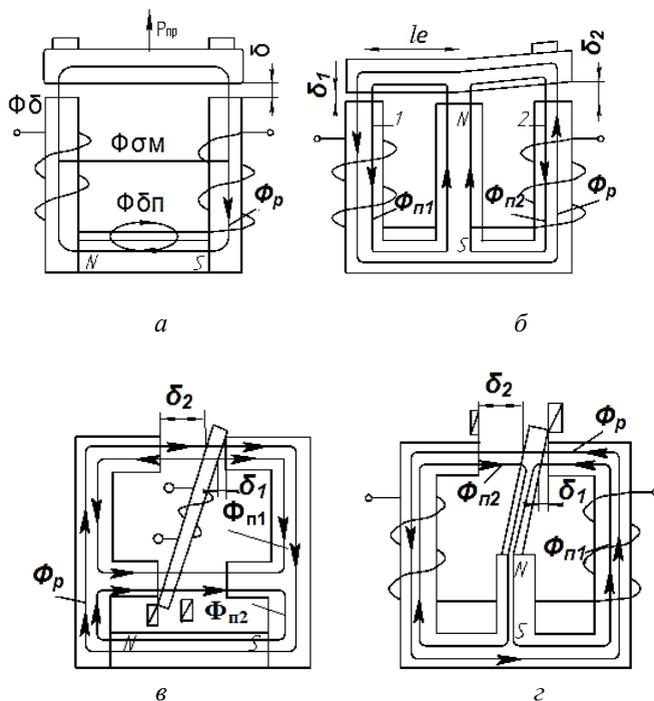


Рисунок 4.12 – Типи магнітних систем поляризованих реле:

a – послідовна; *б*, *в* – диференційна (паралельна); *г* – мостова.

Джерела МРС включені в діагоналі моста, тому Φ_n і Φ_p зустрічаються в основному в робочих зазорах. Вони мають переваги над реле на диференційних схемах такі, як можливість зменшення масо-габаритних розмірів, більш високу стійкість до зовнішніх механічних впливів, а також більш висока стабільність параметрів при зміні температури навколишнього середовища.

Поляризовані реле бувають одностабільними та двостабільними, а також відрізняються по типу регулювання. Двостабільні в свою чергу бувають з двохпозиційним та трьохпозиційним регулюванням.

При роботі реле якір може займати декілька положень, і в двопозиційному регулюванні з переважанням якір знаходиться завжди в одному положенні, якщо струм в робочій обмотці відсутній. Переважання можна забезпечити або налагодженням, або механічно, наприклад, пружиною. В двопозиційному реле без переважання, за відсутності струму в робочій обмотці, контакти (якір) знаходяться біля одного з двох контактів (полісів), і це залежить від попереднього напрямку струму в обмотці.

Спрацьовування відбувається після зміни напрямку струму відносно переднього стану. Якір трипозиційного реле (за відсутності струму в робочій обмотці) знаходиться в середньому положенні. При подачі сигналу на спрацьовування якір переміщується або вліво, або вправо залежно від напрямку струму [2, 35, 52]. Це досягається закріпленням якоря на достатньо жорсткій підвісній зворотній пружині (рис. 4.13, а).

Реле, контактна система якого зображена на рис. 4.13, а є двопозиційним. Якщо його нерухомі контакти 1 та 2 симетрично розташовані щодо нейтральної лінії (якір відрегульований симетрично), то при знятті керуючого сигналу якір реле залишається в тому ж положенні, яке він займав за наявності керуючого сигналу. Повторна подача сигналу попередньої полярності не викликає зміни положення якоря. Якщо змінити полярність сигналу, що керує, то якір перекинеться в інше положення, і залишиться в ньому після зняття сигналу. Таке налаштування називається нейтральним, або двопозиційним.

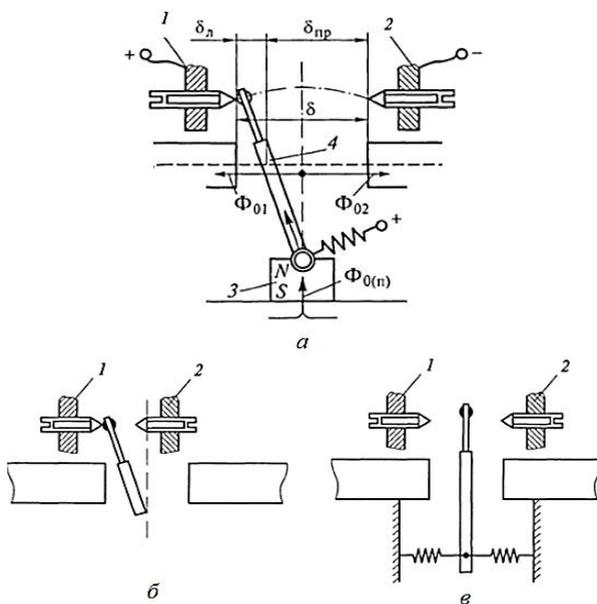


Рисунок 4.13 – Схеми настроювання контактів поляризованого реле:

a – двопозиційне; *б* – двопозиційне з переважанням одного з контактів; *в* – трьохпозиційне.

Якщо один із контактних гвинтів висунутий за нейтральну лінію (рис. 4.13, *б*), то реле є двопозиційним з переважанням одного з контактів. У наведеному на рисунку випадку при вимкненому реле якор завжди притиснутий до лівого контакту, тобто контакту 1 і перекидається вправо лише на час протікання струму відповідної полярності в обмотці, що керує. Трипозиційне реле має симетрично розташовані від нейтральної лінії нерухомі контакти (рис. 4.13, *в*) 1 і 2 (відповідно лівий та правий). Якор, який за відсутності керуючого сигналу утримується в середньому положенні за допомогою спеціальних пружин, розташованих з двох сторін, або закріплюється на плоскій пружині, пружність якої створює стійке положення рівноваги в середньому положенні. При подачі сигналу в обмотку, що керує, контакт на якорі замикається

в залежності від полярності сигналу з лівим або правим нерухомим контактом і повертається в нейтральне положення після зняття сигналу.

Розглянемо електромеханічні характеристики поляризованого реле з паралельним магнітним колом (рис. 4.14).

На ярі з паралельним магнітним колом діють дві протилежно спрямовані сили. Одна сила F_1 , наприклад, спрямована у бік правого полюса, а сила F_2 – у бік лівого полюса, тоді результуюча сила F_{EM} буде дорівнювати:

$$F_{EM} = F_1 - F_2.$$

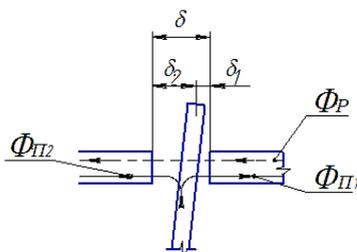


Рисунок 4.14 – Настроювання ярка поляризованого реле [51]:

δ – робочий зазор; δ_1 та δ_2 – відповідно правий та лівий зазори полюсів реле.

Причому, в лівому зазорі δ_2 робочий Φ_P і поляризуючі Φ_{PI1} , Φ_{PI2} потоки складаються, а в правому δ_1 віднімаються

$$\Phi_1 = \Phi_{PI1} - \Phi_P, \quad \Phi_2 = \Phi_{PI2} + \Phi_P.$$

Якщо припустити, що опір сталі $R_{ст}$, розсіювання і випинання магнітного потоку відсутні, а також, що постійний магніт є джерелом потоку, маємо, що сумарний потік буде незмінний, тобто:

$$\Phi_{\Pi} = \Phi_{PI1} + \Phi_{PI2} = \text{const}.$$

Тоді з урахуванням магнітного опору робочого зазору, який дорівнює $R_{\delta} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\mu_0 S_{\delta}} = \frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}}$, МРС робочого та поляризуючого джерела можна отримати такі співвідношення

$$\Phi_P = \frac{I \cdot W_P}{R_{\delta}}, \quad \Phi_{\Pi 1} = \Phi_{\Pi} \cdot \frac{\delta_2}{\delta}, \quad \Phi_{\Pi 2} = \Phi_{\Pi} \cdot \frac{\delta_1}{\delta} \quad (4.11)$$

де W_P – кількість витків обмотки;

I – струм обмотки.

μ_0 – магнітна постійна;

S_{δ} – площа робочого зазору.

Відповідно до формули Максвелла (3.12) результуюча сила буде дорівнювати

$$F_{EM} = \frac{(\Phi_{\Pi 1} - \Phi_P)^2}{2\mu_0 S_{\delta}} - \frac{(\Phi_{\Pi 2} + \Phi_P)^2}{2\mu_0 S_{\delta}}. \quad (4.12)$$

Підставимо в рівняння (4.12) складові з формул (4.11) і отримаємо:

$$F_{EM} = \frac{\Phi_{\Pi}^2 (\delta_2 - \delta_1)}{2\mu_0 S_{\delta}} - \frac{\Phi_{\Pi} \cdot (I \cdot W_P)}{\delta}. \quad (4.13)$$

Позначимо $\frac{\delta_2 - \delta_1}{2} = X$ переміщення якоря від нейтрального положення, отримаємо:

$$F_{EM} = \frac{\Phi_{\Pi}^2 \cdot X}{\mu_0 \cdot S_{\delta}} - \frac{\Phi_{\Pi 2} \cdot (I \cdot W_P)}{\delta}. \quad (4.14)$$

Побудуємо характеристики реле навантаження $F=f(I \cdot W_P)$ та тягову $F_{EM}=f(X)$ без врахування опору сталі, потоку розсіяння і витріщання (рис. 4.15).

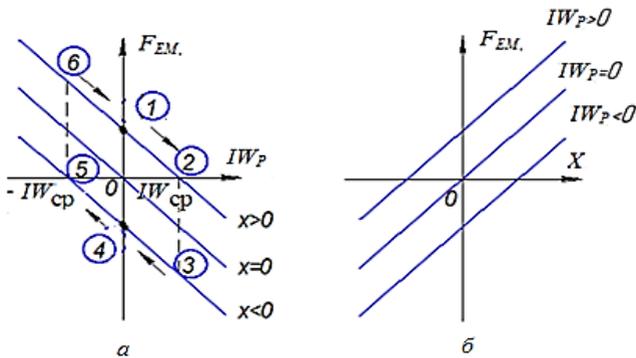


Рисунок 4.15 – Характеристики поляризованого реле [51]:

a – характеристика навантаження $F = f(IW_P)$;
b – характеристика тягова $F_{EM} = f(X)$.

У реальних умовах, коли враховується опір сталі, потоки розсіяння і випинання, електромеханічні характеристики приймуть нелінійний характер (рис. 4.16). Завдяки високій чутливості, малому вживанню електроенергії та високій кратності термічної стійкості поляризовані реле широко розповсюджені для реалізації функцій реле струму, напруги та потужності з вмиканням через випрямлячі.

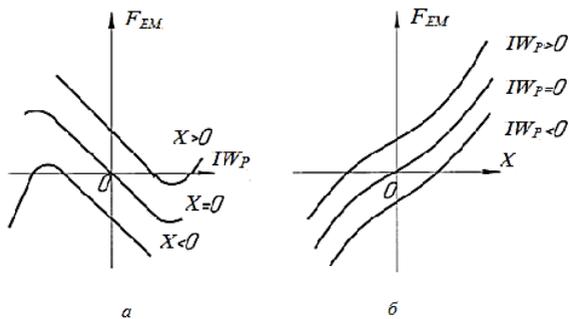


Рисунок 4.16 – Реальні характеристики поляризованого реле:

a – характеристика навантаження; *b* – характеристика тягова.

Розглянемо для прикладу конструкції поляризованих реле типів РП-4, РП-4М, РП-5 та РП-7, які використовуються для комутації електричних кіл в апаратурі автоматики, зв'язку (у приймальних та передавальних колах апаратури тонального телеграфу) та сигналізації. Реле можуть експлуатуватися у рухомих пристроях.

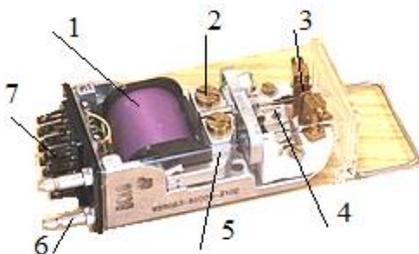


Рисунок 4.17 – Конструкція поляризованих реле автоматики РП-4, РП-5 та РП-7 [9, 19, 50]

Реле відрізняються регулюванням контактних систем:

- РП-4 та РП-4М – двопозиційні, нейтральні, двостабільні;
- РП-5 – трипозиційні, одностабільні, якір реле типу РП-5 за відсутності порушення перебуває у середньому становищі і стосується контактів;

- РП-7 – двопозиційні, одностабільні, з переважанням до правого контакту. За відсутності струму в обмотці якір реле типу РП-7 завжди притиснутий до правого контакту.

Реле РП-4М має фторопластову прокладку між пружинами якоря. Прокладка призначена для зменшення деренчання якоря. Реле типу РП-5 відрізняється від реле типу РП-4 більшою товщиною пружини підвісного якоря. Магнітне коло реле типів РП побудовано за мостовою схемою, в якій шляхи постійного та керуючого (змінного) магнітних потоків розділені. Керуючий магнітний потік спрямований уперек якорю. Постійний магніт Г-подібної форми з алюмінієво-нікелевої сталі разом з полюсним наконечником (башмаком) з м'якої електротехнічної сталі марки ЕА залитий в силумінову основу реле. До наконечника двома гвинтами 2 прикручений магнітопровід у вигляді розімкненого

прямокутника 5, зібраний з листового молібденового пермалою. На сердечнику розташовано котушку 1 із чорного моноліту, на якій намотується від однієї до семи обмоток. Якір реле 4 склепаний із двох пластинок м'якої електротехнічної сталі і укріплений (підвішений) на тонкій сталевій пружині в силуміновій рамці. Для стабілізації положення якоря підвісна пружина розтягнута. До якоря приклепані дві контактні пружини з олов'яно-фосфористої бронзи з контактами. Якір та контактна система реле 3 зібрані на окремій керамічній основі. Силумінова рамка з якорем прикручена двома гвинтами до основи з кераміки, на іншому кінці якого укріплені дві контактні стойки з нерухомими пружинами контактними і гвинтами, що регулюють. Контакти мають сферичну контактну поверхню. Матеріал контактів реле ПДЦРХ-1, ВС-70 (для реле виконання РВ4.522.000-01 – матеріал ЗлНк95-5). Кінці обмоток та ланцюги контактної системи 7 припаяні до 16 плоских контактних штифтів (ламельів) спеціальної штепсельної колодки з фенопласту. Ця колодка прикріплена двома гвинтами та двома штифтами напряму до силумінової основи (корпусу). Включення реле в коло живлення і комутовані кола здійснюється за допомогою з'єднувальної (штепсельної) колодки 6, що дозволяє робити швидко заміну реле. Реле надійно працюють при струмі, що перевищує в 2-4 рази їхній струм спрацьовування. Робоче становище реле будь-яке. За кількістю обмоток реле можуть бути:

- РП-4 двохобмоточні, трьохобмоточні, семіобмоточні;
- РП-5 однообмоточні, двохобмоточні, трьохобмоточні, чотириобмоточні, п'ятиобмоточні, шестиобмоточні та семиобмоточні;
- РП-7 однообмоточні, двохобмоточні, трьохобмоточні, чотириобмоточні, п'ятиобмоточні та семиобмоточні.

Поляризовані реле знаходять широке застосування в схемах автоматики завдяки своїм характерним особливостям, а саме наявність декількох обмоток дозволяє використовувати їх як логічні елементи, невелика потужність спрацьовування – як елементи контролю невеликих електричних сигналів, малий час спрацьовування та чутливість до полярності вхідних сигналів – як амплітудні модулятори та демодулятори. Завдяки високій

чутливості поляризовані реле часто використовують у малопотужних колах змінного струму, вмикаючи їх через випрямляч [2, 35, 40, 51].

4.4 Індукційне реле

Електромеханічне реле, робота якого базуються на взаємодії змінних магнітних полів нерухомих обмоток із струмами, що індукуються цими полями в рухомому елементі [7, 29, 34, 43, 62]. Оскільки ці струми можуть бути наведені лише при зміні магнітного поля в часі, індукційні системи працюють лише на змінному струмі. А для створення моменту обертання необхідно, щоб через провідний елемент проходили як мінімум два магнітних потоки, зсувених один відносно одного. Зсув по фазі відбувається за рахунок обмоток, що живляться від різних джерел, або за допомогою короткозамкнених витків, розташованих на полюсах магнітної системи. Як електропровідний рухомий елемент можна використовувати диски, барабанчики і короткозамкнені рамки, що виконані з алюмінію, міді або латуні. Для забезпечення швидкодії необхідно, аби провідний елемент мав невеликий момент інерції. За цим показником індукційні системи розташовуються таким чином: з КЗ витком, барабанчиком і диском.

Індукційні реле розрізняють за конструкцією магнітної системи і рухомого елемента (рис. 4.18). Осердя у магнітної системи з барабанчиком і рамкою застосовується для зменшення магнітного опору на шляху магнітного потоку і виконується з магнітної сталі.

4.4.1 Момент обертання індукційної системи

Розглянемо момент обертання на прикладі індукційної системи з диском (рис 4.19). При протіканні по обмоткам змінного струму в повітряних зазорах утворюється магнітне поле зі змінним знаком. Магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 наводять в диску ЕРС E_1 і E_2 , які визначають струми трансформації I_1 та I_2 .

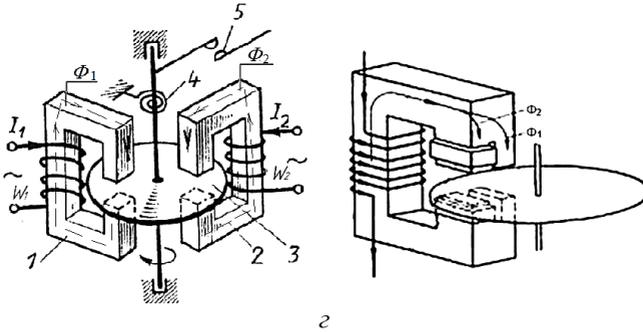
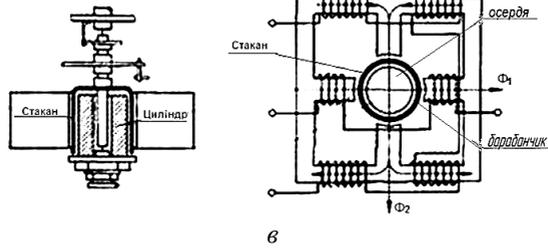
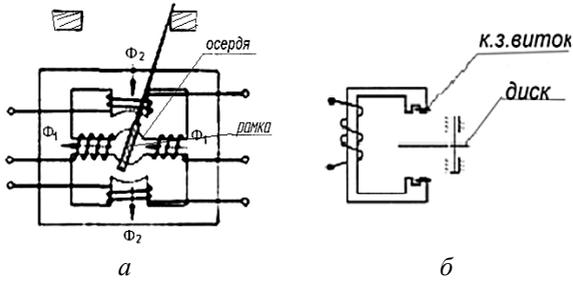


Рисунок 4.18 – Конструкції магнітних систем індукційних реле:

а – з рухомою рамкою; *б* – з диском і КЗ витками на полюсах; *в* – з барабанчиком; *г* – тангенціальна система з диском та розділеним і нерозділеним магнітопроводом

Припустимо, що потоки є синусоїдальними і зсувеними один відносно одного по фазі на кут α , тоді

$$\Phi_1 = \Phi_{1m} \sin \omega t, \quad \Phi_2 = \Phi_{2m} \sin(\omega t - \alpha).$$

де W_1, W_2 – відповідно кількість витків в обидвох обмотках;
 a_1, a_2 – плечі прикладення сил F_1, F_2 ;
 F_1, F_2 – сили;
 I_1, I_2 – струми в диску під полюсами.

Оскільки індуктивність диска дуже мала, кут між струмом I -та ЕРС E теж малий, тому ними можна знехтувати. Крім того знехтуємо індуктивним опором диска, тоді вектори струмів збігатимуться в спрямуванні з векторами відповідних ЕРС, котра в свою чергу відставатиме від потоків на 90° (рис. 4.20) [7, 29, 34, 45, 51].

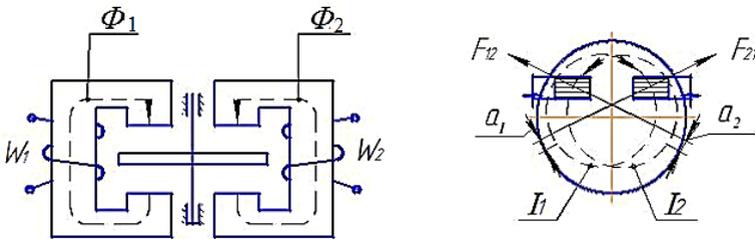


Рисунок 4.19 – Індукційна система реле з диском

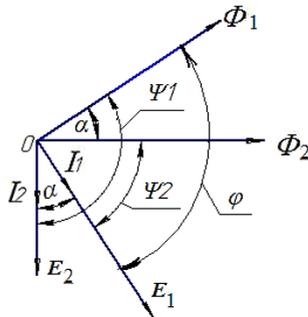


Рисунок 4.20 – Векторна діаграма ЕРС, струмів і магнітних потоків індукційного реле з диском

Як відомо, на провідник довжиною l зі струмом i , що знаходиться в магнітному полі з індукцією B діє сила $F = i \cdot B \cdot l$.

Якщо струми I_1 та I_2 синусоїдальні та зсувені по фазі на кут ψ , тоді її можна визначити

$$F(t) = l \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \psi) \cdot B_m \cdot \sin \omega t, \quad (4.15)$$

де I_m – амплітудне значення струму;

B_m – амплітудне значення індукції;

ψ – кут зсуву між I_m та B_m .

Тоді середнє значення сили за період T дорівнюватиме:

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt. \quad (4.16)$$

Підставимо у рівняння (4.16) рівняння (4.15) і отримаємо:

$$F_{cp} = \frac{I_m \cdot B_m \cdot l}{2} \cos \varphi. \quad (4.17)$$

Сумарне зусилля, що діє на диск буде дорівнювати:

$$\Sigma F = F_{11} + F_{12} + F_{22} + F_{21}, \quad (4.18)$$

де F_{11} – сила взаємодії між потоком Φ_1 і струмом I_1 ;

F_{12} – сила взаємодії між потоком Φ_1 і струмом I_2 ;

F_{22} – сила взаємодії між потоком Φ_2 і струмом I_2 ;

F_{21} – сила взаємодії між потоком Φ_2 і струмом I_1 .

Внаслідок того, що кут зсуву по фазі між однойменними потоком і струмом дорівнює 90^0 ($\cos \varphi = \cos 90^0 = 0$), то з рівняння (4.18) $F_{11} = F_{22} = 0$ отримаємо сумарне зусилля:

$$\Sigma F = F_{12} + F_{21}. \quad (4.19)$$

Моменти обертання, створені цими силами направлені в різні боки. Прийємо позитивний напрямок моменту від сили F_{21} , тоді:

$$\Sigma M = F_{12} \cdot a_2 - F_{21} \cdot a_1, \quad (4.20)$$

де a_1, a_2 – плечі прикладення сил.

Значення струмів в диску можна вирахувати по закону Ома та електромагнітної індукції

$$I_{m1} = \frac{2\pi f \cdot \Phi_{m1}}{R_1}, \quad I_{m2} = \frac{2\pi f \cdot \Phi_{m2}}{R_2}, \quad (4.21)$$

де R_1 і R_2 – активні опори в диску на шляху струмів трансформації;
 f – частота джерела живлення.

Активний опір диска більше залежить від його геометрії і приблизно визначається як:

$$R \approx \frac{\rho}{\Delta} K_R,$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу диска;

Δ – товщина диска;

K_R – геометричний коефіцієнт опору.

З векторної діаграми (рис. 4.20) знаходимо $\cos \psi_1 = -\sin \alpha$, $\cos \psi_2 = \sin \alpha$, з урахуванням рівнянь (4.19...4.21) отримаємо для робочого обертального моменту:

$$M_\rho = \frac{f \cdot \Delta}{\rho} \Phi_{m1} \cdot \Phi_{m2} \left(\frac{\pi l_1 a_1 \beta_1}{S_1 K_{R1}} + \frac{\pi l_2 a_2 \beta_2}{S_2 K_{R2}} \right) \cdot \sin \alpha, \quad (4.22)$$

де l_1 та l_2 – еквівалентні довжини ліній струму під полюсами магнітопроводу;

S_1 і S_2 – площа перетину полюсів;

β_1 і β_2 – коефіцієнти, що враховують частину струму, яка протікає лише під полюсами.

Сума складових в дужках рівняння (4.22) залежить від геометричних співвідношень індукційної системи і називається геометричною постійною:

$$\left(\frac{\pi l_2 a_2 \beta_2}{S_2 K_{P2}} + \frac{\pi l_1 a_1 \beta_1}{S_1 K_{P1}} \right) = x \quad (4.23)$$

Тоді в загальному вигляді для робочого моменту обертання можна записати:

$$M_p = \frac{f \cdot \Delta}{\rho} \cdot x \cdot \Phi_{m1} \cdot \Phi_{m2} \sin \alpha. \quad (4.24)$$

Напрямок обертання диска – від полюса з випереджуючим потоком до полюса з відстаючим потоком. Окрім струмів трансформації в рухомому елементі виникають струми різання через пересікання диском, що обертається, магнітних силових ліній (рис. 4.21). Природу струмів різання проілюструємо на прикладі рамки, виготовленої з провідника в магнітному полі. При русі контуру змінюється потік, пов'язаний з ним:

$$\Phi_x = B \cdot S_x = B \cdot l \cdot x. \quad (4.25)$$

ЕРС, що наведена в контурі при $V = \text{const}$, маємо:

$$e = - \frac{\partial \Phi_x}{\partial t} = -B \cdot l \frac{\partial x}{\partial t} = -B \cdot l \cdot V, \quad (4.26)$$

де V – швидкість руху контуру.

З формули (4.26) ЕРС різання пропорційна швидкості руху контуру і спрямована таким чином, що його рух загальмовується. Аналогічна природа струму різання і в диску. Припустимо, що кут зсуву по фазі між потоком і струмом різання дорівнює нулю (рис. 4.21).

Тоді в результаті взаємодії між потоками Φ_1 і Φ_2 , а також струмами різання I_{p1} та I_{p2} створюється момент загальмовування:

$$M_T = K_2 \omega (\Phi_{m1}^2 + \Phi_{m2}^2), \quad (4.27)$$

де K_2 – коефіцієнт, який залежить від параметрів системи, величина зазвичай велика;

Φ_{m1} , Φ_{m2} – амплітудні значення потоків.

З урахуванням формули (4.27) сумарний обертальний момент, що діє на диск буде визначений як:

$$M_{OB} = K_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot \Phi_{m2} \cdot \sin \alpha - K_2 \omega (\Phi_{m1}^2 + \Phi_{m2}^2), \quad (4.28)$$

де $K_1 = \frac{f \cdot \Delta}{\rho} \cdot x$;

ω – кутова швидкість,

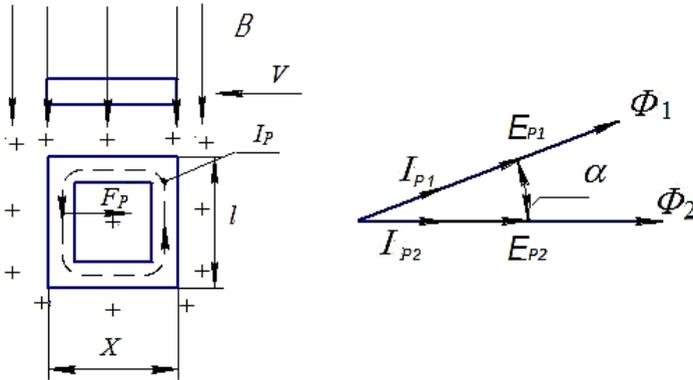


Рисунок 4.21 – Розташування рамки в магнітному полі та векторна діаграма струмів, ЕРС та потоків [51]

Як випливає з (4.28) M_{OB} залежить перш за все від магнітних потоків, кута зсуву між ними, а також геометричних розмірів. На базі індукційних систем працюють реле струму, напруги, опору і потужності. Розглянемо реле напруги потужності (рис. 4.22).

4.4.2 Індукційне реле напругу потужності

Для того щоб визначити напрямок потужності, що передається по контрольованій електричній мережі, в місці встановлення захисту використовують спеціальне реле – реле напругу потужності. Промисловість випускає реле напругу потужності двох видів: індукційні (серій РБМ-170 та РБМ-270) та мікроелектронні (типу РМ-11 та РМ-12) [62, 64, 67, 69]. Індукційне реле напругу потужності [4, 7] має дві обмотки, що розміщені на полюсах замкнутого сталевого магнітопроводу 1 (рис. 4.22). Одна з них, струмова (4) включається у вторинні ланцюги трансформатора струму (ТА), і струм в ній (I_P) визначається вторинним струмом ТА. Друга – потенційна (5) – підключається до вторинної обмотки трансформатора напруги (ТВ), і струм в ній (I_H) пропорційний підведеній напрузі (U_H). Між полюсами розташований внутрішнє сталеве осердя циліндричної форми 2 і алюмінієвий ротор 3, що має форму стакану. На роторі укріплений контактний місток 6. При напрямку потужності КЗ від шин в мережу цей місток замикає нерухомі вихідні контакти 7 (реле спрацьовує). Повернення реле відбувається від дії пружини, що протидіє 8.

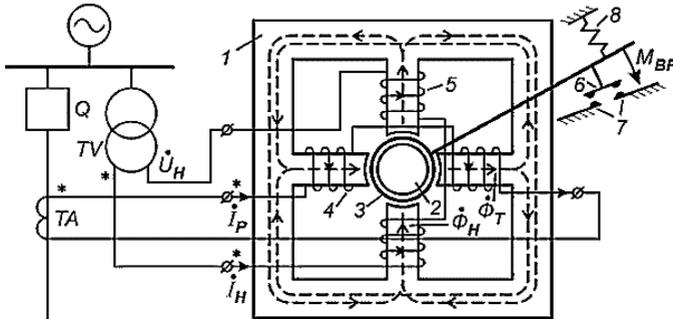


Рисунок 4.22 – Структурна схема індукційного реле напругу потужності [80, 81]

Магнітні потоки, що утворюються котушками з відповідними струмами, зсунуті у просторі на кут 90° . Взаємодія потоків зі струмами, індукованими ними в роторі, створює момент, що обертає, який змушує ротор повертатися. Якщо магнітні потоки мають синусоїдальну форму, то момент, що обертає, дорівнюватиме:

$$M_{\text{вр}} \approx \Phi_I \cdot \Phi_U \cdot \sin \psi,$$

де Φ_I та Φ_U – це магнітні потоки, утворені струмовою та потенційною котушками відповідно;

ψ – електричний кут між магнітними потоками Φ_I та Φ_U .

На 4.23 показано векторну діаграму, що пояснює принцип дії реле. Прийнято такі позначення: \dot{I}_p та \dot{U}_H – вектори струму та напруги, підведених до реле; φ_p – кут між векторами \dot{I}_p та \dot{U}_H , що визначається параметрами силової електричної мережі та схемою включення реле; \dot{I}_H – вектор струму в потенційній котушці реле; α – кут між векторами \dot{I}_H та \dot{U}_H (кут внутрішнього зсуву), що визначається співвідношенням активного та реактивного опорів ланцюга потенційної котушки.

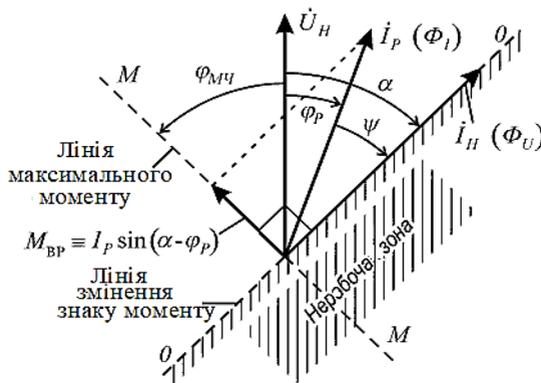


Рисунок 4.23 – Векторна діаграма індукційного реле напрямку потужності

Враховуючи, що $\Phi_I \sim I_p$, $\Phi_U \sim I_n \sim U_n$, а $\psi = \alpha - \varphi_p$, можна отримати: $M_{BR} = K_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \sin(\alpha - \varphi_p)$.

В цьому рівнянні K_p – постійний коефіцієнт, що визначається параметрами реле, а $U_n \cdot I_p \cdot \sin(\alpha - \varphi_p) = S_p$ – потужність на затисках реле. Відповідно, обертальний момент реле пропорційний потужності: $M_{BR} = K_p \cdot S_p$, тобто реле реагує на потужність.

Реле, що обертає, дорівнює нулю, коли $\sin(\alpha - \varphi_p)$, а звідси випливає, що $M_{BR} = 0$, якщо $\varphi_p = \alpha$ при відставанні, і якщо $\varphi_p = (\alpha + 180^\circ)$ при випередженні вектором \dot{I}_p вектору \dot{U}_n . Лінія, розташована під цим кутом до вектору \dot{U}_n , називається лінією нульових моментів або лінією зміни знаку моменту [80]. Кут φ_p між векторами \dot{I}_p та \dot{U}_n , при якому обертальний момент має максимальне значення, прийнято називати кутом максимальної чутливості $\varphi_{мч}$. Лінія, розташована до вектору \dot{U}_n під кутом $\varphi_{мч}$, називається лінією максимального моменту. Якщо внутрішній кут $\alpha = 0$ (рис. 4.24, а), то момент, що повертає $M_{BR} = K_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \sin(-\varphi_p)$ в реле пропорційний реактивній потужності, підведеної до реле (синусне реле або реле реактивної потужності). Ці реле виконуються так, що M_{BR} є позитивним, якщо кут $\varphi_p < 0$ (тобто $M_{BR} = K_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p$). Кут максимальної чутливості до синусного реле $\varphi_{мч} = 90^\circ$. Якщо внутрішній кут $\alpha = 90^\circ$ (рис. 4.24, б), то момент, що обертає $M_{BR} = K_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \sin(90 - \varphi_p) = K_p \cdot U_n \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p$ пропорційний активної потужності, підведеної до реле (косинусне реле або реле активної потужності). Для косинусного реле $\varphi_{мч} = 0^\circ$.

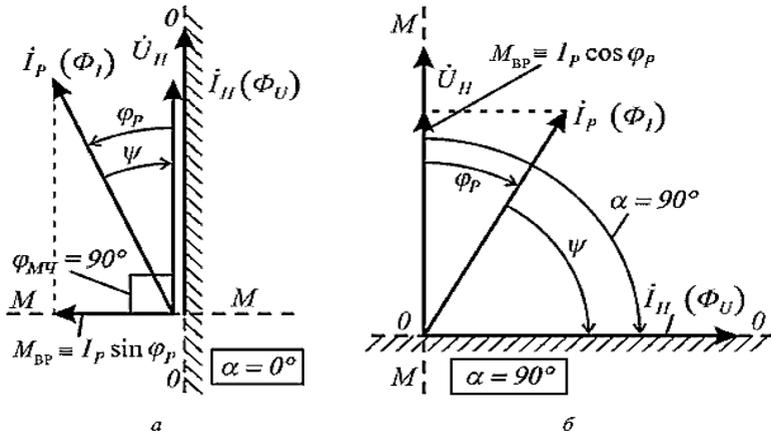


Рисунок 4.24 – Векторна діаграма синусного реле або реактивної потужності (а) та косинусного реле активної потужності (б) [80]

У реле змішаного типу кут α може мати значення від 0° до 90° (див. рис. 4.24). Наприклад, реле змішаного типу (РБМ-171, РБМ-271) мають дискретне зміння куту α : $\alpha = 45^\circ$ ($\varphi_{\text{мч}} = 45^\circ$) або $\alpha = 60^\circ$ ($\varphi_{\text{мч}} = 30^\circ$). Спрацьовування реле напряму потужності відбувається при виконанні умови: $M_{\text{БР}} = M_{\text{пр}}$, де $M_{\text{пр}}$ – протидіючий момент, який визначається силою протидії повертальної пружини, тертям в підшипниках реле і силою натискання контактів при спрацьовуванні реле. Оскільки крутний момент реле пропорційний підведеній до нього потужності, реле спрацьовує при певному множенні $U_n \cdot I_p$. Мінімальне значення потужності на затискачах реле, при якому воно спрацьовує, прийнято називати потужністю спрацьовування реле $S_{\text{СР}}$. Більшість індукційних реле $S_{\text{СР}} = (0,2 \dots 4)$ В·А. Чутливість реле оцінюється за вольт-амперною характеристикою, яка є залежністю напруги спрацьовування реле від струму (4.25, а), при незмінному куті між векторами i_p та \dot{U}_n , що дорівнює куту максимальної чутливості.

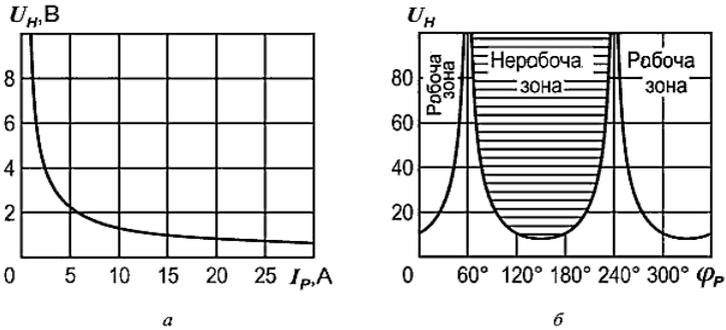


Рисунок 4.25 – Вольт-амперна (а) та кутова (б) характеристики реле напряму потужності [80, 81]

Залежність потужності спрацьовування реле від кута між векторами i_p та \dot{U}_n при незмінному струмі прийнято називати кутовою характеристикою реле (4.24, б). Вона визначає зони спрацьовування та неспрацьовування реле. Як видно, при кутах, що відповідають зміні напряму моменту, що обертає, потужність спрацьовування зростає і прагне нескінченності. При $\varphi_p = \varphi_{мч}$ потужність спрацьовування реле має мінімальне значення.

Принцип дії мікроелектронних статичних реле напряму потужності РМ-11 та РМ-12 заснований на вимірі тривалості інтервалів часу, при якому напруга та струм, підведені до реле, мають однаковий знак. Час збігу знаку сигналів вимірюється протягом кожного напівперіоду та порівнюється з уставкою. При певній тривалості часу збіг символів сигналів реле спрацьовує. Ці реле перевершують індукційні за багатьма основними характеристиками і широко використовуються в системах релейного захисту.

Треба зауважити, що взагалі індукційні системи з диском відрізняються невисокою чутливістю і великим часом спрацьовування через значний момент інерції рухомого елемента - диска. На практиці реалізуються в реле струму РТ 80 і РТ 90 для отримання характеристики часу спрацьовування, що залежить від струму. Знаходять застосування в приладах змінного струму для

захисту електричних машин, трансформаторів, ліній живлення та розподільчих пристроїв від перевантажень та коротких замикань.

Для розробки більш чутливих і швидкодіючих індукційних реле використовують системи з рухомих алюмінієвим циліндровим ротором або сектором (наприклад, в однофазних реле напряму потужності, таких як РБМ-170 і РБМ-270) з двома обмотками. Одна з них підключається до трансформатора струму, і має вторинний струм, а інша - до трансформатора напруги і має струм, пропорційний напрузі на затисках обмотки. Момент обертання, що виникає на роторі, пропорційний потужності на затисках реле, і його напрямок залежить від напрямку цієї потужності. Такі реле використовуються в схемах релейного захисту для виявлення і відмикання ліній, на яких сталося коротке замикання. На основі цієї системи з рухливим сектором створено реле серії ДСШ, яке застосовується в автоматиці залізничного транспорту [7, 29, 29, 32, 80].

4.5 Магнітоелектричні реле

Магнітоелектричні реле – це електромеханічні реле, робота яких заснована на взаємодії магнітних полів нерухомого постійного магніту та рухомої обмотки, що збуджується струмом. Рухома обмотка виконується у вигляді рамки, на яку намотується обмотка [7, 28, 29, 33, 43, 81].

Магнітоелектричне реле (рис. 4.26) складається з постійного магніту 1, рухомої рамки 2, на яку намотана обмотка 3, що живиться струмом, і контактів 4. Принцип роботи магнітоелектричних реле заснований на взаємодії струму I_p в обмотці рамки з магнітним потоком постійного магніту. Сила, що діє на обмотку рамки:

$$F_e = k \cdot B_m \cdot I_p \cdot l \cdot W_p, \quad (4.28)$$

де B_m – індукція магнітного поля постійного магніту;

I_p – струм в обмотці рамки;

l – активна довжина витка обмотки;

W_p – число витків обмотки рамки.

Обертвий момент, утворений силами F_e , розраховується як

$$M_e = F_e \cdot d = k' \cdot B_m \cdot I_p, \quad (4.29)$$

де d - плече пари сил F_e ;

$$k' = k \cdot B_m \cdot I_p.$$

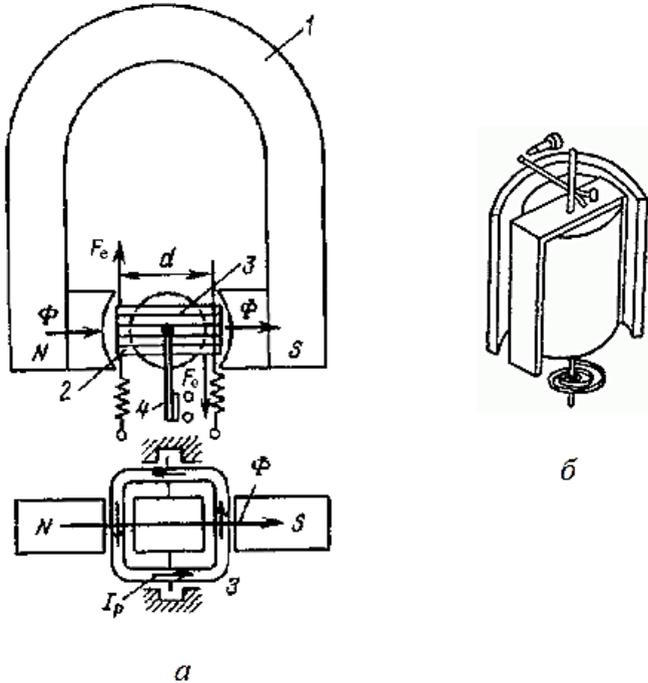


Рисунок 4.26 – Магнітоелектричне реле [81, 82]:

- a – з підковоподібним магнітопроводом;
- b – з внутрішнім розташуванням магніту.

Кут повороту рамки приймається невеликим ($5 \dots 10^\circ$), а форма полюсів магніту підбирається таким чином, щоб магнітне поле було рівномірним. При цьому магнітна індукція B_m постійна і момент M_e , пропорційний струму I_p :

$$M_e = k' I_P.$$

Знак M_e і F_e залежить від напрямку I_P в рухомій рамці реле. При наведеному на рис. 4.26, a напрямі I_P напрям F_e , визначено за правилом «лівої руки».

Таким чином, магнітоелектричні реле реагують на напрям струму і тому, так само як і поляризовані реле, не можуть працювати на змінному струмі.

Магнітоелектричні реле мають високу чутливість та мале споживання. Потужність спрацьовування досягає $10^{-8} \dots 10^{-10}$ Вт і перевищує чутливість поляризованих реле, що пояснюється наявністю сильного поля постійного магніту 1 і малим моментом, що протидіє рухомій системі.

При подачі сигналу на провідники рамки, що знаходиться в магнітному полі, діє момент обертання:

$$M_{OB} = 2 \cdot B \cdot I_P \cdot l \cdot W \cdot a, \quad (4.30)$$

де B – індукція магнітного поля в зазорі;

I_P – струм рамки;

l – ширина полюсів;

W_p – число витків рамки;

a – плече сили.

При пересуванні рамки в магнітному полі на неї діє гальмівний момент, який зазвичай має невелику величину через велике значення опору кола живлення, і тому його можна не враховувати.

$$M_{\Gamma} = 2 \cdot \frac{(B \cdot l \cdot W \cdot a)^2}{r_P + r} \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (4.31)$$

де r_P, r – опори відповідно рамки та кола живлення;

φ – кут обертання.

Якщо ж рамка виконана на металевому каркасі (добре відводить тепло), то по суті вона є короткозамкненим витком, а гальмівний момент в цьому випадку може мати велике значення,

тому його слід враховувати: $\sum M = M_{OB} + M_{Г}$. Напрямок обертання рамки для системи з поступальним рухом визначається за правилом лівої руки [40]. Такі реле мають контактну систему з малою здатністю відключення та зазор між контактами 0,3...0,5 мм. Час спрацьовування реле має діапазон від 0,01 с до 0,2 с. Зазвичай знаходять застосування як нуль-індикатори в схемах на випрямленому струмі, й досі знаходяться в експлуатації. Магнітоелектричні реле застосовувалися як високочутливі нуль-індикатори в схемах на випрямленому струмі і знаходяться в експлуатації. Нині замість них застосовують електронні реле, що розглядаються нижче.

4.6 Електродинамічне реле

Електродинамічне реле, робота якого заснована на взаємодії магнітних полів рухомої і нерухомої обмоток, що збуджуються струмами, підведеними ззовні (рис. 4.27) має дві котушки [7, 29, 30, 34, 80]. Одна котушка є нерухомою 1, а всередині неї розташовується рухома 2 котушка. Рухома котушка починає рухатися, якщо одночасно подати сигнал на дві котушки. Сила і моменти обертання визначаються наступним чином.

На витки рухомої котушки з боку магнітного поля нерухомої котушки діє електродинамічна сила F , що направлена перпендикулярно силовим лініям поля. Якщо розглянути векторну діаграму, тоді сила при постійному струмі буде визначатися як:

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l_2 \cdot W_2, \quad (4.32)$$

де B_1 – індукція поля в зазорі, створена нерухомою котушкою;
 I_2 – струм рухомої котушки;
 l_2 – ширина рухомої котушки;
 W_2 – число витків рухомої котушки.

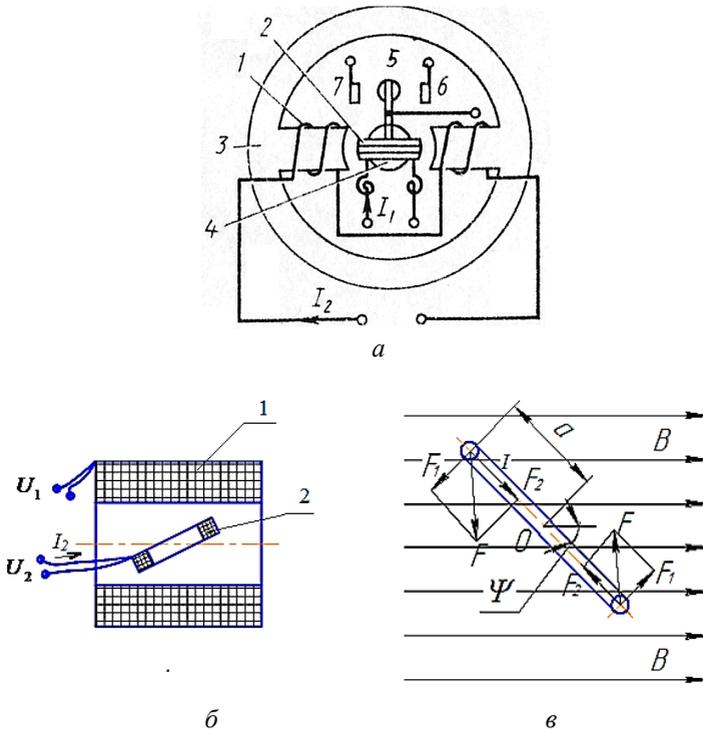


Рисунок 4.27 – Принцип дії електродинамічного реле і визначення сили F і моменту обертання M рухомої котушки в магнітному полі [51]

Сила при змінному струмі:

$$F = \frac{B_{m1} \cdot I_{m2} \cdot l_2 \cdot W_2}{2} \cdot \cos \varphi, \quad (4.33)$$

де B_{m1} – максимальна індукція поля в зазорі;
 I_{m2} – максимальний струм рухомої котушки;
 φ – кут зсуву по фазі між комплексними векторами \bar{B} , \bar{I} .

Нормальна складова сили:

$$F_1 = F \cos \psi,$$

де ψ – кут повороту рамки.

Тоді момент обертання при постійному струмі буде рівний:

$$M = F \cdot a \cdot \cos\psi = B_1 \cdot I_2 \cdot l_2 \cdot W_2 \cdot a \cdot \cos\psi, \quad (4.34)$$

де a – плече сили.

Обертальний момент на змінному струмі рівний:

$$M_{cp} = F \cdot a \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi = \frac{B_1 \cdot I_2 \cdot l_2 \cdot W_2}{2} \cdot a \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi. \quad (4.35)$$

Отже, момент електродинамічної системи залежить від положення рамки, і буде максимальний, коли рухлива рамка розташована вздовж силових ліній поля нерухомої котушки ($\psi = 0, \cos\psi = 1$), і впродовж її повертання момент зменшуватиметься до нуля. При живленні обмоток змінним струмом система стає чутливою до зміни фази. Момент стає максимальним, коли комплексні вектори індукції \vec{B}_1 і струму \vec{I}_2 збігаються за фазою [7, 29, 29, 32, 46, 80].

4.7 Теплові реле (термореле)

Для захисту електричних кіл від тривалого протікання струмів перевантаження, що перевищують номінальні струми (до $5 \dots 7 I_{ном}$), широко застосовуються апарати теплового захисту з термобіметалевими виконавчими елементами (механізмами). Вимірювальний елемент нагрівається струмом, що протікає крізь цей елемент (прямий нагрів), або крізь окремий нагрівач (непрямий або непрямий нагрів) (рис. 4.28, б). Також існує комбінований нагрів термобіметалевого елемента. Чутливі елементи являють собою двошарову пластинку з різними коефіцієнтами лінійного розширення, і виготовляються зі сплавів з різними коефіцієнтами температурного розширення, тіл зі змінною магнітною проникністю, або з таких, у яких змінюється електричний опір при зміні температури, або з термобіметалів, які отримали найбільше розповсюдження. При нагріванні шар

термоактивного металу розширюється, що має коефіцієнт розширення α_1 (1 на рис. 4.28, а), а шар термоінертного металу з коефіцієнтом α_2 (2 на рис. 4.28, а) майже не деформується. Пластина з більшим α називається активною (наприклад, латунь, хромонікелева сталь, $\alpha = (15 \dots 20) \cdot 10^{-6}$ м/град), а з меншим коефіцієнтом – інертною (частіше виконується з інвару (Ni – 36%, Fe – 64%, $\alpha = 10^{-6}$ м/град).

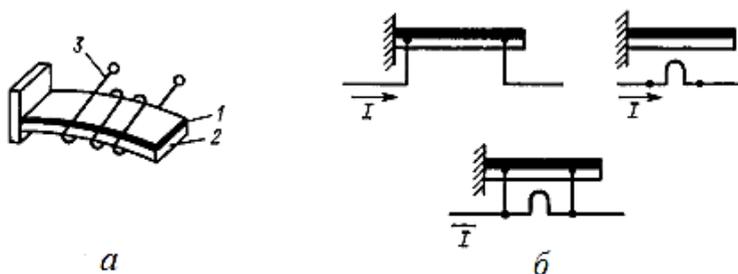


Рисунок 4.28 – Біметалева пластина з нагрівальним елементом (а) та способи її підігріву (б)

Якщо один кінець пластини закріплений (див. рис. 4.28, а), то її вільний кінець згинається в бік виробу з матеріалу з меншим значенням α , а максимальний прогин становитиме [51]:

$$x_{\max} = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{l^2 \cdot \theta}{\delta}, \quad (4.36)$$

де α_1 – температурний коефіцієнт лінійного розширення термоактивного матеріалу (наприклад, хромонікелева сталь), (позначено 1 на рис. 4.28, а);

α_2 – температурний коефіцієнт лінійного розширення термоактивного матеріалу (наприклад, інвар, – це позиція 2 на рис. 4.28, а);

l – довжина біметалевої пластини;

Θ – перевищення температури біметалевої пластини над температурою навколишнього середовища;

δ – сумарна товщина біметалевої пластини.

В деяких теплових реле (наприклад, в реле ТРН-10, ТРН-25 та інших) нагрівальні елементи виконуються змінними, що значно розширює діапазон робочих струмів. На рис. 4.29 представлені спрощені схеми біметалевих пристроїв теплових реле [26, 27, 51].

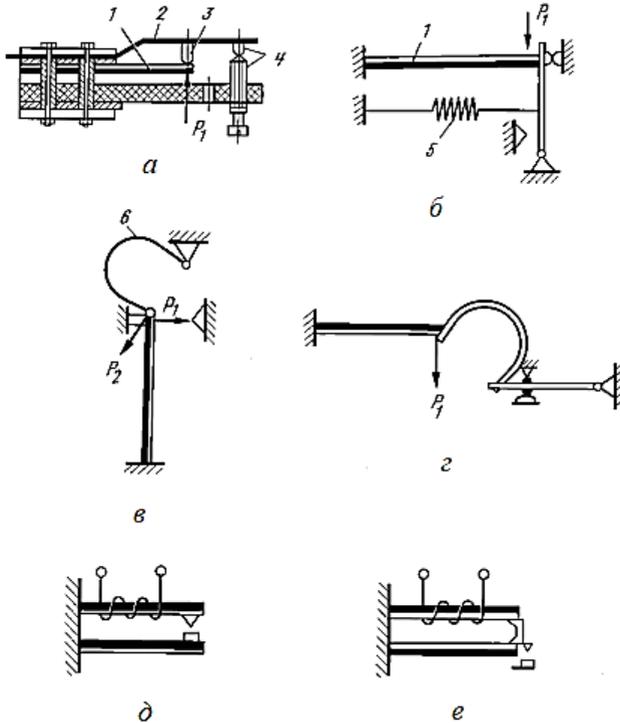


Рисунок 4.29 – Схеми біметалевих пристроїв теплових реле [45]

При нагріванні пластини 1 (рис. 4.29, а) вона вигинається в напрямку зусилля P_1 і, завдяки впливу на штифт 3 переміщує рухомий пружинний контакт 2 до розмикання з нерухомим контактом 4. Змінюючи положення контактів 2 і 4 змінюється уставка реле по струму спрацьовування. Після охолодження

біметалевої пластини реле повертається у вихідне положення. Спосіб підігріву пластини реле може бути безпосереднім, або непрямим. Даний пристрій має мале швидкодію, що усувається в конструкції, представленої на рис. 4.29, б. Біметалева пластина 1 служить засувкою, що утримує контакти в замкнутому стані. При нагріванні та вигинанні пластини вона звільняє контакти, які розмикаються під дією пружини 5. Повернення пластини у вихідний стан відбувається вручну. Ще більшої швидкодії можна досягнути в конструкції, що показана на рис. 4.29, в. Пластинчаста пружина 6 утримує контакти реле в замкнутому стані до тих пір, поки зусилля P1, що розвивається пластиною, не стане більше зусилля P2, що розвивається пружиною. При нагріванні пластини вона стрибком вигнеться в бік P1 і розімкне контакти реле. Повернення системи в початковий стан є автоматичним після охолодження пластини.

Різновидом такої конструкції є пристрій, представлений на рис. 4.29, г. Тут одночасно відбуваються стрибкоподібні переміщення пластини і контактів. Система має самоповернення. Для виключення впливу температури навколишнього середовища на характеристики теплових реле в них передбачена термокомпенсація у вигляді додаткової біметалевої пластини. У конструкції реле рис. 4.29, д здійснюється компенсація прогину пластини, а на рис. 4.29, е показано варіант виконання пластини з компенсацією зусилля.

У термореле контакти розташовувати на біметалевій пластині не можна, тому, що вона рухається повільно, крім того при комутації виникає дуга, і контакти можуть підгорати. Тому, за допомогою конструктивних рішень, контакти розташовуються таким чином, щоб вони рухалися швидше як вказано на рис. 4.30. Коли біметалева пластина вигинається від нагрівання, в деякий момент вона звільняє засувку та під дією пружини швидко розриває контакти. Головним недоліком таких реле є реакція на температуру довкілля.

Для усунення цього недоліку застосовуються заходи температурної компенсації, наприклад, такі, які зображені на рис. 4.31, а, наведено спосіб, коли пластини біметалу при різних коефіцієнтах розширення α (від температури довкілля)

прогинатимуться в ту або іншу сторону на одне і теж значення (зберігаючи значення β постійним), і лише струм, який протікає обмоткою, змусить контакти замкнутися, та на рис. 4.31, б) – це, коли при різних коефіцієнтах α біметалеві пластини вигинатимуться в різні сторони, а ізоляційна пластина (1) збереже β_1 і β_2 незмінними.

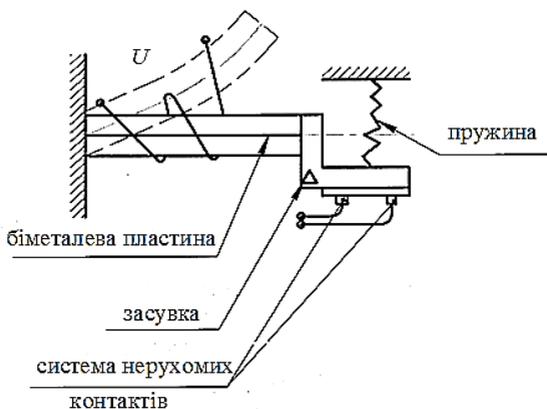


Рисунок 4.30 – Принцип конструкції теплових реле [45, 53]

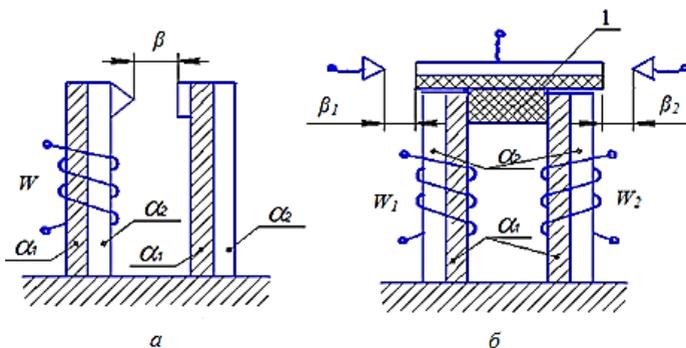


Рисунок 4.31 – Способи компенсації температури навколишнього середовища в термореле [51]

Спрацьовує реле від сигналів, що поступають в обмотки W_1 і W_2 . При конструюванні термореле з біметалами потрібно враховувати явище гістерезису, що викликає залишкову деформацію навіть при допустимих, але тривалих за часом, температурних впливів.

Теплові реле з термобіметалевими пластинами знайшли широке застосування для захисту статорної обмотки двигуна від тривалого протікання струмів перевантаження, як в режимі пуску двигуна, так і в режимі технологічних перевантажень. Вони відносяться до апаратів захисту непрямої дії, тому, що реагують не на перевищення температури нагрівання об'єкта, що захищається, а на струм, який викликає це перевищення. Звідси недоліками теплових реле є:

- мала термічна стійкість до протікають по реле надструмів;
- нерегульованість захисної характеристики;
- великий час спрацьовування та втрати енергії;
- великий розкид у спрацьовуванні реле;
- необхідність у остиганні.

Перевагами теплових реле є:

- відносно малі розміри, маса та вартість;
- простота конструкції та надійність в експлуатації.

Основною захисною характеристикою реле є часострумова характеристика, тобто залежність часу спрацьовування реле від кратності струму в колі відносно номінального струму (наприклад, рис. 4.32 для теплового реле ТРН-10А). Характеристики наводяться для реле, що працює з холодного стану (область 1), наприклад при пуску двигуна, і реле, що працює з гарячого стану (область 2), наприклад, після прогрівання реле номінальним струмом.

Сучасні магнітні пускачі комплектуються тепловими реле нового покоління. Реле серії РТЛ має триполюсне виконання, механізм для прискорення спрацьовування при обриві фази статорної обмотки двигуна, регулятор струму неспрацьовування та незмінні нагрівальні елементи. Реле забезпечене термокомпенсацією і має високу швидкодію, розраховане на номінальні струми до 200 А і призначене для комплектації пускачів серії ПМЛ. Реле серії РТТ (для магнітних пускачів серії

ПМА) має аналогічні характеристики та розраховане на номінальні струми до 630 А.

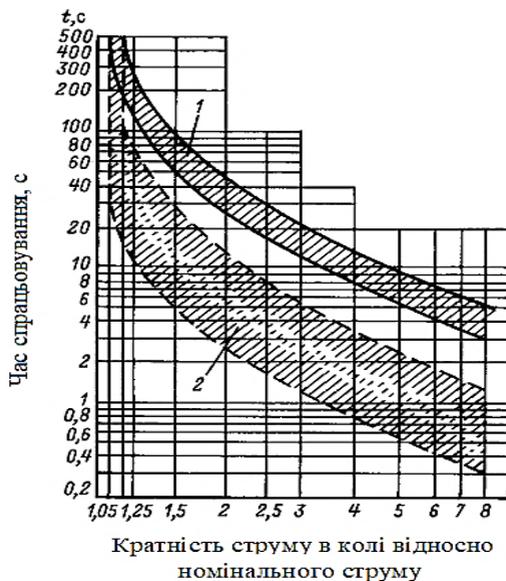


Рисунок 4.32 – Часо-струмові характеристики реле ТРН-10А [53]:

1 – зона часо-струмових характеристик при спрацьовуванні реле з холодного стану; 2 – зона часо-струмових характеристик при спрацьовуванні реле з гарячого стану (після прогріву номінальним струмом).

4.8 Реле струмового захисту

До апаратів захисту відносяться всі пристрої захисту, що контролюють струм в електричному колі. Це є і запобіжники, і автоматичні вимикачі, і максимальні та мінімальні струмові реле. До апаратів струмового захисту також можна віднести і теплові реле, які через специфіку їх роботи та поширення можуть бути виділені в окремий клас теплового захисту (див. п.п. 4.7). Апарати струмового захисту зазвичай захищають споживачів від перевантажень, неповнофазних режимів, а електричні кола – від коротких замикань. Серед апаратів струмового захисту особливе

місце займають мінімальні реле струму та максимальні реле струму.

Мінімальні реле струму призначені для захисту двигунів від неповнофазних режимів (при обриві фази статорної обмотки двигуна). У найпростішій схемі використовуються три реле мінімального струму, включені у всі фази живлення електродвигуна, а замикаючі контакти цих реле з'єднані послідовно з колом керування магнітного пускача. При нормальній роботі електродвигуна всі три реле мінімального струму включені. При обриві будь-якої фази її струм припиняється і реле відключається, при цьому відмикає коло керування магнітного пускача. При цьому електродвигун вимикається. Для захисту електродвигунів можна застосовувати реле мінімального струму ЕТ-521.

Великі функціональні можливості закладені в *максимальному реле струму*. Вони можуть виконувати функції захисту споживачів від великих перевантажень по струму (наприклад, для захисту електродвигунів застосовують реле РЕ - 570Т, ЕТ-522 та інші) та захист електричних кіл від короткого замикання на затискачах споживачів і в самому колі (наприклад, реле РТ-40, РТ-80 тощо). При нормальній роботі споживача максимальне реле струму не включається. При великому навантаженні або короткому замиканні одне або всі реле, що включені в різні фази живлення, спрацьовують і, своїми контактами розмикання, відключають коло керування магнітного пускача. Основним недоліком максимальних реле струму реле є те, що вони не реагують на обриви фаз, та те, що їх не можна відрегулювати на невеликі навантаження струму в колі.

Одним з серій максимальних реле струму є реле РТ-40. У ньому передбачено два способи регулювання струму спрацьовування $I_{спр}$: зміною попереднього натягу пружини протидії (в 4 рази) і перемиканням обмоток (в 2 рази). Відомо дев'ять типовиконань реле [94], що випускаються на номінальні струми від 0,2 А до 200 А. Час спрацьовування реле не більше 0,1 с при струмі, який дорівнює $1,2 \cdot I_{спр}$, і не більше 0,03 с при струмі $3 \cdot I_{спр}$. Коефіцієнт повернення реле не нижче 0,85 (у ряді

типовиконань не нижче 0,7). Контакти реле витримують потужність комутаційного ланцюга близько 60 Вт постійного струму при напрузі 220 В і близько 300 В змінного струму при напрузі до 250 В. У реле струму РТ-40, з проміжним трансформатором і випрямляючим мостом, підвищується термічна стійкість до тривалого протікання великих струмів (реле РТ-40/1Д). Реле РТ-40/Ф реагує на відхилення форми кривої змінного струму від синусоїдальної. Реле містить спеціальний фільтр, що не пропускає в обмотку реле струм третьої та кратних їй гармоніки. Для кіл керування та захисту електродвигунів часто застосовують струмові реле постійного струму РЕВ-300 та реле змінного струму РЕВ, РЕ-571Т та ін. Максимальні реле струму в колі керування асинхронними двигунами вибираються за номінальним струмом котушки реле, який повинен бути не менше номінального струму двигуна, і згідно з уставкою на струм спрацьовування $I_{уст}$ реле. Для роботи в колі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором уставка на струм спрацьовування реле відбудовується від пускового струму двигуна як:

$$I_{уст} \geq (1,3 \dots 1,5) \cdot I_{П},$$

а для асинхронного двигуна з фазним ротором – від номінального струму:

$$I_{уст} \geq (2,25 \dots 2,5) \cdot I_{ном.дв},$$

де $I_{ном.дв}$ та $I_{П}$ - це відповідно номінальний та пусковий струми двигуна.

Контакти вибраного струмового реле обов'язково перевіряються на комутаційну здатність.

Прикладом реле, що застосовується в схемах релейного захисту та протиаварійної автоматики як орган, що реагує на підвищення струму в контрольованому колі, можна навести реле РСТ-40В (рис. 4.33, а), яке є комбінованим реле, що поєднує переваги електромеханічних та електронних реле струму і часу, що дозволяє підвищити характеристики струмових захистів, підвищивши тим самим надійність електропостачання

споживачів, можлива заміна РТ 40 і реле часу серії РВ або РСВ. Це комбіноване реле максимального струму без оперативного живлення з витримкою часу на спрацювання поєднує переваги електромеханічних та електронних реле струму та часу.

Основні переваги реле:

- не потрібне оперативне харчування, бо живиться від вхідного струму, внаслідок чого має високу перешкодостійкість, і може застосовуватися замість реле РТ-40, РТ-140, РСТ 11, 12, 13, 14, 11М та ін., і використовуються спільно з ними реле часу, причому потужність, що споживається на мінімальній уставці діапазону, трохи більше $2 \text{ В} \cdot \text{А}$;

- в одному реле два функціональні елементи – вимірювальний орган струму та орган витримки часу, що дозволяє виконати на основі реле повноцінний максимальний струмовий захист (МСЗ);

- РСТ-40В виконано на мікроелектронній елементній базі, тому на відміну від електромеханічних реле має високу вібростійкість і ударостійкість, у ньому принципово відсутня вібрація контактів (як у реле змінного струму), і воно не є джерелом перешкод у колах оперативного живлення (як реле часу з годинним механізмом);

- комутаційна здатність контактів реле дозволяє діяти безпосередньо на котушку відключення вимикачів;

- реле потребує лише однієї операції з налаштування шкали уставок, а коефіцієнт повернення щонайменше 0,9 виходить автоматично.

Іншим прикладом можна навести реле струму СИЭЗ-ВБТИ (рис. 4.33, б) (максимального-мінімального), яке призначене для використання як багатофункціональний пристрій, такий як:

- реле струму;
- реле максимального струму;
- реле мінімального струму;
- реле максимального – мінімального струму;
- вимикач безконтактний струмовий (ефективна заміна кінцевих, кінцевих вимикачів).

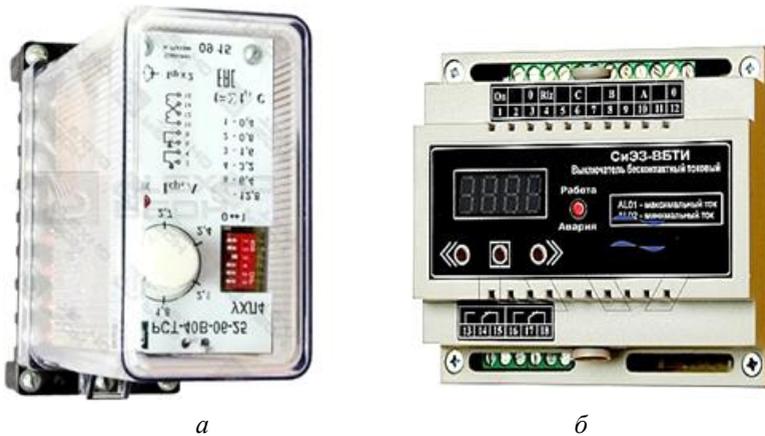


Рисунок 4.33 – Реле максимально та мінімального струму [94]

Реле забезпечує:

- індикацію струму в колі;
- цифрову установку мінімального струму спрацьовування;
- встановлення часу спрацьовування за мінімальним струмом;
- цифрове встановлення максимального струму спрацьовування;
- встановлення часу спрацьовування за максимальним струмом;
- індикацію виду спрацьовування;
- індикацію струму під час спрацьовування;
- можливість включення та відключення необхідних параметрів спрацьовування;
- релейний вихід керування та сигналізації спрацьовування за максимальним струмом;
- релейний вихід керування та сигналізації спрацьовування за мінімальним струмом;
- встановлення коефіцієнта трансформації стандартних трансформаторів струму.

4.9 Герконові реле

4.9.1 Герметизовані магнітокеровані контакти та герконові реле

Магнітокерованим контактом (МК), або герконом називається елемент електричного кола, що змінює стан цього кола механічним замиканням, або розмиканням під впливом дії керуючого магнітного поля на контакт-деталі, які поєднують функції контактів та частини електричних і магнітних кіл. Магнітокерований контакт, розташований в герметизованому балоні, називається герметизованим магнітокерованим контактом (ГМК), або герконом [4, 7, 17, 31, 33, 46]. Вперше МК були запропоновані Коваленковим В. І. (А.С. СРСР № 466) у 1922г., а В. Еллвуд в 1942 році запропонував герметизувати такі контакти (Патент США № 2289830).

Герметизовані магнітокеровані контакти дозволили вирішити декілька завдань:

- усунути вплив навколишнього середовища, а також багатьох продуктів, які утворюються при комутації, на область контакту, що розширило можливості при комутаціях електричних ланцюгів з дуже малими струмами ($10^{-10} \dots 10^{-12}$ А) та напругою (10^6 В);

- підвищити механічну зносостійкість 10^9 циклів і навіть більше;

- вирішити багато складних схемних задач;

- підвищити швидкодію до 0,5 мс, мати перехідний опір R_D до 0,05 Ом, та зменшити потужність керування до 50 мВт;

- виключити механічний зв'язок з впливаючим органом, а також гальванічний зв'язок між колами керування та комутації.

Геркони зазвичай розрізняються:

- за магнітною системою – на нейтральні і поляризовані;

- за характером комутації – на замикаючі, розмикаючі і перемикальні;

- за потужністю – на малопотужні (до 60 В·А), середньої потужності (60...1000 В·А), силові, з покращеними умовами тепловіддачі (герсикони більше за 1000 В·А).

Промисловістю випускалися геркони довжиною від 9 до 52 мм, діаметром 2,2...5,2 мм, з робочим зазором 0,05...0,3 мм і перекриттям кінцівок контакт-деталей від 0,2 до 2 мм. На рис. 4.34 представлений ескіз симетричного геркона.

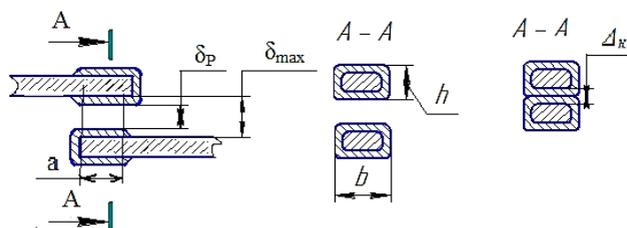


Рисунок 4.34 – Розімкнене та замкнене положення контактної частини замикального геркона:

Δ_k – кінцевий (контактного покриття) зазор; δ_p – робочий розхил контактів;
 $\delta_{max} = \delta_p + \Delta_k$ – немагнітний робочий зазор за відсутності керуючого магнітного поля.

В класичному виконанні геркон є скляним балоном 1 (зауважимо, що скло герконів зазвичай зеленого кольору через присутність іонів заліза, коли заварюється скляний балон за допомогою інфрачервоного випромінювання або резистивною зваркою), в який впаяні контакт-деталі 2 (оскільки вони поєднують декілька функцій їх також називають контактними осердями – КО), що виконуються з магнітного сплаву з великою магнітною проникністю (найчастіше з пермалоїв) і виводів 3 (рис. 4.35). Цей геркон розміщений в колі керування – котушці 4. Пермалої – це сплави заліза та нікелю, які мають велику початкову магнітну проникність в області слабких магнітних полів, що пов'язана з практичною відсутністю анізотропії і магнітострикції. Комутуючі частини контакт-деталей покриваються шаром благородних металів ($R_{II} = \text{const}$), наприклад родію Rh, золота Au та їх сплавів. Усередині скляного балона утворюється або вакуум, або ж балон заповнюється сухим газом (азотом N, воднем H, або їх суміщу), що не вступають в хімічну реакцію з матеріалом контактів. Якщо геркон помістити в магнітне поле, яке створюється електромагнітною котушкою, електромагнітом або постійним

магнітом, то через контакт-деталі проходить певний магнітний потік [25, 26, 33, 36].

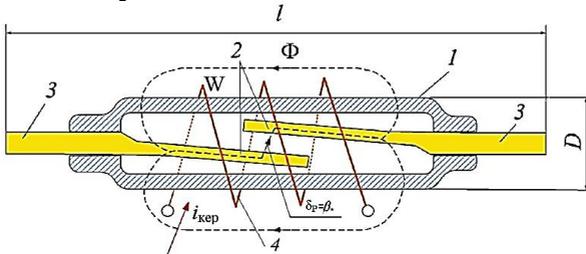


Рисунок 4.35 – Конструкція симетричного магнітокерованого контакту, що замикає (герконове реле) [85]

У контактному зазорі δ_{max} виникає електромагнітна сила F_{EM} і, коли ця сила перевищує механічні сили пружності контакт-деталі, відбувається замикання на значення контактної поверхні a . Припустимо, що магнітна провідність «контакт-деталі» рівна нескінченості, тоді отримаємо картину магнітного поля (рис. 4.36), на якій лінії, що відділяють одні характерні ділянки поля від інших, називаються сепаратрисами.

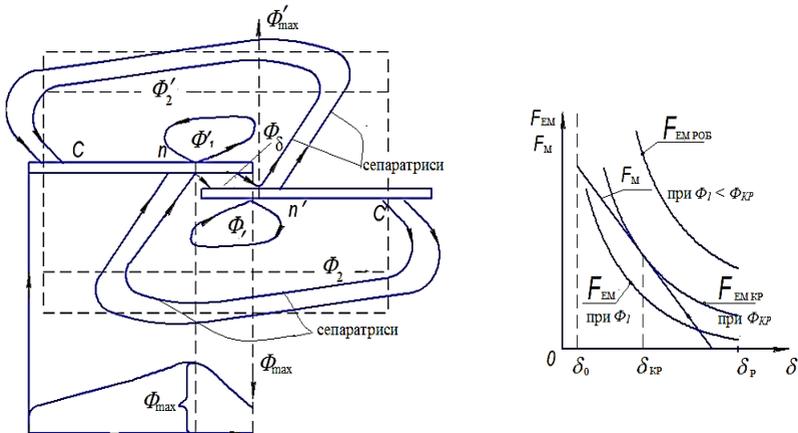


Рисунок 4.36 – Розподіл магнітного поля контакт-деталі та характеристики герконового реле [51]

Максимальний потік складається з наступних потоків:

$$\Phi_{\max} = \Phi'_{\max} = \Phi_{\delta} + K_1 \cdot \Phi_1 + K_2 \cdot \Phi_2, \quad (4.37)$$

де Φ_{δ} – потік в робочому зазорі;

$\Phi_1 = \Phi'_1$ – потоки розсіяння (за умови симетричності), що замикаються на одній контакт-деталі;

$\Phi_2 = \Phi'_2$ – потоки розсіяння, які замикаються крізь повітря;

K_1 і K_2 – коефіцієнти, які враховують втрати вводу і виводу на ділянках контакт-деталей.

4.9.2 Механічна (протидіюча) і тягова характеристики геркона

Магнітні потоки Φ та тягове зусилля F є головними характеристиками, за якими можна оцінити чутливість та розрахувати параметри керування. Тягове зусилля визначається за формулою Максвелла [2, 47]:

$$F_{EM.m.} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S_{\delta}}, \quad (4.38)$$

де S_{δ} – площа поперечного перетину робочого зазору.

Механічне зусилля контакт-деталі визначається, як зусилля консольно-закріпленої балки:

$$F = c \cdot x = c (\delta - \delta_0) \cdot K_{CM}, \quad (4.39)$$

де c – жорсткість контакт-деталі, Н/м;

x – переміщення контакт-деталі або точки прикладення сили, що дорівнює різниці між робочим та технологічним зазорами $\delta - \delta_0$ м;

K_{CM} – коефіцієнт симетричності.

На рис. 4.36 представлені тягова $F_{EM} = f(\delta)$ та механічна $F_M = f(\delta)$ характеристики герконового реле.

Перший етап наближення консольних контакт-деталей відбувається вже при будь-якому малому значенні магнітного потоку (наприклад, Φ_1) і носить характер попереднього їх

наближення. Протягом збільшення напруженості магнітного потоку до $\Phi_{\text{кр}}$ настає другий етап, при якому контакт-деталі стрибкоподібно переміщуються до їх замикання, причому на цьому етапі не потребується подальшого збільшення магнітного потоку в робочому зазорі (через інерцію руху, подальшого зменшення втрат потоку в повітряному зазорі, зміна (викривлення) картини магнітного поля в цілому і т. ін.). Потік $\Phi_{\text{кр}}$ відповідає критичній величині $\delta_{\text{кр}}$ робочого зазору і для наближених розрахунків для симетричних герконів можна прийняти

$$\delta_{\text{кр}} = \frac{1}{2} \delta_{\text{р}} , \quad (4.40)$$

де $\delta_{\text{р}}$ – робочий зазор.

4.9.3 Засоби керування реле на геконах

Розглянемо декілька засобів керування геконовими реле, такими як:

- лінійне або кутове переміщення геркона або постійного магніту (рис. 4.37, а),
- зміна параметрів магнітного кола екранами (шторками) із прорізами (вікнами), які дозволяють отримувати спрацьовування геркона при поєднанні прорізу з постійним магнітом, а для більшої жорсткості тонкостінна шторка виконується двошаровою, причому другий шар – з немагнітного матеріалу (рис. 4.37, б);
- зміна намагнічувальної сили за допомогою обмоток керування (рис. 4.37, в, 4.38 і 4.39).

При наявності однієї обмотки в колі керування (рис. 4.38, а) вона розвиває достатньо велику силу $F_{\text{роб}}$, яка забезпечує надійне спрацьовування геркона, і утримує його контакти в замкненому стані за умови всіх, заздалегідь обумовлених умовах експлуатації.

За наявності двох обмоток керування (рис. 4.38, б), які мають зсув відносно робочого зазору, можна реалізувати логічну функцію «АБО» (якщо МРС обмоток $F_1 = F_2 \geq F_{\text{спр}}$), чи функцію «І» (якщо $F_1, F_2 < F_{\text{спр}}$) при цьому спрацьовування буде лише за умови

$F_1 + F_2 \geq F_{спр}$. Таке розташування не дозволяє задавати значний коефіцієнт запасу по спрацьовуванню – $K_{зан}$.

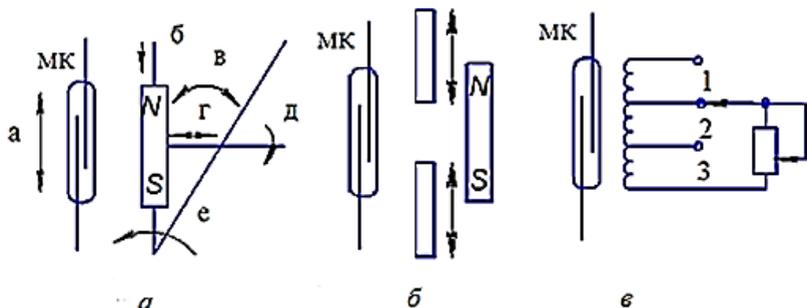


Рисунок 4.37 – Засоби та схеми керування герконовими реле [51]

Дійсно, якщо робоча сила $F_{роб}$ є МРС двох обмоток, тоді $F_{роб} = F_1 - F_2 = F_{спр} \cdot K_{зан}$, а загальний коефіцієнт запасу по спрацьовуванню має бути $K_{зан} < 2$. Одну з обмоток можна використовувати як поляризуючу (підмагнічувальну) для прискорення спрацьовування геркона, в такому випадку $\Phi_n < \Phi_{відп}$, що забезпечуватиме відпускання геркона за умови змінання сигналу з основної керуючої обмотки. Для реалізації функції «НІ» обмотки включаються зустрічно.

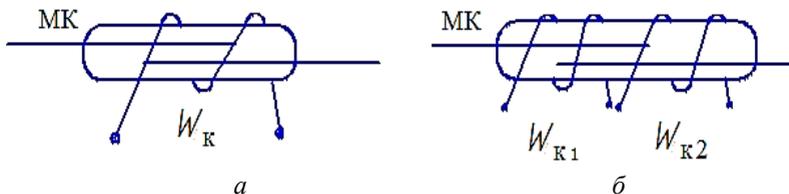


Рисунок 4.38 – Система керування реле на герконах за допомогою обмотки [51]

Для реалізації різних логічних функцій геркони з декількома контакт-деталлями мають декілька обмоток (рис. 4.39). Основна обмотка W_{K1} утримує геркон у включеному стані, а обмотки W_{K2} , W_{K3} , W_{K4} , W_{K5} є вмикаючими і дозволяють вільній контакт-деталі 1 займати одне з положень між бічними контакт-деталлями (2-3 та

4-5). Наприклад, аби забезпечити ланцюг «2-1-4», необхідно забезпечити співпадіння за напрямом магнітних потоків, що протікають крізь них.

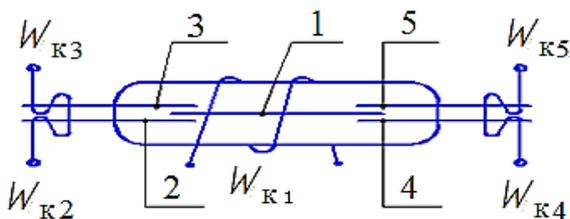


Рисунок 4.39 – Схема принципова реле на герконах. Система керування [51]

4.9.4 Фериди

Для різноманітних систем автоматики та для забезпечення швидкодії були розроблені електромеханічні магнітокеровані контактні пристрої, що запам'ятовують, або фериди – електричні апарати, що складаються з геркона і магнітопроводу з елементом магнітної пам'яті (ЕМП). ЕМП виконується із середньо коерцитивних ($H_C = 2...6$ кА/м) металевих феромагнетиків з великим значенням залишкової індукції ($B_r = 1,6...1,8$ Тл) і коефіцієнтом прямокутності петлі гістерезису, що дорівнює $0,85...0,9$ [2, 3, 40, 45, 47]. Фериди застосовуються для реалізації складних схемних рішень та для скорочення тривалості сигналу, що керує, до мікросекундного діапазону, і як наслідок - зменшення потужності керування.

Якщо частина реле, що виконує функцію ЕМП розташована поза балоном МК, то такий пристрій називається феридом із зовнішньою пам'яттю (рис. 4.40, а). Якщо роль магнітної пам'яті виконують контакт-деталі, або їх частини, то ферид називається з внутрішньою пам'яттю (гезакон) (рис. 4.40, б). Таким чином, в гезаконах поєднується в одному контактна система, струмопровід, магнітопровід і електромагнітна пам'ять.

В обох схемах магнітна пам'ять створюється та руйнується за допомогою відповідних імпульсів струму (рис. 4.41).

Для спрацьовування МК на обмотку подається імпульс струму намагнічування $I_{\text{нам}}$, контактні осердя (контакт-деталі) замикаються і далі, після знімання сигналу, залишаються в замкнутому стані завдяки залишковому магнітному потоку ЕМП.

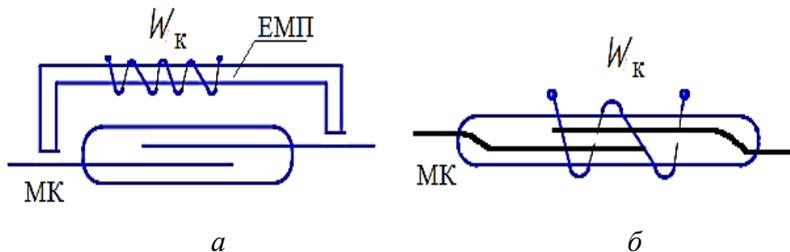


Рисунок 4.40 – Ферид із зовнішньою пам'яттю

Для відпускання МК (перехід в розімкнений стан) на обмотку подається розмагнічувальний імпульс струму $I_{\text{розм}}$ оберненої полярності. Амплітуда і тривалість розмагнічувального імпульсу мають бути строго визначеними, аби не сталося перемагнічування ЕМП в протилежному напрямі і повторного (помилкового) замикання контакт-деталі.

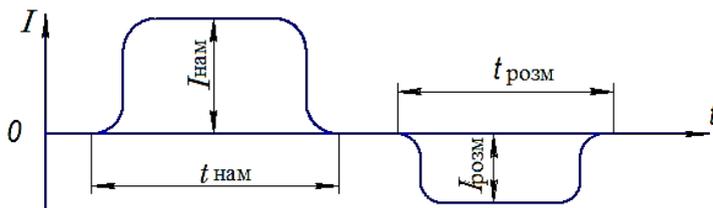


Рисунок 4.41 – Імпульси керування найпростішими феридами [51]

Задля усунування помилкових спрацьовувань (недолік, властивий феридам з однією обмоткою) існують такі способи:

- 1) розмагнічування ЕМП змінним затухаючим магнітним полем;
- 2) взаємним шунтуванням частин ЕМП;
- 3) зустрічним намагніченням частин ЕМП;

4) ортогональним перемагнічуванням ЕМП.

Перший спосіб доволі відомий, тому розглянемо принцип дії другого способу, що конструктивно реалізується паралельними феридами із зовнішнім ЕМП (рис. 4.42). Тут ЕМП складається з двох напівкілець з розміщеними на них обмотками, в які подаються імпульси струму. Керування здійснюється половинними струмами (адитивне керування), тобто кожна з обмоток W_{K1} і W_{K2} розвиває магнітний потік, який дорівнює половині магнітного потоку, що необхідний для замикання контакт-деталей (осердя). При подаванні імпульсів струму включення однакової полярності на керуючі обмотки (рис. 4.42, б) в кожній частині магнітопроводу, розвиваються магнітні потоки, що підсумовуються в контакт-деталі та приводять до їх замикання. При подаванні на обмотки імпульсів струму вимикання різної полярності (рис. 4.42, а), магнітні потоки в контакт-деталі взаємно компенсуються. Осердя намагнічуються протилежними знаками, і контакт-деталі розмикаються.

Всі перелічені фериди мають однакову особливість – при їх керуванні необхідне перемагнічування в протилежних напрямках переважно по повному циклу петлі гистерезиса хоча б одної частини електромагнітної пам'яті. Третій спосіб реалізується послідовним феридом. Четвертий спосіб не отримав широкого розповсюдження [31, 51, 54, 85].

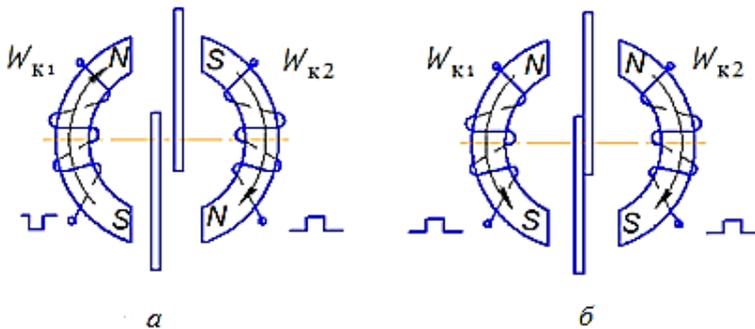


Рисунок 4.42 – Принцип дії паралельного ферида. Шунтування ділянок ЕМП:

а – відключений стан; *б* – включений стан.

4.10 Особливості вибору і тенденції розвитку електромеханічних реле

Різноманіття типів і конструкцій реле ставить питання про техніко-економічну раціональність використання того чи іншого типу реле для реалізації необхідних функціональних задач в конкретних умовах експлуатації [2, 3, 5, 19, 43, 58, 80, 81]. На етапі проектування реле або апаратури, де буде встановлюватися реле, формують загальні вимоги по чутливості, швидкодії, частоті та діапазону комутації і таке інше. Вимоги до надійності можна оцінити формулою:

$$\lambda = \frac{\ln P}{n \cdot N \cdot k}, \quad (4.41)$$

де P – вірогідність безвідмовної роботи;

n – необхідне число реле;

N – необхідне число спрацьовувань;

k – число контактних пар.

Рекомендується передбачати експлуатаційні запаси за допомогою коефіцієнта використання k_e , який по суті є співвідношенням поточного параметра апарата до максимально допустимого його значення відповідно до технічної документації (таблиця 4.1). За конструктивним виконанням перевага має бути за герметичними реле, особливо для умов вологого середовища і зниженої температури експлуатації, для запобігання утворення непровідних плівок на контактах, швидкого старіння ізоляції тощо. Проте, слід зауважити, що все ж таки герметичні реле мають певні недоліки (в умовах вакууму погіршується тепловіддача від струмопровідного контуру, і як наслідок, знижується термін служби котушки, крім того з часом в реле засмоктуються агресивні гази і утворюються шлівки).

На теперішній час розвиток електромеханічних реле на традиційних принципах конструювання наблизився до межі технічних можливостей. Прогнозована оцінка еволюційного розвитку реле на струми до 10 А [51] складає

$$Q = \frac{P_{k_{\max}} \cdot N}{V}, \quad (4.42)$$

де $P_{k_{\max}}$ – максимальна потужність, що комутується, Вт;
 N – число спрацьовувань, кількість;
 V – об'єм реле, см³.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані значення k_u [51]

Параметр	k_g	Параметр	k_g
1. Тривалість безперервного знаходження обмотки під струмом	0.8	5. Комутаційний струм при навантаженні:	0.9
2. Число спрацьовувань	0.7	активному	0.7
3. Напруга, що комутується	1.0	ємнісному	0.5
4. Підвищена температура та вологість	0.8	індуктивному	0.9
		6. Напруга живлення	

Цей показник ще наприкінці минулого століття швидко зростав за рахунок мініатюризації, підвищення чутливості, швидкодії, якості і надійності вузлів. Зараз він може зростати за рахунок розробки спільних або гібридних схем реле з інтегральними мікросхемами, при цьому виникають наступні задачі:

1) перехід на окрему герметизацію контактних систем; очікується, що це дозволить підвищити якість і надійність комутації приблизно в 100 разів, особливо при мікрострумах;

2) реле великої потужності (на струми більше за 10 А) також виготовляти герметичними;

3) розробляти реле з системою керування, як на змінному, так і постійному струмах, без вбудованої системи випрямлення;

4) підвищувати ефективність магнітних систем за рахунок використання поляризованих систем реле, що дозволить зменшити масу та габарити до трьох разів і підвищити чутливість до двох разів у порівнянні з нейтральними системами.

Крім того, задля мініатюризації реле удосконалюють системи із внутрішньокотушковим якорем, застосовують провідники з поліамідною ізоляцією, а також стрічкові та напилені котушки, тощо. Прикладом вдалих розробок можна навести надмініатюрні реле РПК 65 і РЭК 65 в герметичному металоскляному низькопрофільному корпусі типу *centigrad* із розмірами $9,53 \times 9,53 \times 6,99$ мм³ (без врахування довжини виводів). Такі розміри дозволяють використовувати їх в наборах двосторонніх друкарських плат. Проте поки немає даних щодо технічних рішень щодо помітного збільшення швидкодії і частоти спрацьовування електромеханічних реле.

4.11 Контрольні питання та задачі

4.11.1 Реле електромагнітне. Призначення. Основні характеристики. Конструктивні елементи.

4.11.2 Електромеханічні, логічні та вимірювальні реле.

4.11.3 Протидіюча і тягова характеристика реле. Узгодженість цих характеристик. Характеристика відпускання.

4.11.4 Вплив полюсного наконечника на перерозподіл електромагнітної сили.

4.11.5 Відмінність електромагнітного реле змінного струму від постійного. Вібрація якоря.

4.11.6 Поляризовані електромагнітні реле. Робочий цикл.

4.11.7 Індукційне реле. Призначення. Визначення моменту обертання.

4.11.8 Реле струму, напруги, потужності і опору індукційної системи. Методи підвищення чутливості і швидкодії реле.

4.11.9 Магнітоелектричні реле. Конструкції. Визначення моментів обертання та гальмування. Чому ця система не застосовується на змінному струмі?

4.11.10 Електродинамічне реле. Сила та момент обертання на постійному та змінному струмі. Фазочутливість.

Магнітогідродинамічна система, як різновидність електродинамічної.

4.11.11 Феродинамічне реле з обертальним та поступовим рухами. Визначення моменту обертання на постійному та змінному струмі.

4.11.12 Теплові (термо-) реле. Чому не можна розташувати контакти на біметалевій пластині? Компенсація реакції на температуру навколишнього середовища.

4.11.13 Які основні вузли теплових реле?

4.11.14 Як забезпечується миттєве включення та розмикання контактів у теплових реле?

4.11.15 Перелічіть основні недоліки теплових реле.

4.11.16 Як здійснюється захист максимальними реле струму?

4.11.17 Резонансне реле.

4.11.18 Ємнісні реле. Визначення електростатичного моменту.

4.11.19 Електростатичне реле на електретах.

4.11.20 Особливості вибору і тенденція розвитку електродинамічних реле. Прогнозована оцінка розвитку. Побудова спільних схем реле з інтегральними мікросхемами.

4.11.21 Герметизовані магнітокеровані контакти (геркони). Побудова та основні характеристики.

4.11.22 Реле змінного струму на герконах.

4.11.23 Способи керування герконами. Реалізація логічних функцій. Логічні матричні реле.

4.11.24 Фериди з зовнішньою та внутрішньою пам'яттю. Способи, що усувають помилкове спрацювання. Паралельний ферид з диференційним керуванням.

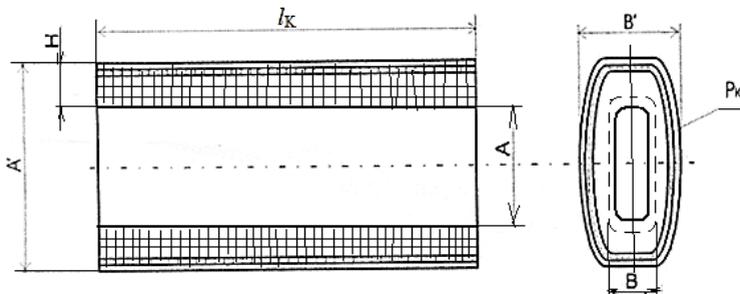
4.11.25 Особливості спільної роботи декількох герконів в одній обмотці керування.

4.10.26 **Задача 1.** Розрахувати тягову характеристику електромагніту клапанного типу реле постійного струму за допомогою енергетичної формули. Вихідні дані для розрахунку: МРС котушки $F_{НОМ} = 280$ А, критична МРС $F_K = 0,65 \cdot F_{НОМ} = 182$ А, повітряний зазор $\delta = 1,1 \cdot 10^{-3}$ м. Криві намагнічування електромагніту взяти з довідкової літератури.

4.10.27 **Задача 2.** Визначити розміри екрануючого витка електромагнітного реле змінного струму при заданих:

квадратному перетині полюса $S = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, температурі нагрівання витка $170 \text{ }^\circ\text{C}$, ширина паза $\Delta = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, коефіцієнт заповнення сталі дорівнює $K_{ЗС} = 0,91$.

4.10.28 **Задача 3.** Розрахувати котушку керування герконового реле (ескіз котушки представлений на рис. 4.43), визначити діаметр проводу, число витків і опору, перевищення температури при найбільш несприятливих умовах роботи та уточнити її габаритні розміри. Вихідні дані для розрахунку: номінальна МРС котушки керування $F_{НОМ}$ дорівнює 250А , номінальна напруга $U_{НОМ} = 24 \text{ В}$, діапазон зміни напруги на котушці від $0,85$ до $1,1 U_{НОМ}$, діапазон робочих температур від $233 \text{ }^\circ\text{К}$ до $328 \text{ }^\circ\text{К}$, режим роботи тривалий.



$$l_k = 48 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A' = 34 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A = 26 \cdot 10^{-3} \text{ м}; B' = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ B = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; H = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; P_k = 80 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Рисунок 4.43 – Ескіз котушки реле на герконах

5 НАПІВПРОВІДНИКОВІ (ТВЕРДОТІЛЬНІ) РЕЛЕ

У всіх електричних колах доводиться вмикати та вимикати прилади та пристрої. Для цього використовують комутаційні апарати, якими може бути як простий вимикач або рубильник, так і реле, контактори тощо.

Твердотільне реле – це пристрій, побудований на напівпровідникових елементах і силових ключах, таких як симістори, біполярні транзистори або транзистори МОП. В англомовних джерелах твердотільні реле називають SSR від Solid State Relay. Як і в електромагнітних реле та інших комутаційних приладах, вони призначені для керування навантаженням з більшою напругою або струмом за допомогою малого сигналу.

На відміну від електромагнітних реле у твердотільних немає котушки керування та немає рухомої контактної групи. Що всередині твердотільного реле ви можете бачити нижче (рис. 5.1). У ньому, як було сказано вище, замість силових контактів використовуються напівпровідникові ключі: транзистори, симістори, тиристори та інші залежно від сфери застосування (права частина фотографії).

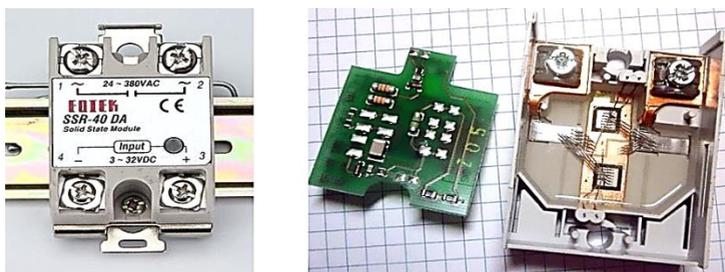


Рисунок 5.1 – Конструкція твердотільного реле [85, 91, 94]

Це є головною відмінністю напівпровідникового реле від електромагнітного. У зв'язку з цим у твердотільного значно більший термін служби, оскільки немає механічного зносу контактної групи, також варто зазначити, що і швидкодія напівпровідникових реле вища, ніж у електромагнітних. Крім відсутності механічного зношування немає і іскор або дуги при

комутації, як і звуків від ударів контактів при перемиканні. Через це твердотільні реле можуть працювати у вибухонебезпечних приміщеннях.

Переваги твердотільних реле в порівнянні з електромагнітними є такими:

- безшумність;
- їхнє напрацювання на відмову близько 10 мільярдів перемикань, що в 1000 і більше разів перевищує ресурс електромагнітних реле, але якщо для електромагнітних реле імпульсні перенапруги практично не страшні, то електронна схема напівпровідникового реле в більшості випадків виходить з ладу (якщо не було прийнято схемотехнічних рішень щодо обмеження цих імпульсів), і тому порівнювати ці пристрої за кількістю перемикань не завжди є коректним;
- швидкодія напівпровідникових реле становить частки та одиниці мілісекунд, тоді як у електромагнітного від 50 мс до 1 с;
- енергоспоживання на 95% нижче, ніж споживання котушки електромагнітних аналогів.

Однак ці плюси прикривається низкою недоліків:

- напівпровідникові реле гріються під час роботи. У тепло виділяється потужність, що дорівнює множенню падіння напруги на силовому ключі (порядку 2 В) на силу струму, який через нього протікає;
- при перевантаженні та коротких замиканнях є висока ймовірність виходу з ладу силового ключа, тому що перевантажувальна здатність зазвичай становить $10I_n$ протягом 10 мс – одного періоду в мережі з частотою 50 Гц (може відрізнятись залежно від компонентів, що використовуються);
- автоматичний вимикач, швидше за все, не встигне спрацювати, перш ніж реле вийде з ладу при КЗ;
- при імпульсних перенапругах (стрибки напруги) – термін служби твердотільного реле може закінчитись миттєво;
- у твердотільних реле є струм витоку (до 7...10 мА) у зв'язку з цим, якщо вони встановлені у коло керування, наприклад, світлодіодних світильників – останні блимають аналогічно ситуації з вимикачем з підсвічуванням, а відповідно, на фазному проводі буде напруга навіть коли реле відключено!

У наступній таблиці 5.1 наведено загальні характеристики твердотільних реле серій TSR (трьохфазних) та SSR (однофазних) від виробника «ФОТЕК» (до речі одні з найпоширеніших). В принципі, у інших виробників характеристики продукції будуть схожими або такими ж.

Таблиця 5.1 – Характеристики твердотільних реле «ФОТЕК» [91, 94]

Опір ізоляції	>50 МОм/500В DC
Електрична міцність ізоляції вхід/вихід	Витримує 2,5 кВ АС протягом 1 хвилини
Струм спрацьовування	Не більше 7.5 мА
Перевантажувальна здатність	До 10 номінальних струмів протягом 10 мс
Метод комутації	При переході через нуль (у моделях для змінного струму) або миттєво через оптрон (для постійного струму)
Вбудований захист	У серії SSR-F є змінний запобіжник

Види твердотільних реле можна класифікувати:

- за родом струму (постійний чи змінний);
- за силою струму (малопотужні, силові);
- за способом монтажу;
- за напругою;
- за кількістю фаз;
- за типом керуючого сигналу (постійним або змінним струмом, аналоговий вхід для керування змінним резистором, в коло 4...20 мА і т.ін.);
- за типом перемикання – комутація при переході напруги через нуль (у ланцюгах змінного струму), або комутація за сигналом керування (для регулювання потужності, наприклад).

Отже, за кількістю фаз бувають одно-і трифазні реле. А ось типів сигналів, що керують набагато більше. Залежно від внутрішнього пристрою твердотільні реле можуть бути керованими як постійною, так і змінною напругою. Найбільш поширені твердотільні реле, які керуються постійною напругою в діапазоні від 3 В до 32 В. При цьому значення керованої напруги повинно знаходитися в цьому діапазоні, а не бути рівною якомусь

конкретному значенню для нього, що дуже зручно при інтеграції в системи з різною напругою.

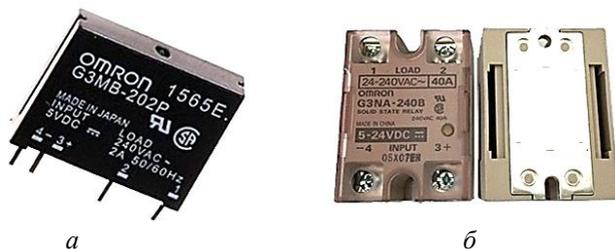


Рисунок 5.2 – Конструкція твердотільного реле для монтажу на друкованій платі (а) та для монтажу на радіатор (б) [91, 94]

Також існують напівпровідникові реле, для керування якими використовується аналоговий сигнал:

- 4...20 мА;
- 0...10 В постійного струму;
- змінним резистором 470...560 кОм.

При цьому такими реле можна регулювати потужність на підключеному пристрої за принципом фазового керування. Такий самий принцип регулювання використовується в побутовому обладнанні для освітлення. У таблиці 5.2 нижче наведено види сигналів керування твердотільних реле із фазовим методом керування від компанії IMPULS. Зверніть увагу на останні літери маркування (LA, VD, VA), у більшості виробників вони однакові, і говорять саме про тип сигналу.

Як було зазначено, у реле з фазним керуванням, залежно від величини керуючого сигналу змінюється напруга на виході, що відображено на графіках нижче (рис. 5.3). Розпізнати таке реле можна за умовним зображенням біля входних клем, наприклад, на фото нижче видно, що до входу підключається змінний резистор 470-560 кОм (рис. 5.4, а). Також є твердотільні реле з сигналом керування від мережі змінного струму 220 В, як також зображено нижче (рис. 5.4, б). Вони підходять для використання як заміна малопотужних контакторів або електромагнітних реле.

Таблиця 5.2 – Види сигналів керування твердотільних реле з фазовим методом керування від компанії IMPULS [58, 91, 94]

Вихідна напруга	Аналоговий сигнал	Номінальний комутуваний струм			
		10 А	25 А	40 А	
380 В АС фазне керування	4...20 мА	GDH1038 LA	GDH2538 LA	GDH4038 LA	
	0...10 В DC	GDH1038 VD	GDH2538 VD	GDH4038 VD	
	470...560 кОМ	GDH1038 VA	GDH2538 VA	GDH4038 VA	
Вихідна напруга	Аналоговий сигнал	Номінальний комутуваний струм			
		60 А	80 А	100 А	120 А
380 В АС фазне керування	4...20 мА	GDH6038 LA	GDH8038 LA	GDH10038 LA	GDH12038 LA
	1...10 В DC	GDH6038 VD	GDH8038 VD	GDH10038 VD	GDH12038 VD
	470...560 кОМ	GDH6038 VA	GDH8038 VA	GDH10038 VA	GDH12038 VA

Для визначення «фазності» реле використовують символи на початку маркування: SSR – однофазні; TTR – трифазні. Що еквівалентно однополюсним та триполюсним комутаційним приладам. Якщо в маркуванні є буква Н – це реле призначене для комутації підвищеної напруги.

У маркуванні дані про тип керування вказані в останніх символах, вони можуть відрізнятися у різних виробників, але найчастіше мають такий вигляд і значення (дані зібрані за різними виробниками):

- VA – змінний резистор 470...560 кОМ/2Вт (фазове керування);
- LA – аналоговий сигнал 4...20 мА (фазове керування);
- VD – аналоговий сигнал 0...10 В DC (фазове керування);
- ZD – керування 10...30 В DC (комутація при переході через нуль);
- ZD3 – керування 3...32 В DC (комутація під час переходу через нуль);
- ZA2 – керування 70...280 В АС (комутація при переході через нуль);

- DD3 – керування сигналом 3...32 В постійного струму колом постійного струму (комутація напруги постійного струму);
- DA – керування сигналом постійного струму, комутація кола змінного струму;
- AA – керування сигналом змінного струму (220 В), комутація кола змінного струму.

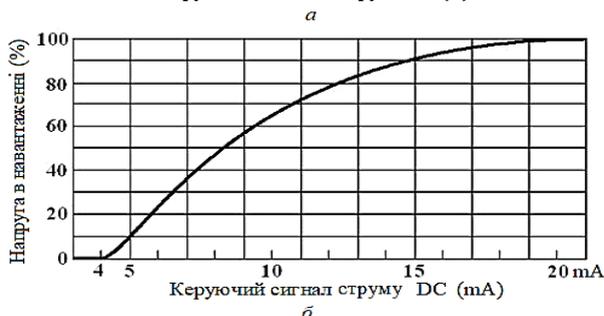
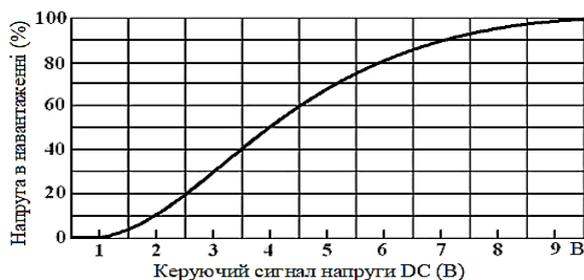


Рисунок 5.3 – Графіки фазного керування реле сигналом напруги DC (а) та сигналом струму DC (б)

Перевіримо це на практиці, припустимо, що ви зіткнулися з таким виробом як на рисунку нижче, і хочете дізнатися, що воно таке є. Якщо уважно вивчити написи біля клем для підключення проводів вже стане ясно, що це реле для керування колами змінного струму від 90 В до 480 В, при цьому керування відбувається змінним струмом з напругою від 80 В до 250 В (рис. 5.5).

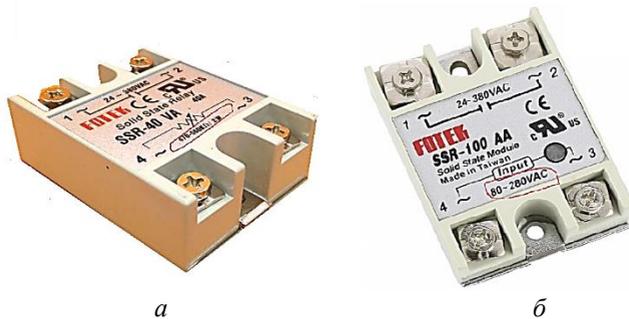


Рисунок 5.4 – Твердотільні реле Fotek [85, 91, 94]:

з підключенням змінного резистора 470-560 кОм (а) та з сигналом керування від мережі змінного струму 220В (б)

Якщо видно тільки таке маркування, то: «SSR» – однофазне; 10 – номінальна сила струму 10 А; «AA» – керування змінним струмом, комутація змінного струму; «H» – для комутації підвищеної напруги в силовому колі – до 480 В (якби H не було, то було б до 380...400 В). Внутрішня схема твердотільного реле залежить від того, на який струм воно розраховане (постійний або змінний) і виду сигналу керування ним. Розглянемо деякі з них.



Рисунок 5.5 – Маркування твердотільних реле [85, 91]

Почнемо з реле, яке керується постійним струмом та комутується при переході через нуль. Іноді їх називають «твердотільне реле Z-типу».

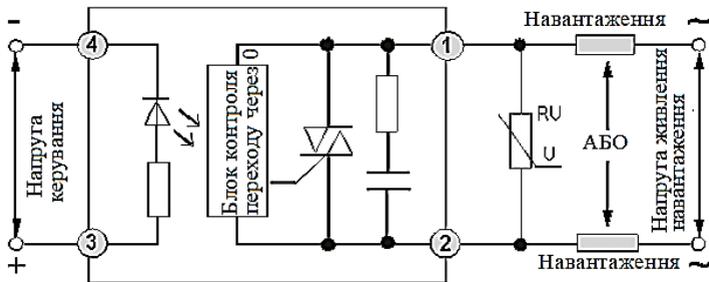


Рисунок 5.6 – Електрична схема твердотільного реле Z-типу [91]

Тут контактні точки 3-4 – це вхід керуючого сигналу, в якому використовується керування за допомогою оптопари, яка служить для гальванічної розв'язки вхідних та вихідних ланцюгів. Блок контролю переходу через 0, або як його називають Zero Cross Circuit, – відстежує фазу напруги в мережі живлення і коли воно переходить через нуль виробляє комутацію ланцюга (включення або відключення).

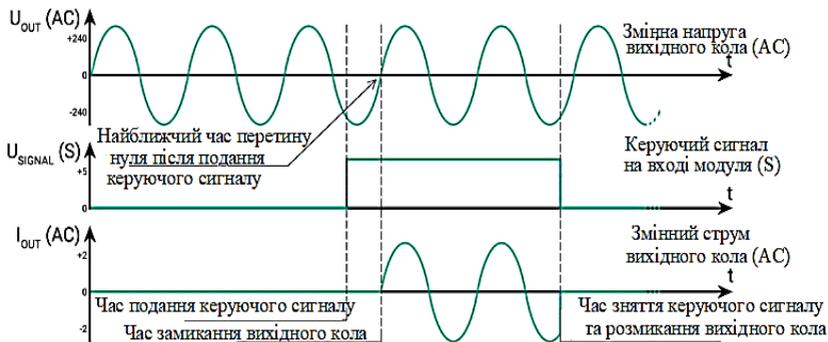


Рисунок 5.7 – Керування Zero Voltage Switch резистивним, ємнісним та індуктивним навантаженнями [85]

Такий спосіб також називають Zero Voltage Switch, він дозволяє знизити кидки струму при включенні (оскільки напруга в цей момент дорівнює нулю) і сплески ЕРС-самоіндукції при відключенні навантаження. Підходить для керування резистивним, ємнісним та індуктивним навантаженням. Не

оптопарі, яка подає сигнал на керуючий електрод драйвера симістора VD3, через Q2. Реле миттєвого включення розроблено дещо інакше, ніж реле з комутацією при переході через нуль. В них відсутній каскад ZCC. При керуванні змінним струмом схема відрізняється лише наявністю на вході випрямляча (діодного моста).

А при комутації кіл постійного струму симістор замінюють транзистором.

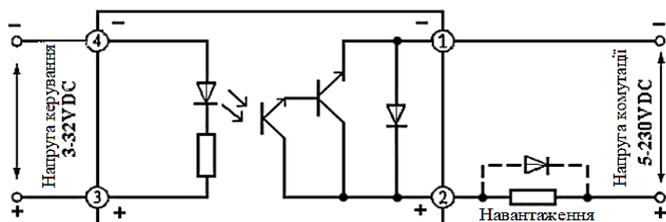


Рисунок 5.10 – Електрична схема реле DC-DC миттєвого включення із транзистором [85]

Також є універсальні реле для постійного та змінного струму, де використовується зборки з транзисторів. Загалом є безліч схем вихідних твердотільних каскадів реле, нижче наведені приклади схемотехніки різних моделей від такого виробника, як International Rectifier [92].

Реле з фазовим методом керування вміє регулювати потужністю навантаження (вихідною напругою), для цього на вхід подають аналоговий сигнал – напругу, струм або підключають змінний опір. Як силовий елемент тут застосовується тиристор. Але через такий спосіб регулювання виникають перешкоди в мережі, для зменшення яких застосовують мережеві фільтри з синфазними дроселями. Насправді схеми підключення твердотільних реле майже нічим не відрізняється від електромагнітних.

Якщо потрібно замінити звичайне реле 220 В з керуванням від змінного струму 220 В необхідно використовувати схему на прикладі LDG LDSSR-10AA-H, тобто підключення через звичайний вимикач або тумблер (рис. 5.12).

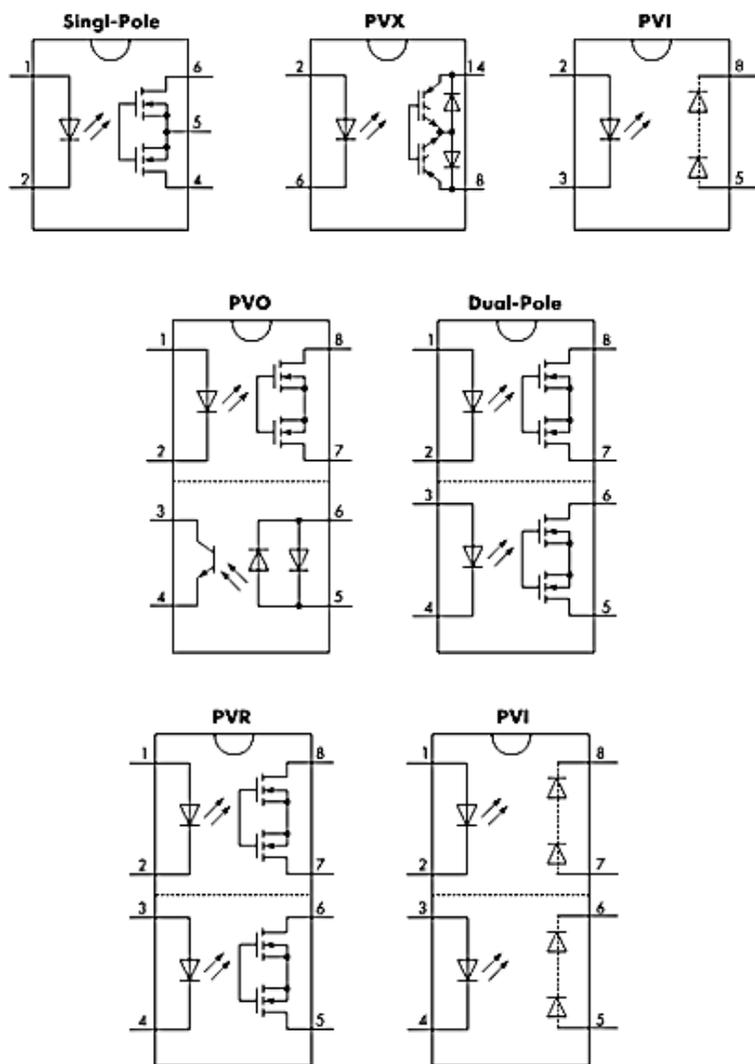


Рисунок 5.11 – Приклади схемних рішень деяких моделей твердотільних реле виробника International Rectifier [91]

Сигнал увімкнення може подаватися від термостата, регулятора та інших пристроїв. Якщо потрібно керувати за

допомогою низьковольтного сигналу колом 220 В, то можна використовувати FOTEK HPR-80AA.

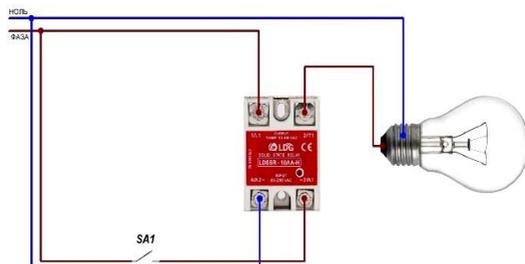


Рисунок 5.12 – Схема підключення твердотільного реле до навантаження [91]

У цій схемі за джерело низької напруги постійного струму використовується блок живлення 12 В DC, які широко поширені як блоки живлення для світлодіодних стрічок.



Рисунок 5.13 – Схема підключення реле FOTEK HPR-80AA до навантаження [91]

Але навіть можна керувати таким твердотільним реле, подавши на вхід напругу від зарядного пристрою мобільного телефону, адже на його виході 5 В, що більше мінімального сигналу в 3 В. Крім того напругу керування потрібно відключати повністю, тому що у кожного реле є певні параметри, при яких воно працює (наприклад, у наведеного вище напруга відключення – порядку 1 В), а спрацювати воно може не при 3 В номінальній

напруги, а вже при 2,5 В (дані наведені усереднені, наприклад, і можуть відрізнятися залежно як від конкретного виробу, але й умов навколишнього середовища і монтажу).

Однак треба зауважити, що використання твердотільного реле для керування потужним навантаженням неможливе без охолодження. Для цього використовують пасивне (простий радіатор) або активне охолодження (радіатор+кулер).



Рисунок 5.14 – Охолодження твердотільного реле [85, 91]

Твердотільні реле можуть використовуватися як заміна електромеханічним у ряді випадків. Найпопулярнішими варіантами в побуті є заміна контактора в електрокотлі, через його гучний хлопок при включенні, відповідно і включення ТЕНів стане безшумним.

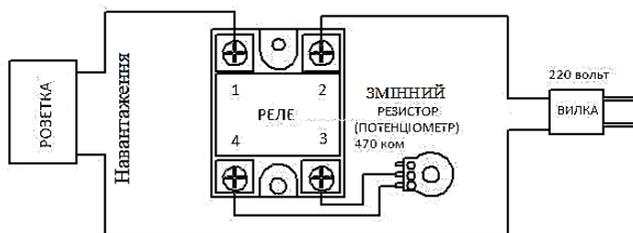


Рисунок 5.15 – Схема пристрою регулятора потужності на основі однофазного твердотільного реле [94]

А також реалізація різних потужних регуляторів потужності для тих самих ТЕНів та іншого обладнання застосовується реле твердотільне з аналоговим входом сигналу від змінного опору (тип

VA). Ці реле краще використовувати у різних засобах автоматизації, до того ж вони не вимагають обслуговування (хіба що чищення радіаторів від пилу), а термін служби можна сказати необмежений. Вони прослужать у рази довше контакторів за умови відсутності перевантажень, перегріву, КЗ та імпульсних перенапруг.

Сфера використання твердотільних реле досить велика. Через високу надійність та відсутність потреби в регулярному обслуговуванні їх часто встановлюють у важкодоступних місцях електрообладнання. Основними ж сферами застосування ТТР є:

- система терморегуляції із застосуванням ТЕНів;
- підтримання стабільної температури у технологічних процесах;
- контроль роботи трансформаторів;
- регулювання освітлення;
- схеми датчиків руху, освітлення, фотодатчиків для вуличного освітлення тощо;
- керування електродвигунами; джерела безперебійного живлення.

Зі збільшенням автоматизації побутової техніки твердотільні реле набувають все більшого поширення, а напівпровідникові технології, що розвиваються, постійно відкривають нові сфери їх застосування https://www.youtube.com/watch?v=gvAGGug_PFM

5.1 Контрольні питання

5.1.1. У чому різниця між твердотільними реле та електромеханічними реле (SSR та EMR)?

5.1.2. Чому вибирають твердотільні реле?

5.1.3. Які переваги та недоліки твердотільних реле?

5.1.4. Які найпоширеніші схеми підключення ТТР?

5.1.5. Що таке нормально-відкрита схема, зі зв'язаним контуром, нормально-закрита, трифазна та реверсивна схеми?

5.1.6 Наведіть приклади практичного застосування твердотільних реле.

6 КОНТАКТОРИ ТА МАГНІТНІ ПУСКАЧІ

6.1. Пристрої контакторів та пускачів, їх відмінності

Контактори та пускачі – це спеціальні електромагнітні пристрої, які широко використовуються в системах керування та захисту електротехнічних пристроїв та об'єктів. За допомогою цих апаратів можна здійснювати дистанційне підключення, зупинення та відключення електричних приводів різного обладнання як промислового типу, так і деякого побутового [74 ,76, 86-90, 92].

Спільним між контактором і пускачем є те, що вони призначені для комутації кіл, як правило, силових. Тому контактори та пускачі часто використовують для запуску двигунів змінного струму, а також для вводу/виводу ступенів опорів, якщо цей пуск є реостатним.

І контактори (як постійного, так і змінного струму), і пускачі крім силових контактів обов'язково мають у своєму складі хоча б одну (а найчастіше – далеко не одну) пару контактів для кола керування: нормально замкнену (NC) або нормально розімкнену (NO). За цією ознакою контактори та пускачі схожі. А чим вони все ж таки, відрізняються? Відповідно до номенклатури багатьма торговими організаціями електромагнітні пускачі називаються «малогабаритними контакторами змінного струму». То, можливо, відповідь на питання у компактності пускача? Триполюсний контактор змінного струму на 160 А досить важкий, а пускач – більш легкий апарат, ще й більш компактний. До того ж, треба зазначити, що так звані «слаботочні» контактори, наприклад, на 10 А, просто не випускають. Тому для комутації кіл на невеликі струми доводиться використовувати виключно пускачі, які відрізняються зовсім невеликими розмірами. Отож, *габарити пристроїв* – це справді важлива *відмінність між контакторами та пускачами* (див. рис. 6.1 та 6.2).

Задля ілюстрації цього твердження розглянемо контактор змінного струму КТ- 6023 160А 220 В 3NO+3NC виробництва EKF PROxima [86] (рис. 6.1), який призначений для ефективної роботи у важких умовах, а саме:

- підйомні механізми – гальмування протифазою;

- ескалатори;
- вуличне освітлення;
- керування електроприводами.

Контактор має такі технічні параметри:

- номінальна робоча потужність – 48 кВт;
- номінальна потужність комутації при АС-3, 400 В – 66 кВт;
- кількість нормально розімкнених (NO) силових контактів – 3;
- кількість допоміжних нормально розімкнених (NO) контактів 3;
- кількість допоміжних нормально замкнених (NC) контактів 3;
- номінальний робочий струм I_e при АС-3, 400 В – 160 А;
- номінальний робочий струм I_e при АС-1, 400 В – 500 А;
- номінальна напруга живлення кола керування U_s при АС 50 Гц – 195,5...253 В;
- тип напруги керування – АС (змінний);
- номінальний робочий струм I_e при АС-4, 400 В – 59 А;
- номінальна потужність комутації при АС-4, 400 В – 25 кВт;
- маса – 12 кг.

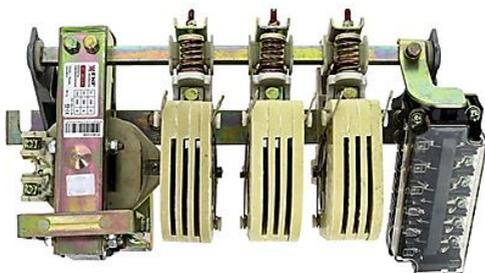


Рисунок 6.1 – Електромагнітний контактор КТ-6023 (IP 00) [86]

Ще одним прикладом для порівняння з пускачами може бути контактор постійного струму МК4-10 УЗ (рис. 6.2) (МК – серія контакторів; 4 – це показник габариту та номінального струму

160 А; 1 – кількість замикаючих контактів; 0 – кількість контактів, що розмикають) має такі характеристики:

- значення номінального струму 160А;
- номінальна робоча напруга DC до 1000В, AC до 380В;
- напруга котушки: 24, 75, 110, 220В;
- ступінь захисту ГОСТ14255-80 IP00;
- габаритні розміри, мм 158x197x176;
- потужність до Вт 45;
- маса 3,9 кг.

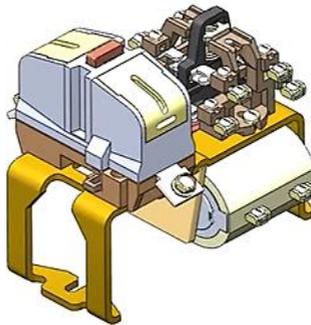


Рисунок 6.2 – Електромагнітний контактор постійного струму серії МК 4-10 (IP 00) [78]

Як видно з конструкції такий апарат не може бути застосований для експлуатації при:

- високому вмісту струмопровідного пилу;
- наявності у середовищі агресивних газів і пари у високих концентраціях;
- ризику влучення бризок або олії на пристрій;
- високій небезпеці вибуху або пожежі.

Друга відмінність полягає у конструкції цих апаратів. Будь-який контактор має у своєму складі потужні пари силових контактів, оснащені дугогасними камерами. Власного корпусу контактор не має і монтується в спеціальних приміщеннях, що закриваються на ключ, щоб уникнути доступу сторонніх осіб та впливу атмосферних опадів. А ось силові контакти пускача завжди вкриті пластиковим корпусом, отож громіздких дугогасних камер вони не мають. Це призводить до того, що у складі потужних кіл з

частими комутаціями пускачі не монтують через те, що контакти їх є менш захищеними від електричної дуги, яка часто виникає при комутації на відміну від контакторів змінного струму.

На відміну від контакторів, пускач має більш високий рівень захисту (ІР), особливо, якщо він обладнаний додатковим металевим кожухом. Тоді пускач можна встановлювати навіть на відкритому просторі, чого ніколи не можна зробити з контактором (рис. 6.3).

Третя відмінність між контактором змінного струму і пускачем – це їх *призначення (застосування)*. Хоча пускачі часто застосовують для подачі електроживлення на обігрівачі, електромагнітні котушки, різні потужні світильники та інші електроприймачі, але ж основне їхнє призначення – запуск асинхронних двигунів трифазного змінного струму. Тому будь-який пускач має три пари силових контактів, а його контакти керування призначені для утримання пускача у включеному стані та для організації складних кіл керування, що передбачають, наприклад, реверсивний пуск.

Розглянемо як приклад електромагнітні пускачі серії ПМЛ, що призначені для застосування в якості комплектуючих виробів у схемах керування електроприводами, головним чином для застосування в стаціонарних умовах експлуатації, для дистанційного пуску безпосереднім підключенням до мережі, зупинки та реверсування трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором та інших струмоприймачів 660 В змінного струму частоти 50 і 60 Гц. Пускачі комплектуються тепловими реле серії РТЛ ТУ3425-041-05758109-2008. Контактори також можуть застосовуватися спільно з реле серії РТЛ, забезпечуючи захист керованих електродвигунів від перевантажень неприпустимої тривалості і струмів, що виникають при обриві однієї з фаз. Для збільшення кількості допоміжних контактів призначені приставки ПКЛ, ПКБ. Приставки ПВЛ забезпечують затримку замикання та розмикання контактів допоміжного кола на час до 180 с.



Рисунок 6.3 – Електромагнітні пускачі серії ПМЛ [71, 83, 86]

Електромагнітні пускачі ПМЛ 1100, ПМЛ 2100, ПМЛ 3100, ПМЛ 4100 (магнітні пускачі ПМЛ, контактори ПМЛ) призначені для пуску та зупинки асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Застосовуються в конвеєрах, верстатах, компресорах, насосах, ліфтах, ескаляторах, теплових гарматах, системах керування опаленням, вентиляцією та кондиціонуванням тощо, системах автоматичного вводу резерву, а також для комутації освітлювальних мереж. За наявності теплового реле, пускач здійснює захист керованого електродвигуна від перевантажень і струмів, що виникають при обриві однієї з фаз. Принцип їх дії полягає в тому, що при подачі номінальної напруги на котушку вона втягує осердя і цим замикає групу силових і допоміжних контактів. При спаданні напруги нижче за пороговий рівень на відпускання, контакти розмикаються.

Ступінь захисту пускачів може сягати в залежності від корпусу, в якому вони знаходяться, IP – 54. Також їх конструкція дозволяє монтаж на DIN-рейках або монтажних платах. Габарити є значно меншими, наприклад $80 \times 70 \times 45 \text{ мм}^3$, а вага – не перевищує одного кілограма.

У той же час контактор призначений для комутації будь-якого силового кола змінного струму. Тому і кількість полюсів, тобто

пар силових контактів, у контактора буває різною – від двох до чотирьох.

Ось за цими трьома відмінностями силові електромагнітні комутаційні пристрої змінного струму були підрозділені на контактори і пускачі.

6.2 Електромагнітні контактори

Контактор – це електромеханічний апарат, призначений для комутації силових електричних кіл як при номінальних струмах, так і при струмах перевантаження. Він має два комутаційних положення, що відповідають включеному та відключеному стану. Повернення контактора у відключений стан (самоповернення) відбувається при відключенні струму через котушку вмикання під дією повертальної пружини, маси рухомої системи або при спільній дії цих факторів. Найбільшого поширення набули контактори, в яких замикання і розмикання контактів здійснюється під впливом електромагнітного приводу (актуатора). Вони мають головні контакти, забезпечені системою дугогасіння, електромагнітний привод і допоміжні контакти (блок-контакти).

Контактори можуть відрізнятися в залежності від способу, яким забезпечується сила для вмикання головних контактів. В електромагнітних контакторах сила для вмикання головних контактів забезпечується електромагнітом. В пневматичних та електропневматичних контакторах сила для вмикання головних контактів забезпечується пневматичним приводом (зазвичай – це поршневий привід). За родом струму головного кола їх поділяють на контактори постійного та змінного струму [47, 51, 53].

Електрична схема електромагнітного контактора з приєднаним до котушки електромагніту зовнішнім колом керування зображена на рис. 6.4, а. Керування котушкою електромагніту (приєднання до джерела живлення та від'єднання від нього) здійснюється за допомогою вимикача керування SA.

Якщо керування котушкою здійснюється електронними засобами, наприклад симістором у колах змінного струму (рис. 6.4, б), або транзистором у колах постійного струму, то такий контактор називають електронно керованим [28].

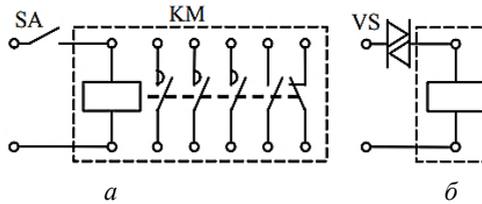


Рисунок 6.4 – Електромагнітний контактор [28]:

а – схема з електромеханічним керуванням;
б – схема керування за допомогою симістора.

Система контактів у даному випадку складається з трьох головних нормально розімкнених контактів, а також двох допоміжних контактів: одного нормально розімкненого та одного нормально замкненого. Різниця між пневматичним (рис. 6.5, *а*) та електропневматичним (рис. 6.5, *б*) контакторами, позначеними на схемах літерами КР, полягає у тому, що у першому випадку керування контактором здійснюється за допомогою пневматичного вентиля, до якого підводиться стиснене повітря з тиском P і який приводиться у дію м'язовою енергією оператора, а у другому випадку керування контактором здійснюється за допомогою електромагнітного клапана Y_P , який складається з пневматичного вентиля та приводного електромагніту, котушка якого підключається до джерела живлення через контакт вимикача керування SA . Керування котушкою електромагнітного клапана може також здійснюватися напівпровідниковим ключем (електронне керування).

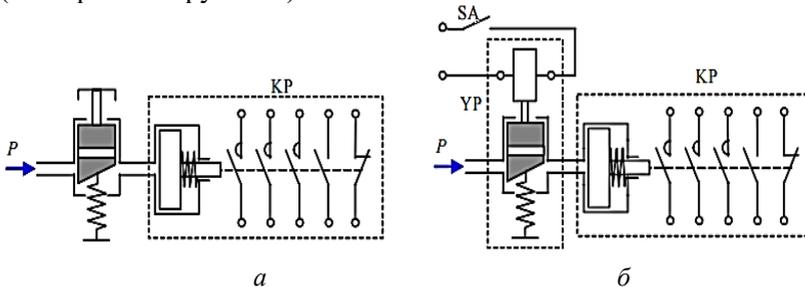


Рисунок 6.5 – Електромеханічні схеми пневматичного (*а*) та електропневматичного (*б*) контакторів [28]

Оскільки основним призначенням контакторів є керування (вмикання та вимикання) обладнанням – електродвигунами, освітлювальними системами, промисловими електричними печами тощо, то на відміну від вимикачів контактори мають здійснювати комутації з досить великою частотою (до 1200 циклів на годину). Відтак ці апарати повинні мати високу механічну та електричну зносостійкість.

Під *механічною зносостійкістю* мається на увазі число циклів включення-відключення (без струмового навантаження, тобто $I_{\text{ном.гол. кола}} = 0$) за відсутності будь-якої заміни його елементів та вузлів. У сучасних контакторах механічна зносостійкість досягає 10...20 млн. операцій [7, 51].

Комутаційна (електрична) зносостійкість визначається зношеністю контактів під дією електричної дуги при комутації кола зі струмом і характеризується таким числом операцій включення-відключення, після якого необхідна заміна контактів (зазвичай після 3...5 млн. спрацьовувань). Але в кращих контакторах комутаційна зносостійкість мало відрізняється від механічної.

Власний час включення – це час від моменту подачі напруги на електромагнітний привод до моменту початку торкання якоря електромагніту. *Власний час відключення* – це час від моменту знеструмлення електромагніту до моменту розмикання контактів.

Струми перевантаження для контакторів не перевищують межі (8...20) - кратних перевантажень по відношенню до номінального струму. Для режиму пуску асинхронних електродвигунів з фазним ротором характерні (2,5...4) - кратні струми перевантаження. Пускові струми асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором досягають меж (6...10) - кратних навантажень. Двигуни постійного струму допускають 2,5-кратне навантаження порівняно з номінальним струмом. Електромагнітний привод контакторів (актуатор) за умови відповідного вибору параметрів може здійснювати функції захисту електрообладнання від зниження напруги. Якщо електромагнітна сила, що розвивається приводом, через зниження напруги в мережі виявиться недостатньою для утримання апарату

у включеному стані, він мимоволі відключиться і здійснить, таким чином, захист від зниження напруги.

Номинальні кількісні характеристики (номинальні значення) виробник зазвичай призначає окремо для головних кіл та для кіл керування контактора. Основними кількісними характеристиками головних кіл є номинальна робоча напруга U_e , номинальний робочий струм I_e та номинальна частота, які мають відповідати певному номинальному режиму роботи та категорії застосування. Номинальними параметрами кіл керування електромагнітних контакторів є номинальна напруга кола керування U_c , тобто напруга, що виникає на контакті у колі керування, та номинальна напруга живлення у колі керування U_s – це напруга, що подається на вхідні термінали кола керування апарата (рис. 6.6).

Електромагнітні контактори мають задовільно вмикатися при напрузі, що лежить у межах від 85% до 110% від U_s . При цьому котушка має бути нагрітою до усталеного стану при напрузі 100% від U_s та при температурі навколишнього середовища, яка вказується виробником, але не нижче $+40^{\circ}\text{C}$.

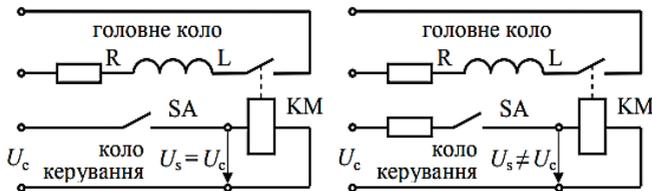


Рисунок 6.6 – Номинальні напруги кола керування U_c та живлення у колі керування U_s [28]

Електромагнітні контактори мають задовільно вимикатися при напрузі, що лежить у межах від 75% до 20% (AC) та 10% (DC) від U_s . При цьому котушка повинна мати температуру навколишнього повітря, яке становить -5°C .

Для кращого використання апаратів у реальних умовах роботи при заданих умовах експлуатації введено поняття «категорія застосування», яке регламентується відповідним стандартом. Конструкції електромеханічних контакторів мають враховувати категорії їх застосування, які визначені у стандарті

IEC 60947-4-1 та ГОСТ Р 50030.4.1-2012 (МЭК 60947-4-1-2009) «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контактторы и пускатели», який поширюється на контактори змінного та постійного струму та пускачі змінного струму, головні контакти яких призначені для комутації кіл з номінальною напругою не більше 1000 В змінного або 1500 В постійного струму. Варто зазначити, що у контактних системах контакторів, призначених для керування електродвигунами (категорії АС-3 та АС-4) мають бути передбачені способи боротьби з деренчанням, адже це явище при великих пускових струмах може спричинити приварювання контактів (таблиця 6.1).

Розглянемо приклад застосування контакторів, зокрема для включення та відключення двигуна за нормальних умов, а також для відключення двигуна при спрацьовуванні теплового реле внаслідок дії струму перевантаження.

Крім того, що контактор повинен проводити номінальний струм двигуна, що відповідає категорії застосування АС-3, може виконати набагато більше комутаційних циклів порівняно з автоматичним вимикачем. Як правило, комутаційна зносостійкість контактора більша за комутаційну зносостійкість автоматичного вимикача. Комутаційну зносостійкість контактора можна визначити за допомогою графіків, що надаються виробником та дійсних для зазначених умов застосування. Так, наприклад, для контактора АF65 (рис. 6.7), який комутуватиме трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, зі струмом, що відключається I_c , і дорівнює 55 А при напрузі 400 В змінного струму, число комутаційних циклів, що виконуються протягом усього терміну служби складає близько 1,8 млн. можна визначити за графіком, представленим на рис. 6.8. Найчастіше для комутації трифазних асинхронних двигунів застосовуються триполюсні контактори серії «АF» виробництва АВВ типорозмірів від АF09 до АF1650. Дані триполюсні апарати мають котушку змінного/постійного струму та вбудований перетворювач, що дозволяє подавати на електромагніт напругу в широкому діапазоні. Отож на рис. 6.8 наведено графіки комутаційної зносостійкості зазначених контакторів.

Таблиця 6.1 – Категорії застосування контакторів [28, 45]

Рід струму	Категорія застосування	Типові використання
З М І Н Н И Й	АС-1	Неіндуктивні або малоіндуктивні навантаги, резистивні печі
	АС-2	Двигуни з фазним ротором: пуск, вимикання
	АС-3	Двигуни з короткозамкненим ротором: пуск, вимикання під час обертання
	АС-4	Двигуни з короткозамкненим ротором: пуск, гальмування противмиканням, поштовховий режим
	АС-5а	Комутації газорозрядних ламп
	АС-5b	Комутації ламп розжарювання
	АС-6а	Комутації трансформаторів
	АС-6b	Комутації конденсаторних батарей
	АС-7а	Малоіндуктивні навантаги побутового та аналогічного призначення
	АС-7b	Двигунові навантаги побутового призначення
	АС-8а	Керування герметичними двигунами компресорів з ручним зведенням розчіплювачів перевантаження
АС-8b	Керування герметичними двигунами компресорів з автоматичним зведенням розчіплювачів перевантаження	
П О С Т І Й Н И Й	DC-1	Неіндуктивні або малоіндуктивні навантаги, резистивні печі
	DC-3	Двигуни паралельного збудження: пуск, гальмування противмиканням, поштовховий режим. Динамічне гальмування двигунів постійного струму
	DC-5	Двигуни послідовного збудження: пуск, гальмування противмиканням, поштовховий режим. Динамічне гальмування двигунів постійного струму
	DC-6	Комутації ламп розжарювання

6.3 Конструкція та принцип роботи контактора постійного струму

Залежно від типу конструкції якоря та особливостей його руху контактори поділяються на поворотного типу (див. рис. 6.1 та 6.2) та прямоходові (рис. 6.7). Принцип роботи електромеханізмів поворотного типу схожий на функціонування клапанного реле. Пристрої прямоходового типу відрізняються Ш-подібною формою магнітопроводу. Через те, що контактори змінного струму створені спеціально для включення асинхронних трифазних двигунів, тому найчастіше є триполюсними.

Особливості конструкції однополюсного контактора постійного струму і принцип його роботи можна розглянути на прикладі контактору КПВ-600 (рис. 6.8) [51, 86].

На рис. 6.8 зображено конструктивну схему електромагнітного контактора постійного струму. У початковий час контакти кнопки SBI «Пуск» є розімкненими, котушка, електромагніту 22, що включає, є знеструмленою, тому що на її виводи 18 не подано постійну напругу $U_{\text{кола керування}}$. Якір електромагніту 11 під дією повертальної пружини 15, яка створює силу $F_{ВП}$, знаходиться в притиснутому стані до упору (демпферу) 12. Робочий зазор δ у цьому положенні є максимальним. Головні контакти 2 і 5 є розімкненими, також є розімкненими блок-контакти 16 в колі керування електромагнітом.

При короткочасному натисканні на кнопку SBI «Пуск» напруга $U_{\text{кола керування}} (U_K)$ подається на виводи 18 котушки електромагніту, що включає, і потому по витках котушки протікає струм. Потік Φ , створений магніторухомою силою котушки 22, розвиває тягову силу і притягує якір 11 електромагніту (вісь обертання O) до осердя з полюсним наконечником 21 (робочий зазор δ є мінімальний).

При цьому долається сила протидії $F_{ВП}$ повертальної пружини 15 і сила $F_{КП}$ контактної (притираючої) пружини 9. Полосний наконечник 21, діаметр якого більше за діаметр осердя $d_{\text{осердя}}$, призначений для збільшення магнітної провідності робочого зазору електромагніту, а також видозміни тягової характеристики

електромагніту (залежності електромагнітної сили від величини повітряного зазору). Для усунення «залипання» якоря 11 у відклученому стані електромагніту, викликаного залишковою намагніченістю магнітопроводу 20, використовується немагнітна прокладка 23.

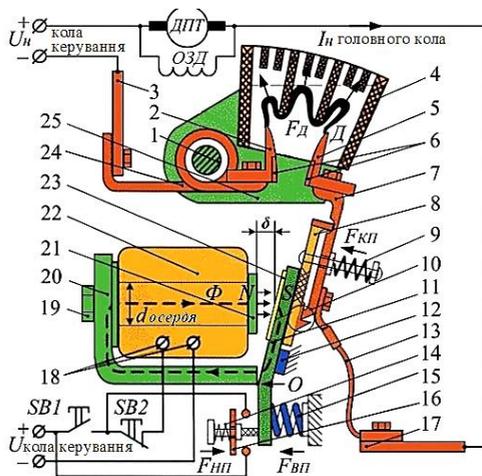


Рисунок 6.8 – Схема електромагнітного контактора постійного струму:

- 1 – осердя дугогасної котушки; 2 – нерухомий головний контакт;
 - 3 - струмопровідна шина; 4 – дугогасна камера; 5 – рухомий головний контакт;
 - 6 – пластини (накладки); 7 – контактоутримувач; 8 – ізолююча пластина;
 - 9 – контактна (притираюча) пружина ($F_{кп}$); 10 – опорна точка контактоутримувача 7 (призма обертання); 11 – якір електромагніту;
 - 12 – упор (буфер); 13 – гнучке з'єднання; 14 – пружина натискання ($F_{нп}$);
 - 15 – повертальна пружина ($F_{вп}$); 16 – блок-контакти; 17 – струмопровідна шина;
 - 18 – виводи котушки, що вмикає; 19 – болт кріплення сердечника електромагніту; 20 – магнітопровід електромагніту (скоба, ярмо);
 - 21 – полюсний наконечник електромагніту; 22 – котушка, що вмикає;
 - 23 – немагнітна прокладка; 24 – дугогасна котушка (котушка струму);
 - 25 – пластина-полюс (2 шт.) для підведення магнітного поля до зони горіння дуги;
- $SB1$ – кнопка увімкнення контактора «Пуск» (без фіксації);
 $SB2$ – кнопка вимкнення контактора «Стоп» (без фіксації);
 O – вісь обертання якоря; δ – робочий зазор електромагніту (мм);
 D – стовп електричної дуги; $ДПТ$ – двигун постійного струму (RH);
 $ОЗД$ – обмотка збудження двигуна.

Після спрацьовування електромагніту кнопку *SBI* «Пуск» можна відпустити, оскільки вона виявиться замкненою накоротко (зашунтованою) блок-контактами (допоміжними контактами) 16, які є притиснутими силою F_{HP} пружини натискання 14. Електромагніт контактора «залишається на саможивленні». Торкання головних контактів 2 і 5 один до одного, і поява струму $I_{\text{ном.гол.кола}}$ при включенні контактора відбудеться раніше, ніж якір електромагніту 11 повністю притягнеться до полюсного наконечника 21. Під час подальшого руху якоря 11 рухомий контакт 5 буде нібито «провалюватися», упираючись своєю верхньою частиною в нерухомий контакт 2. Він повернеться на деякий кут навколо опорної точки (призми обертання) 10 і сприятиме додатковому стисненню контактної (притиральної) пружини 9. З'явиться *провал контакту*, під яким мається на увазі величина зміщення рухомого контакту на рівні точки його торкання з нерухомим контактом у разі, якщо нерухомий контакт буде видалено. Провал контактів забезпечує надійне замикання кола, коли товщина контактів поволі зменшується внаслідок ерозії (вигорання) їх матеріалу під дією електричної дуги D . Значення провалу визначає запас матеріалу контактів в разі зношення у процесі роботи контактора. Після взаємного торкання контактів 2 і 5 відбувається перекочування та прослизання рухомого контакту 5 по поверхні нерухомого 2, як це показано на рис. 6.9.

Контактна пружина 9 створює певне натискання F_{KP} у контактах, тому при їх перекочуванні та прослизанні відбувається руйнування окисних плівок та інших хімічних сполук, які можуть з'явитися на поверхні контактів. Точки торкання контактів при перекочуванні та прослизанні переходять на нові місця контактної поверхні, що не піддавалися впливу дуги D , і тому є чистішими. Все це зменшує перехідний опір контактів і покращує умови їх роботи. Однак, водночас перекочування і прослизання підвищує інтенсивність механічного зносу контактів. Головні контакти 2 і 5 кріпляться болтами, що дозволяє здійснювати їх заміну в разі зношування. У момент зіткнення рухомий головний контакт 5 відразу тисне на нерухомий контакт 2.

Цей тиск обумовлений *попереднім натягом контактної пружини 9*.

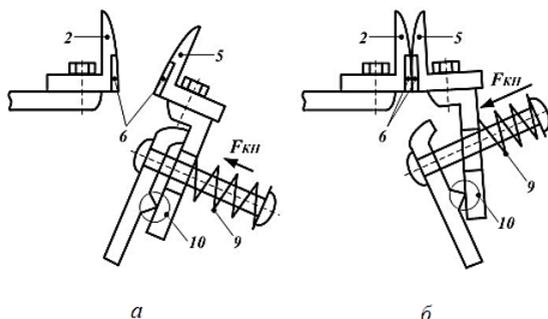


Рисунок 6.9 – Динаміка процесу замикання основних контактів:

Лінія контактування переміщується по робочій поверхні з одночасним зростанням зусилля контактного натискання F_K
(позначення позицій відповідає рис. 6.8)

Внаслідок цього перехідний опір контактів у момент їх торкання буде невеликим, і контактна площадка не розігріється під час включення до значної температури. Крім того, попереднє контактне натискання, створене пружиною 9, дозволяє знизити *вібрацію* (брязкіт) рухомого контакту 5 при ударі його об нерухомий контакт 2. Таке конструктивне рішення захищає контакти від приварювання при включенні струму I_H головного електричного кола. На головні контакти можуть встановлюватися методом пайки *контактні накладки* 6, виконані із спеціального матеріалу, наприклад срібла, для покращення умов тривалого проходження струму.

Досить часто в електроапаратах застосовуються накладки з дугостійкого матеріалу – металокерамики (КМК-А10 – 85% Ag + 15% CdO, або КМК-А20 – 90% Ag + 10% CuO).

Гнучке з'єднання (заплетена в «кіску») 13, необхідне для підведення струму до контактоутримувача 7, виконується з листів мідної фольги (стрічки) або з тонкого переплетеного мідного дроту. Контактор включається в силове електричне коло шляхом з'єднання виводу котушки струму 24 та «кіски» 13 зі струмопровідними шинами 3 та 17 за допомогою сталевих або латунних болтів.

Розхилом контактів називається відстань між рухомих та нерухомих контактами у відключеному стані контактора. Розхил контактів зазвичай лежить у межах від 1 мм до 20 мм. Чим менший розхил контактів, тим меншим є хід якоря приводного електромагніту (актуатора). Це призводить до зменшення робочого повітряного зазору δ електромагніту, магнітного опору, сили намагнічування, потужності котушки електромагніту та його габаритів. Мінімальне значення розхилу контактів визначається: технологічними та експлуатаційними умовами, можливістю утворення металевого містка між контактами 2 та 5 при розриві кола струму, умовами усунення можливості замикання контактів при відскакуванні рухомої системи від упору (еластичного буфера) 12 при відключенні апарату. Розхил контактів також повинен бути достатнім для забезпечення умов надійного гасіння дуги D при малих струмах. Для відключення контактора, тобто для розриву струму I_H *головного кола*, необхідно короткочасно натиснути на кнопку SB2 «Стоп». Котушка включення електромагніту 22 втратить живлення, магнітний потік Φ зникне, сила $F_{ВП}$ поворотної пружини 15 перемістить якор електромагніту 11 у початкове положення (тоді робочий зазор δ – максимальний), а блок-контакти 16 розімкнуться. Виникаюча при розходженні головних контактів 2 і 5 електрична дуга D гаситься в дугогасній камері 4.

Швидке переміщення дуги D з контактів 2 і 5 в дугогасну камеру 4 забезпечується системою *магнітного дуття*. У коло струму I_H *головного кола* включена послідовна дугогасна котушка 24, яка розміщена на сталевому осерді 1. Феромагнітні пластини-полюси 25, які розташовані по торцях осердя 1, підводять магнітне поле, що створене котушкою 24, до зони горіння дуги D в камері 4. Взаємодія цього магнітного поля зі струмом дуги I_H призводить до появи сили F_D (за правилом лівої руки), яка розтягує і переміщує дугу D в камеру 4. Щілинна дугогасна камера утворена двома стінками з перегородками, виконаними з ізоляційного матеріалу (азбоцемент, азбестоцемент, азбопласт, силікатна кераміка), що має велику теплоємність та високу теплопровідність. В результаті взаємодії електричного струму

дуги I_H з магнітним полем утворюється сила F_D , яка розтягує дугу D і переміщує її між стінками щілинної камери. Гасіння дуги відбувається через інтенсивне охолодження і швидке збільшення опору стовпа дуги. При послідовному включенні головних контактів 2 та 5, а також котушки магнітного дуття 24, напрямок сили F_D залишається незмінним за будь-якого напрямку струму I_H головного кола.

Роботу контактора можна оцінювати двома залежностями: сумарною характеристикою протидіючих сил ($F_{ВП}^{\bullet H}$ – від повертальної пружини та $F_{КП}^{\bullet H}$ – від контактної пружини; значення сил приведено до робочого зазору δ електромагніту) і тяговою характеристикою електромагнітного приводу $F_{ЕМ}$, як це показано на рис. 6.10.

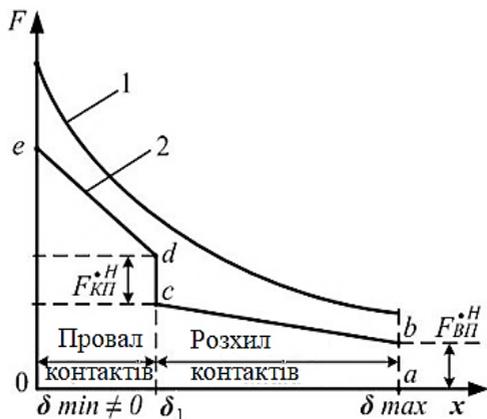


Рисунок 6.10 – Тягова характеристика електромагніту $F_{ЕМ}$ (1) та механічна характеристика протидіючих пружин $F_{ВП}^{\bullet H}$ і $F_{КП}^{\bullet H}$ (2)

Для збереження працездатності контактора тягова характеристика 1 електромагніту повинна у всіх точках розташовуватися вище характеристики 2 протидіючих пружин при мінімальній допустимій напрузі на котушці ($F_{кер}^{0,85} = 0,85 \cdot U_{кер}$) та

нагрітій котушці до сталюї температури. По горизонтальній осі вказано значення робочого зазору між якорем і наконечником сердечника електромагніту. По вертикальній осі – приведені до всього зазору δ тягові та протидіючі зусилля F . На графіку позначено: $a-b$ – початкове стискання повертальної пружини $F_{BII}^{\bullet H}$; $b-c$ – наростання сили повертальної пружини F_{BII}^{\bullet} по мірі зменшення робочого зазору δ ; $c-d$ – початкове стискання контактної пружини $F_{KII}^{\bullet H}$ (воно становить 30...50% від F_{KII}^{\bullet} до того ж необхідне для запобігання вібрації контактів при включенні струму I_H головного кола); $d-e$ – наростання сили повертальної пружини F_{BII}^{\bullet} та контактної пружини F_{KII}^{\bullet} по мірі по мірі зменшення робочого зазору δ_1 до значення δ_{\min} .

6.3.1 Пристрій контактної-дугогасної системи

Оскільки найважливішим вузлом контактора є контактної-дугогасна система, докладно розглянемо особливості її конструкції. Найбільш поширений варіант виконання дугогасної системи контакторів у спрощеному вигляді представлений на рис. 6.11.

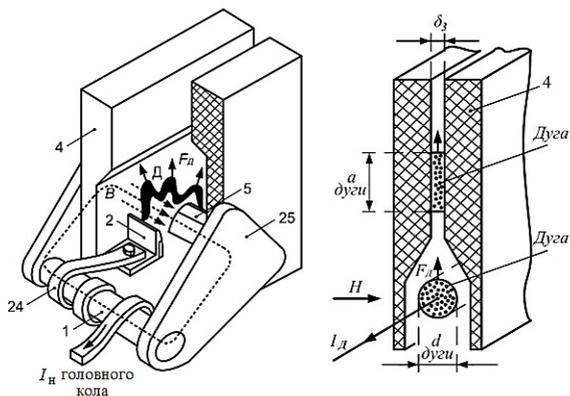


Рисунок 6.11 – Щілинна дугогасна камера з магнітним дуттям (позначення позицій відповідають рис. 6.8)

Для гасіння електричної дуги при розмиканні контактів застосовуються різні системи. Найбільш поширеними є щілинні камери з магнітним дуттям.

Розрізняють системи з послідовним (котушка струму) і паралельним (котушка напруги) включенням котушки, призначеної для створення магнітного поля. У пристроях дугогасіння з магнітним дуттям обмотка (котушка) 24 розміщується на сердечнику 1, який разом з двома пластинами 25 утворює магнітопровід, що охоплює камеру 4 з обох сторін і забезпечує підведення магнітного потоку Φ в зону горіння дуги D між контактами 2 і 5. При взаємодії магнітного потоку Φ зі струмом дуги, вона переміщується вгору по контактах, переходить на дугогасні роги (не показані) і значно подовжується. Далі дуга D потрапляє до щілинної частини δ_3 камери 4, інтенсивно охолоджується і гасне. Таким чином, струм I_H головного кола, тобто струм дуги I_D через навантаження R_H припиняється.

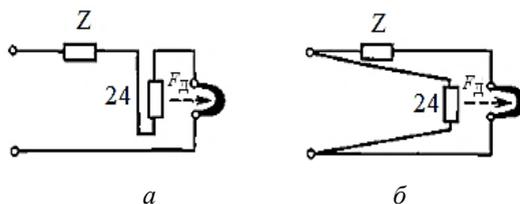


Рисунок 6.12 – Системи з послідовним (а) і паралельним (б) включенням обмотки [45]

При послідовному магнітному дутті (рис. 6.12, а) обмотка (котушка) 24 включається в коло комутованого струму I_H , при цьому її переріз розраховується на величину цього струму. Котушка послідовного магнітного дуття 24 зазвичай має від двох до десяти витків і виконується у вигляді намотуваної на ребро шини прямокутового перерізу (без ізоляції) з повітряними проміжками між витками.

При паралельному магнітному дутті (рис. 6.12, б) – обмотка (котушка) включається на повну напругу U_H головного кола.

Котушка паралельного магнітного дуття має значну кількість витків з ізоляцією, розрахованою на напругу U_H головного кола.

В обох виконаннях взаємодія магнітного поля зі струмом дуги має призводити до появи сили F_D , яка переміщає дугу D в камеру.

Виконання цієї умови можна перевірити, наприклад, *правилом лівої руки*: якщо розташувати в зоні горіння дуги долоню з витягнутими пальцями та відігнути великим пальцем у площині долоні під прямим кутом таким чином, щоб пальці розташовувалися у напрямку струму в дузі, а магнітний потік від системи магнітного дуття «входив» у долоню, то великий палець покаже напрямок переміщення стовпа дуги.

Якщо уявити дугу D як провідник довжиною l зі струмом I , розміщений у магнітному полі з індукцією B , то сила переміщення F_D , яка впливає на дугу, визначається як

$$F_D = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \varphi,$$

де φ – кут між вектором магнітної індукції B та вектором струму I

Якщо врахувати, що в системах магнітного дуття кут $\varphi = 90^\circ$, а індукція $B = \mu_0 \cdot H$, то попередню формулу можна перетворити на таку

$$F_D = \mu_0 \cdot H \cdot I \cdot l,$$

де μ_0 – магнітна проникність повітря;

H – напруженість магнітного поля.

Якщо прийняти припущення про те, що магнітопровід системи магнітного дуття в процесі роботи не насичується, то напруженість магнітного поля в зоні горіння дуги буде

$$H = \frac{I \cdot W}{\delta_H},$$

де W – кількість витків котушки магнітного дуття;

δ_{Π} – відстань між пластинами магнітопроводу дугогасної камери в зоні переміщення дуги.

Далі необхідно враховувати, що при послідовному дутті струм у котушці дорівнює комутованого струму, а при паралельному дутті визначається співвідношенням

$$I = \frac{U}{R_k},$$

де U – напруга головного кола;

R_k – електричний опір обмотки котушки.

Тоді сила на дугу $F_{Д1}$ при послідовному дутті розраховується як

$$F_{Д1} = \frac{\mu_0 \cdot W \cdot I^2 \cdot l}{\delta_{\Pi}}.$$

А при паралельному дутті сила $F_{Д2}$ буде обчислюватися як

$$F_{Д2} = \frac{\mu_0 \cdot W \cdot U \cdot I \cdot l}{R \cdot \delta_{\Pi}}.$$

На рис. 6.13 для порівняння наведено залежності сили послідовного $F_{Д1}$ та паралельного $F_{Д2}$ магнітного дуття, а також відповідні цим силам часи горіння дуги $t_{Д}$ в залежності від струму I , що відключається.

Ці залежності показують, що у випадку при відключенні малих струмів паралельне дуття є більш ефективним, та час дуги $t_{Д2}$ менше часу $t_{Д1}$ порівняно з послідовним дуттям. При збільшенні струму відключення I у дугогасному пристрої з послідовним дуттям сила дуття $F_{Д1}$ швидко наростає (пропорційна квадрату струму), час дуги $t_{Д1}$ зменшується, і тому доцільність застосування саме такого пристрою при комутації великих струмів очевидна. Крім описаних систем магнітного

дутья, також знаходять застосування дугогасні пристрої з постійними магнітами, які за принципом дії аналогічні системам з паралельним дутьтям.

Важливу роль у дугогасінні грають дугогасні камери, які можуть бути щільними (різної конфігурації), з деіонними металевими пластинами (дугогасними решітками), а також комбінованими.

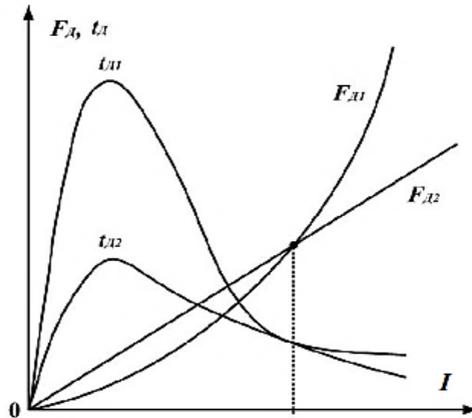


Рисунок 6.13 – Залежність сили магнітного дутьтя F_D часу дуги t_D від струму відключення I :

F_{D1} та t_{D1} – послідовна система магнітного дутьтя;
 F_{D2} та t_{D2} – паралельна система магнітного дутьтя.

6.3.2 Методика розрахунку параметрів електромагнітного контактора постійного струму

Основними методами розрахунків при проектуванні (розробці, виборі конструкції та розрахунку) є такі: пошуковий метод, експериментальний метод, а також метод подібності та метод послідовних наближень.

При виконанні розрахункової роботи необхідно керуватися як загальними положеннями, так і практичними прикладами, враховуючи фізичні закони та досвідчені дані. Застосовуючи

розрахункові формули, необхідно чітко представляти фізику явищ, що описуються формулами.

6.3.2.1 Огляд конструкції доцільно здійснити у наступному порядку.

1) Необхідно виконати короткий опис особливостей конструкції контактора, а також огляд існуючих конструкцій контакторів провідних світових компаній розробників та виробників контакторів, або магнітних пускатрів. Розглянути загальні принципи роботи та особливості апарату в цілому, а також особливості конструкції його основних вузлів (контактної та дугогасної систем, механізмів включення та дії, корпусних та ізоляційних вузлів та деталей).

2) З'ясувати основні параметри апарата.

3) Вивчити відносні (питомі) показники апарату.

Після з'ясування та вирішення загальних питань, основне завдання з розробки зводиться до розрахунку параметрів головних вузлів та частин контактора.

При розрахунку контактора постійного струму зазвичай задаються:

– номінальний струм головного кола I_H ;

– граничний струм, що відключається $I_{\text{відк}} = (2,5 \dots 4,0) \cdot I_H$ або

$$I_{\text{відк}} = (2,5 \dots 4,0) \cdot I_{\text{екв}};$$

– кратність струму відключення $n_{\text{відк}} = 2,5; 3,0; 3,5; 4,0$;

– номінальна напруга U_H ;

– напруга кола керування $U_{\text{кер}}$;

– відносну тривалість включення ПВ%;

– допустиме число циклів включення z на годину;

– кількість головних полюсів (головних контактів) p .

6.3.2.2 Розрахунок параметрів контактора проводиться в наступній послідовності.

1) Визначається переріз струмопровідних частин апарату в режимі номінального струму I_H з урахуванням того, аби стала температура нагрівання частин не перевищувала допустиму температуру для ізоляції, з якою торкаються струмопровідні

частини. Еквівалентний струм $I_{\text{екв}}$, який викликає таке саме нагрівання струмопровідних частин, що і струм, що відключається I_n при тривалому протіканні з нагріванням частин електричною дугою для контакторів, які комутують кола електродвигунів, визначається за відомою емпіричною формулою.

2) Визначається переріз струмопровідних частин у режимі струму перевантаження або струму короткого замикання. Цей режим вважається адіабатичним (тобто без віддачі теплоти в навколишнє середовище). Визначається сукупність трьох основних параметрів:

- струм короткого замикання $I_{KЗ}$;
- тривалість його протікання $t_{KЗ}$ (час термічної стійкості);
- переріз струмопровідних частин.

Сукупність цих трьох величин має бути обрана так, щоб температура нагрівання струмопровідних елементів не перевищувала допустиму для короткочасного режиму.

3) Розраховується сила контактного натискання F_K при тривалому режимі номінального струму. Ця сила повинна бути такою, щоб перехідний опір контактів R_K , який перш за все визначається цією силою, не призводив би до великих теплових втрат у контактній точці. Крім цього, температура нагрівання цієї точки не повинна перевищувати допустимого значення ϑ_D . В деяких умовах допустиму температуру нагрівання контактних точок ϑ_D можна приймати більш висою, але ж такою, щоб не перевищувала температуру рекристалізації (розм'якшення) матеріалу контакту $\vartheta_{рек}$. Сила контактного натискання F_K розраховується за умови, що у режимі надструму електродинамічні сили відштовхування в контактах не викликали їх розбіжності та утворення дуги в міжконтактному проміжку. Сила контактного натискання повинна забезпечувати відсутність зварювання контактів. Розрахункова сила контактного натискання F_K приймається рівною найбільшому з отриманих значень, розрахованих за попередніми пунктами. За цією силою F_K

визначаються параметри контактних пружин, які повинні мати попереднє стискання, що розвивається пружиною в перший момент торкання контактів.

4) Визначається розхил головних контактів, виходячи з умов гасіння дуги D при малих струмах. Одночасно з розрахунком критичної довжини дуги $l_{кр}$ для різних значень струму визначається швидкість руху дуги. Розраховуються параметри дугогасної системи та системи магнітного дуття, при яких забезпечується надійне гасіння дуги за час не більше 0,1 с у діапазоні струмів від критичного до граничного значення, що може бути відключений. Розраховується необхідна площа зовнішньої поверхні дугогасної камери за умови її допустимого нагрівання.

5) Використовуючи залежності, наведені в [53], розраховується зношення контактів контактора за номінальним струмом I_n і заданою електричною зносостійкістю N . Цим розрахунком визначається і об'єм матеріалу контактів, який вигорить при кількості N комутаціях кола, а також у кінцевому результаті – лінійне зношування контакту. За знайденими величинами будується орієнтовна (приблизна) характеристика протидіючих сил, приведених до головних комутуючих контактів (рис. 6.14).

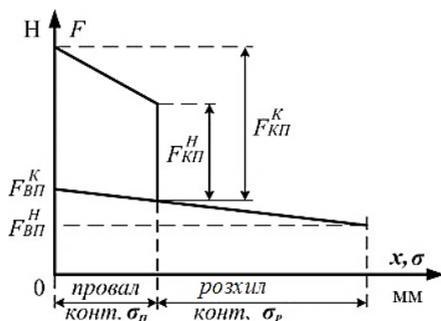


Рисунок 6.14 – Характеристика протидіючих сил:

$F_{ВП}^H, F_{кп}^H$ – сили початкового стискання повертальної та контактної пружин;
 $F_{ВП}^K, F_{кп}^K$ – сили кінцевого стискання повертальної та контактної пружин.

Якщо тепер, за кінематичною схемою проєктованого контактора, побудувати характеристику (рис. 6.15), приведену до робочого зазору δ електромагніту, з урахуванням протидіючих сил, що створюються зворотною та контактною пружинами і масою рухомої системи контактора, то можна отримати необхідні дані для вибору та розрахунку параметрів тягового електромагніту.

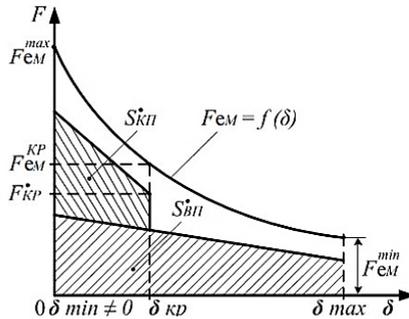


Рисунок 6.15 – Тягова характеристика електромагніту $F_{\epsilon M}$ та характеристика протидіючих сил, приведені до робочого зазору δ

Площа $S_{\dot{B}П}$ на цій характеристиці визначається масою рухомих частин електромагніту, тертям і силою повертальної пружини, помноженими на приведений розхил контактів, а площа $S_{\dot{K}П}$ визначається силами контактних пружин, помноженими на приведений провал контактів.

За відомою силою F_{KP} при критичному зазорі δ_{KP} , який відповідає моменту дотику контактів, знаходиться сила $F_{\epsilon M}^{KP}$, яку повинен розвивати електромагніт при δ_{KP} :

$$F_{\epsilon M}^{KP} = k_{zc} \cdot F_{KP},$$

де $k_{zc} = 1,3 \dots 1,7$ – коефіцієнт запасу за силою.

Через точку $F_{\text{ем}}^{KP}$ проводиться приблизна тягова характеристика електромагніту $F_{\text{ем}} = f(\delta)$ і, відповідно до рекомендацій, вибирається тип тягового електромагніту та конструктивні розміри магнітопроводу. Якщо повітряний зазор δ_{max} невеликим у порівнянні з розмірами магнітопроводу та полюсного наконечника електромагніту, тоді поле в повітряному зазорі можна вважати рівномірним. При вибраному значенні індукції B_{δ}^{min} в робочому повітряному зазорі можна розрахувати площу поперечного перерізу полюса S_{II} (торця) осердя електромагніту. Для розрахунків застосовується формула Максвелла для тягової сили, згідно з якою, для електромагніту постійного струму

$$S_{II} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot F_{\text{ем}}^{\text{min}}}{(B_{\delta}^{\text{min}})^2}, \text{ м}^2,$$

де S_{II} , м^2 – площа поперечного перерізу полюса сердечника;

$F_{\text{ем}}^{\text{min}}$ – електромагнітна сила при максимальному робочому зазорі;

$B_{\delta}^{\text{min}} = 0,1 \dots 1,0$ Тл – індукція у робочому зазорі при δ_{max} ;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність повітряного середовища.

Формула Максвелла для електромагніту змінного струму має вид

$$S_{II} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot F_{\text{ем}}^{\text{min}}}{(B_{\delta}^{\text{min}})^2}, \text{ м}^2.$$

Після розрахунку значення площі поперечного перерізу полюса S_{II} осердя, можна визначити технічні параметри електромагніту, використовуючи співвідношення, які накопичилися в конструкторській практиці.

Варто зазначити, що при розробці контактора треба прагнути до скорочення розхилу та провалу його контактів до допустимих значень. В такому разі зменшуються габарити контактора загалом,

а також надлишкова енергія електромагніту, що призводить до підвищення електричної та механічної зносостійкості електричного апарату в цілому.

6.4 Магнітні пускачі

Магнітний пускач – це електричний апарат, призначений для пуску, зупинки, реверсування та захисту електродвигунів. Його практично єдина відмінність від контактора – це наявність пристрою захисту (зазвичай – це теплове реле) від струмових перевантажень.

Магнітний пускач є комутаційним апаратом, що дозволяє комутувати потужні навантаження постійного та змінного струму, та призначений для частих включень та відключень силових електричних кіл. Магнітні пускачі застосовуються переважно для пуску, зупинки та реверсування трифазних асинхронних електродвигунів, однак, через свою невибагливість вони чудово працюють у схемах дистанційного керування освітленням, у схемах керування компресорами, насосами, кран-балками, тепловими печами, кондиціонерами, стрічковими конвеєрами тощо. Тобто, магнітні пускачі мають дуже широку сферу застосування.

Основні терміни та визначення наведено відповідно до стандарту ГОСТ Р 50030.4.1 (МЭК 60947-4-1), які дозволяють глибше зрозуміти призначення та функції основних електричних апаратів, які застосовуються для керування електродвигунами.

Пускачі змінного струму – це апарати змінного струму, призначені для пуску та розгону двигуна до номінальної швидкості, забезпечення безперервної роботи двигуна, відключення живлення та захисту двигуна та підключених ланцюгів від робочих навантажень. Реле перевантаження для пускачів, у тому числі напівпровідникові, повинні відповідати вимогам цього стандарту.

Пускачі прямої дії – це пускачі, що одноступінчасто подають мережеву напругу на затискачі двигуна, і призначені для його пуску та розгону до номінальної швидкості. Крім того, вони повинні забезпечувати комутацію та захист відповідно до

загального визначення. Додатково у стандарті наводяться два терміни, що стосуються реверсування напряму обертання двигуна.

Реверсивні пускачі, призначені для зміни спрямування обертання двигуна шляхом перемикання його живильних з'єднань без обов'язкового зупинення двигуна.

Пускачі з двома напрямками обертання призначені для зміни спрямування обертання двигуна шляхом перемикання його з'єднань живлення тільки під час зупинки двигуна.

Пускачі змінного струму на зниженій напрузі – це пускачі змінного струму, призначені для пуску та розгону двигуна до номінальної швидкості шляхом подачі мережевої напруги на затискачі двигуна двома або більше ступенями, або шляхом поступового підвищення напруги на затискачах. До того ж вони мають забезпечувати комутацію та захист відповідно до загального визначення. Для керування послідовними комутаціями ступенів можуть використовуватися *контакторні реле з витримкою часу* або аналогічні пристрої. Найбільш поширений тип пускачів змінного струму на зниженій напрузі – це пускачі зі схемою зірка-трикутник, визначення яких також наведено у наведеному стандарті.

Пускачі зі схемою зірка-трикутник – це пускачі зі схемою зірка-трикутник, призначені для запуску трифазного двигуна таким чином, що у пусковому положенні обмотки статора з'єднуються зіркою, а в робочому положенні – трикутником. Крім того, вони мають забезпечувати комутацію та захист відповідно до загального визначення. Пускачі зі схемою зірка-трикутник, які задовольняють цьому стандарту, не призначені для швидкого реверсування двигуна, і тому не можуть застосовуватися як апарати з категорією застосування АС-4.

Цей стандарт поширюється і на інші типи пускачів (автотрансформаторні та реостатні статорні пускачі) і містить відповідні терміни та визначення. Пускачі, описані в цьому стандарті, як правило, не призначені для відключення струму короткого замикання. Тому відповідний захист від короткого замикання має бути реалізована у системі керування. Після визначення пускачів відповідно до виконуваних ними функціям наведена додаткова класифікація за робочими характеристиками і

категоріям застосування, що враховує можливості використання пускачів спільно з пристроєм захисту від короткого замикання. Вказуються способи кріплення та електромонтажу.

Спочатку визначається типовий використовуваний пристрій захисту, тобто. автоматичний вимикач, який відповідно до стандарту ГОСТ Р 50030.2 (МЕК 60947-2) «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели» є контактний комутаційний апарат, здатний включати, проводити та відключати струми за нормальних умов роботи кола, включати та проводити струми протягом певного часу і відключати їх за певних аномальних умовах кіл, наприклад, короткому замиканні. Потім визначаються і класифікуються пристрої комутації та захисту.

Комбінований пускач – це комбінація пускача та апарату захисту від короткого замикання, змонтованих та з'єднаних у передбаченій при цьому оболонці. Функції комутаційного апарату та апарату захисту від короткого замикання можуть виконувати комбінація з плавкими запобіжниками, вимикач з плавкими запобіжниками або автоматичний вимикач, придатний або непридатний для роз'єднання.

Захищений пускач – це комбінація пускача та апарату захисту від коротких замикань в оболонці або без неї, змонтованих та з'єднаних згідно з інструкцією виробника пускача. Комутаційний апарат з ручним керуванням та апарат захисту від коротких замикань може бути єдиний апарат та оснащуватися додатково захистом від навантаження. Визначення «пускач» має на увазі комутаційний апарат, наприклад, контактор, плюс пристрій захисту від навантаження, наприклад, теплове реле. Розглянемо тепер, як у стандарті ГОСТ Р 50030.4.1 (МЕК 60947-4-1) визначаються ці два пристрої, що входять до складу пускача. Контактор механічний комутаційний апарат з одним положенням спокою, що оперується не вручну, здатний вмикати, проводити ті відмикати струми в нормальних умовах роботи кіл, в тому числі при перевантаженнях.

До пристроїв, які підпадають під наведені вище визначення, та які зазвичай використовуються для реалізації захищених пускачів, відносяться наступні:

- влаштування захисту від короткого замикання (як правило, – це автоматичний вимикач з електромагнітним розчіплювачем (можливо використання запобіжників));
- комутаційний апарат, наприклад, контактор;
- пристрій захисту від перевантаження, наприклад, теплове реле.

Дані пристрої необхідно правильно вибрати, таким чином, щоб забезпечувалися належні керування та захист двигуна. Крім того, вони мають бути скоординовані один з одним, так, щоб забезпечувалася захист всіх компонентів пускача, а, отже, і безпека електрообладнання. Експлуатаційні характеристики пристрою захисту від короткого замикання повинні відповідати вимогам і відповідати характеристикам компонентів, що використовуються у кожній конкретній галузі застосування. Перевірка реалізації захисту різними пристроями зазвичай здійснюється виробником з урахуванням експериментальних даних та практичного досвіду проектування.

6.4.1 Конструкція та принцип роботи магнітного пускача

Принцип роботи аналогічний контактору, а саме: напруга живлення подається на котушку пускача, в котушці виникає магнітне поле, за рахунок якого всередину котушки втягується металевий сердечник, до якого закріплено групу силових (робочих) контактів, контакти замикаються, і через них починає протікати електричний струм. Керування магнітним пускачем здійснюється кнопками «Пуск», «Стоп», «Вперед» та «Назад».

Конструкція магнітного пускача має дві частини: сам пускач і блок контактів (рис. 6.16). Блок контактів не є основною частиною магнітного пускача і не завжди використовується, але якщо пускач працює в схемі, де повинні бути задіяні додаткові контакти цього пускача, наприклад, реверс електродвигуна, сигналізація роботи пускача або включення додаткового обладнання пускачем, то для розмноження контактних ланцюгів, саме і служить блок контактів або, як його ще називають, – контактна приставка (рис. 6.16, б).

Всередині блоку контактів (приставка контактної) вбудована рухома контактна система, яка жорстко зв'язується з контактною

системою магнітного пускача і стає з ним одним цілим. Кріпиться приставка у верхній частині пускача, де для цього передбачені спеціальні полозья із зачепами (рис. 6.17).

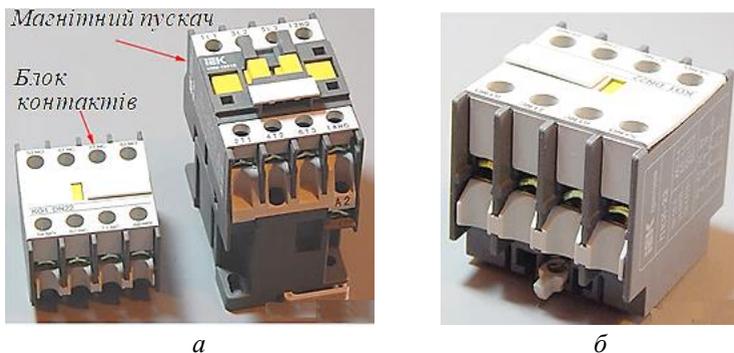


Рисунок 6.16 – Пристрій магнітного пускача з додатковим блоком контактів [71, 83]



Рисунок 6.17 – З'єднання блоку контактів із контактною системою магнітного пускача

Контактна система приставки складається з двох пар нормально замкнених та двох пар нормально розімкнених контактів. На рис. 6.18 схематично показано кнопку з парою контактів під номерами 1-2 і 3-4, які закріплені на вертикальній осі. У правій частині малюнка показано графічне зображення цих контактів, використовуване електричних принципових схемах.

Нормально розімкнений (NO) контакт у неробочому стані завжди розімкнений, тобто, не замкнутий. На рис. 6.19 він

позначений парою 1–2, і щоб через нього пройшов струм, контакт необхідно замкнути.

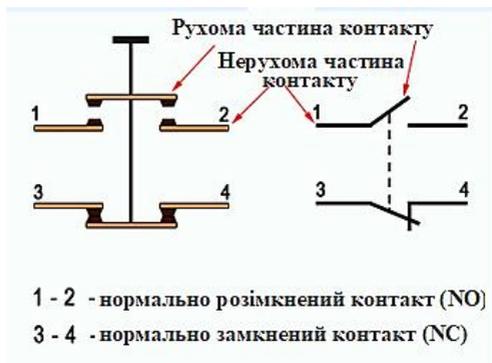


Рисунок 6.18 – Нормально розімкнений (NO) контакт у неробочому стані [71, 83]

Нормально замкнений (NC) контакт у неробочому стані завжди замкнений і через нього може проходити струм. На малюнку 5 такий контакт позначений парою 3–4, і щоб припинити проходження струму через нього, треба розімкнути контакт. Тепер, якщо натиснути кнопку, то нормально розімкнений контакт 1-2 замкнеться, а нормально замкнений 3-4 розімкнеться. Про що свідчить рис. 6.19.

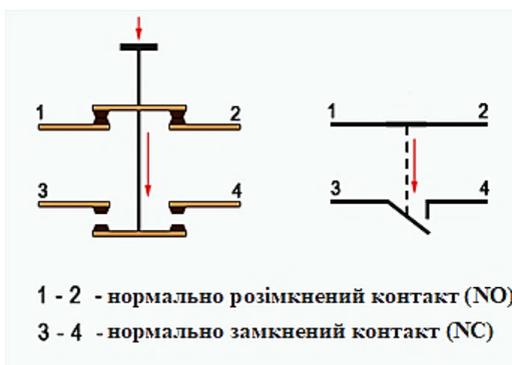


Рисунок 6.19 – Нормально замкнений (NC) контакт у неробочому стані

Таким чином, у блоці контактів у початковому стані (коли магнітний пускач знеструмлений) нормально розімкнені контакти 53 NO-54 NO і 83 NO-84 NO розімкнуті, а нормально замкнені 61 NC-62 NC і 71 NC-72 NC замкнені. На це вказує шильдик з номерами клем контактів, що розташований на бічній стінці блоку контактів, а стрілка показує напрямок руху контактної групи (рис. 6.20). Тепер, якщо на котушку пускача подати напругу живлення, то осердя потягне за собою контакти блоку контактів, і нормально розімкнуті контакти замкнуться, а нормально замкнені – розімкнуться.

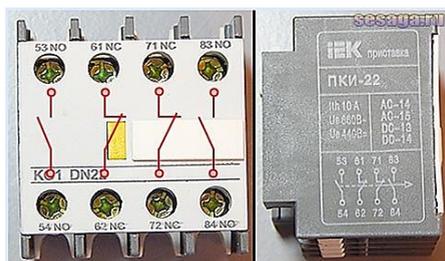


Рисунок 6.20 – Блок контактів та його шильдик з номерами клем контактів

Фіксується блок контактів на пускачі спеціальною клямкою. А для того, аби блок зняти, достатньо підняти клямку і висунути блок у бік клямки (рис. 6.21).



Рисунок 6.21 – Розблокування контактів

Магнітний пускач складається умовно з верхньої та нижньої частини (рис. 6.22). У верхній частині знаходиться рухома контактна система, дугогасна камера та рухома половинка

електромагніту, яка механічно пов'язана з групою силових контактів рухомої контактної системи (рис. 6.23).



Рисунок 6.22 – Пристрій магнітного пускача

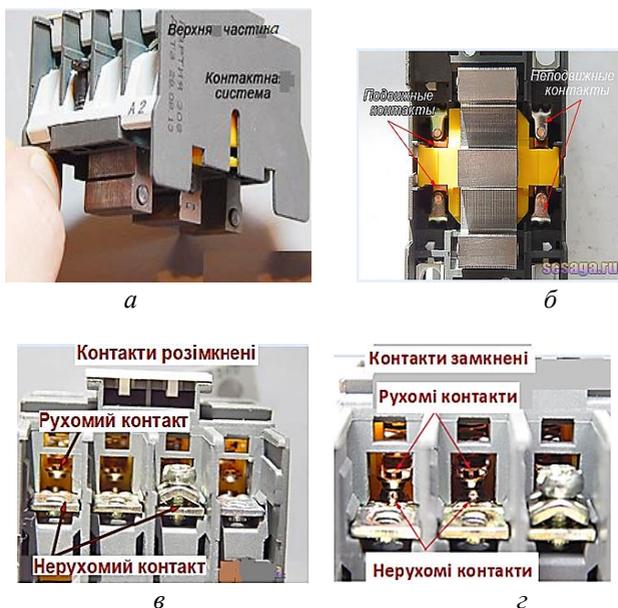


Рисунок 6.23 – Пристрій верхньої частини магнітного пускача

Нижня частина пускача складається з котушки, повертальної пружини та другої половинки електромагніту (рис. 6.24).

Поворотна пружина повертає верхню половинку у початкове положення після припинення подачі живлення на котушку, тим самим розриваючи силові контакти пускача. Обидві половинки електромагніту набрані із Ш-подібних пластин, виготовлених з електромагнітної сталі (рис. 6.24). Це видно, якщо витягнути нижню половинку електромагніту.

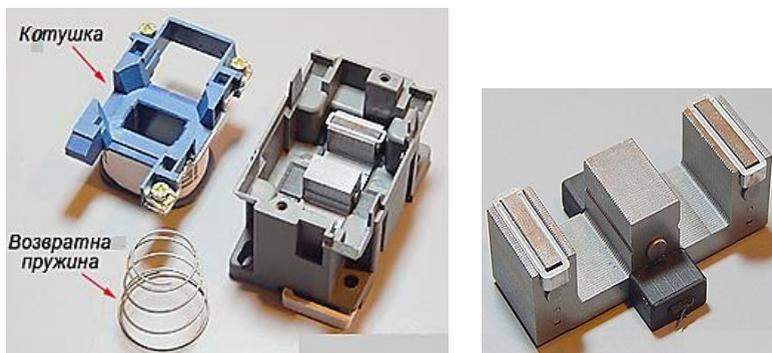


Рисунок 6.24 – Пристрій нижньої частини магнітного пускача

Котушка пускача намотана мідним дротом, і містить n -у кількість витків, розраховану на підключення певної напруги живлення, рівної 24 В, 36 В, 110 В, 220 В або 380 В (рис. 6.25).

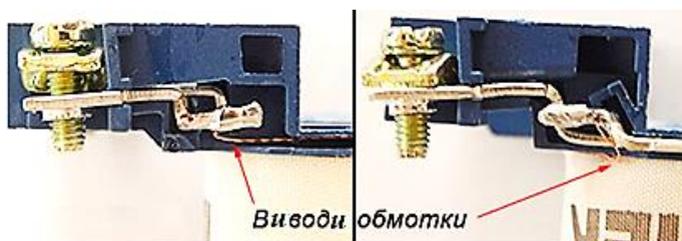


Рисунок 6.25 – Котушка пускача

При подачі напруги живлення на котушку навколо з'являється магнітне поле і обидві половинки прагнуть з'єднатися, утворюючи замкнений контур (рис. 6.26, а). Як тільки відключаємо живлення,

магнітне поле пропадає, і верхня частина повертається пружиною у початкове положення (рис. 6.26, б).

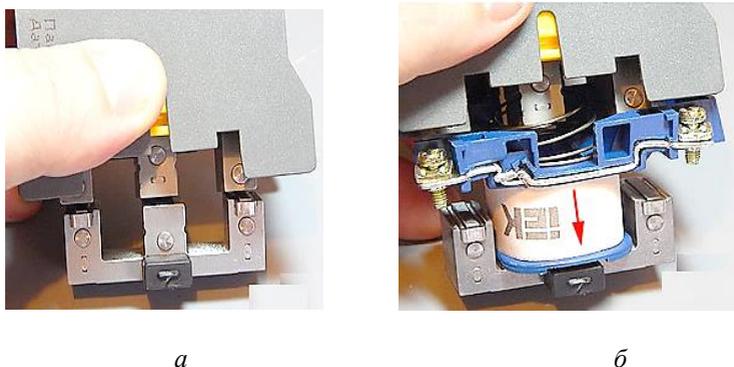


Рисунок 6.26

6.4.2 Категорії застосування магнітних пускачів

Для характеристики комутаційної здатності магнітних пускачів змінного струму встановлено чотири категорії застосування, що є стандартними: АС1, АС2, АС3, АС4. Кожна категорія застосування характеризується значеннями струмів, напруги, коефіцієнтів потужності або постійних часу, умовами випробувань та інших параметрів, встановлених ГОСТ Р 50030.4.1-2002. Магнітні пускачі категорії АС-1 розраховуються на застосування в ланцюгах електропечей опору та комутують лише номінальний струм. Магнітні пускачі категорії АС-2 розраховуються на пуск електродвигунів з фазним ротором та комутують струм $2,5 \cdot I_{ном}$. Магнітні пускачі категорії АС-3 розраховуються на пуск електродвигунів з короткозамкненим ротором і на відключення електродвигунів, що обертаються, і комутують струм $6 \dots 10 \cdot I_{ном}$. Магнітні пускачі категорії АС-4 розраховуються на пуск електродвигунів з короткозамкненим ротором і на відключення нерухомих або повільно електродвигунів, що обертаються, вони комутують струми $6 \dots 10 \cdot I_{ном}$ [14, 23, 71].

– I_{th} 25 А – це умовний тепловий струм ($t^{\circ} \leq 40^{\circ}$). Це максимальний струм, який контактор або пускач може проводити в 8-годинному режимі так, щоб перевищення температури різних частин не виходило за межі 40°C .

<p>КМИ-10910 50 Гц АС-3, I_n 9 А АС-1, I_{th} 25 А</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>U_n, В~</th> <th>АС-3, кВт</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>230</td> <td>2,2</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>660</td> <td>5,5</td> </tr> </tbody> </table>	U_n , В~	АС-3, кВт	230	2,2	400	4	660	5,5
U_n , В~	АС-3, кВт								
230	2,2								
400	4								
660	5,5								
<i>a</i>	<i>б</i>								

Рисунок 6.28 – Інформація про пускач та його область застосування:

a – сектор 1; *б* – сектор 2

Сектор №2. У цьому секторі зазначена номінальна потужність навантаження, яку можуть комутувати силові контакти пускача, і яка характеризується категорією застосування АС3 та вимірюється у кВт. Наприклад, через контакти пускача можна пропустити навантаження потужністю 2,2 кВт, що живиться від змінної напруги не більше 230 Вольт.

Сектор №3. Тут показана електрична схема пускача: котушка і чотири пари нормально розімкнених контактів – три силові (робочі) та один допоміжний (рис. 6.29). Від котушки через всі контакти проходить пунктирна лінія, яка вказує, що всі чотири контакти замикаються та розмикаються одночасно. Напруга живлення 220В подається на котушку через контакти, позначені як А1 та А2.

Сучасні магнітні пускачі випускають із двома однотипними контактами від одного виводу котушки (рис. 6.30, *в*). Їх виводять з протилежних сторін, маркують однаковим буквеним і цифровим значенням, і з'єднують між собою дрютяною перемичкою. У нашому випадку це висновки з маркуванням А2.

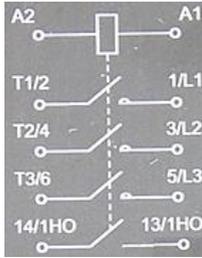


Рисунок 6.29 – Електрична схема пускача [71, 83]

Все це зроблено для зручності монтажу схеми. І якщо доведеться збирати схеми з магнітним пускачем необхідно використовувати обидва контакти.

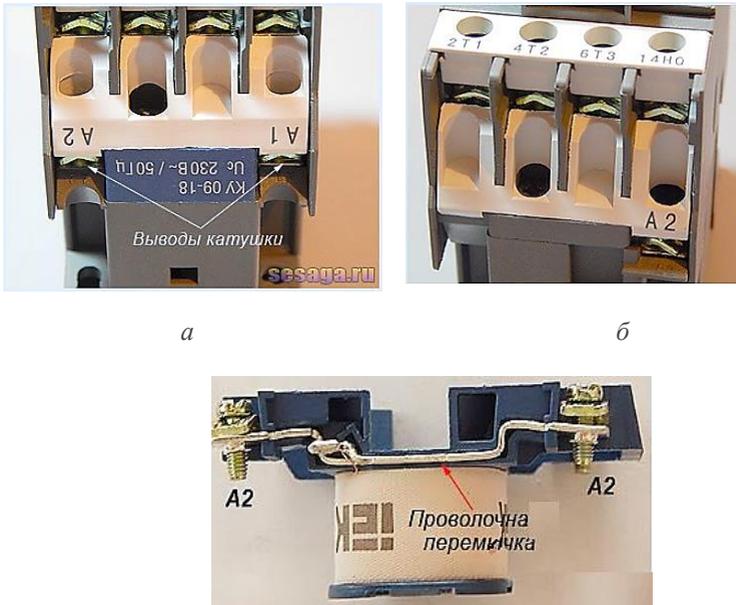


Рисунок 6.30 – Влаштування сучасних магнітних пускачів [71, 83]

Контактна група пускача – це силові контакти, а саме три пари (рис. 6.31): 1L1–2T1; 3L2–4T2; 5L3–6T3 – до них підключається

навантаження, яке необхідно приєднати через магнітний пускач або контактор. Причому контакти 1L1; 3L2; 5L3 є вхідними – до них підводиться напруга живлення, а 2T1; 4T2; 6T3 є вихідними – до них підключається навантаження. Хоча різниці немає – що куди підключити, але це вважається за правило, щоб можна було розібратися в монтажі іншій людині, яка не робила монтаж.

Остання пара контактів 13НО-14НО є допоміжною, і цю пару використовують для реалізації у схемі самопідхоплення пускача (рис. 6.31). Тобто, ця пара потрібна, щоб при включенні в роботу, наприклад двигуна, весь час його роботи не довелося тримати натиснутою кнопку «Пуск».

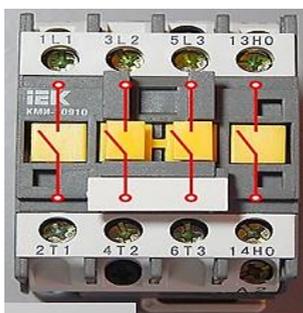


Рисунок 6.31 – Силкові контакти магнітного пускача

6.4.4 Схеми включення магнітних пускачів

Магнітні пускачі застосовується переважно для організації безпечного підключення (та керування) асинхронних трифазних двигунів. Тому існують варіанти роботи схеми для різних умов:

- класична схема прямого включення трифазного електродвигуна;
- схема із нейтральним провідником;
- реверсивна схема включення магнітного пускача.

Головна відмінність нереверсивного та реверсивного пускових пристроїв полягає у схемі підключення. Також змінюється комплектація. Контактор прямого типу є одиночним, тоді як реверсивний – блоковим, що складається з двох прямих,

об'єднаних в одному корпусі. Візуальні відмінності цих двох реле можна бачити на порівнянні моделей ПМЛ-1100 (ліворуч) та ПМЛ-1500 (праворуч) (рис. 6.32) [58]. При цьому повинна дотримуватися одна вкрай важлива умова: реверсивне з'єднання пускачів повинно повністю виключати можливість їх одночасного спрацьовування. Це неминуче призведе до виникнення явища короткого замикання. Схема підключення реверсивного магнітного пускача електродвигунів поділяється на два основні види:

- підключення до мережі з напругою 220 В;
- запуск контактора на 380 В.

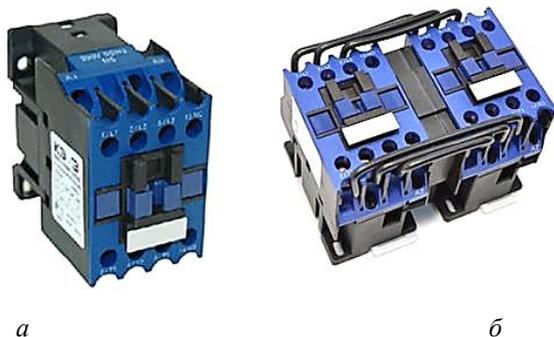


Рисунок 6.32 – Прямий (а) та реверсний (б) пускачі серії ПМЛ 1500 [83]

Далі розглянемо докладніше кожен із варіантів, спираючись на вже згадані моделі контакторів. Докладніше розглянемо схему підключення магнітного пускача, що забезпечує реверсне обертання електричного двигуна.

Така схема (рис. 6.33) використовується переважно, де потрібно забезпечити обертання електричного двигуна в обидві сторони, наприклад свердлильний верстат, підйомний кран, ліфт і тощо. На перший погляд може здатися, що ця схема набагато складніша, ніж схема з одним пускачем, але це лише на перший погляд. Для зручності розуміння схеми, ланцюга керування та силові контакти пускачів розфарбовані у різні кольори. А щоб візуально не ускладнювати схему, цифро-літерні позначення пар силових контактів пускачів не вказуються.

У класичну схему прямого включення додано ще одне коло керування, який складається з кнопки SB3, магнітного пускача KM2, і трохи змінилася силова частина подачі живлення на електричний двигун.

Назви кнопок SB2 та SB3 дано умовно. Для захисту від короткого замикання в силовому колі перед котушками пускачів додалися два нормально-замкнених контакти KM1.2 і KM2.2, під'єднаних від контактних приставок, встановлених на магнітних пускачах KM1 і KM2 (див. рис. 6.16)

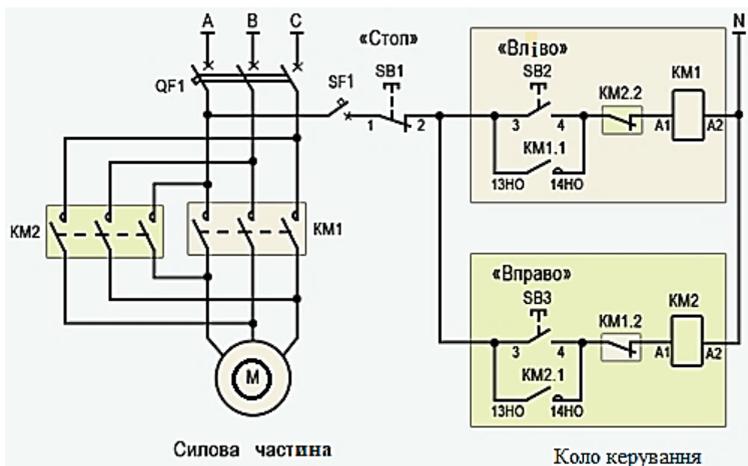


Рисунок 6.33 – Схема підключення магнітного пускача для реверсивного обертання електричного двигуна

При включенні автоматичного вимикача QF1 фази "А", "В", "С" надходять на верхні силові контакти магнітних пускачів KM1 і KM2 там залишаються чергувати.

Остання пара контактів 13НО-14НО є допоміжною, і цю пару використовують для реалізації у схемі самопідхоплення пускача. Тобто, ця пара потрібна, щоб при включенні в роботу, наприклад двигуна, весь час його роботи не довелося тримати натиснутою кнопку «Пуск».

Струм фази «А», що живить кола керування, через автомат захисту ланцюгів керування SF1 і кнопку SB1 «Стоп» надходить

на контакт №3 кнопок SB2 і SB3, допоміжний контакт 13НО пускачів KM1 та KM2, і залишається чергувати на цих контактах. Схема готова до роботи (рис. 6.34).

При натисканні на кнопку SB2 струм фази «А» через нормально-замкнений контакт KM2.2 надходить на котушку магнітного пускача KM1, пускач спрацьовує, та його нормально-розімкнені контакти замикаються, а нормально-замкнені розмикаються (рис. 6.35).

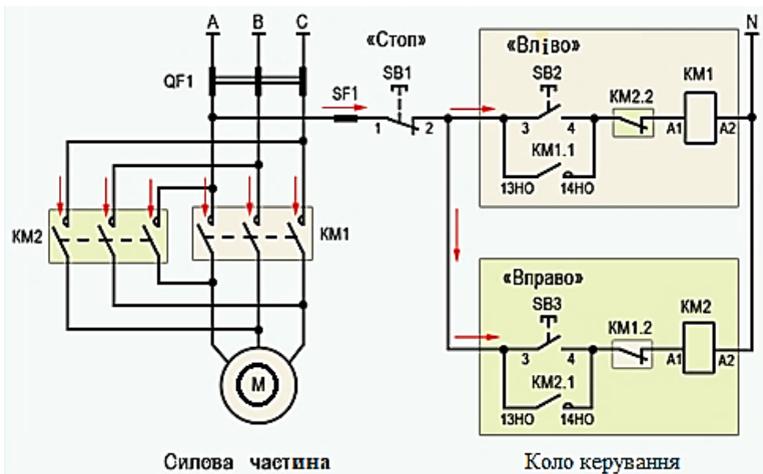


Рисунок 6.34 – Початковий стан роботи схеми

При замиканні контакту KM1.1 пускач переходить на самопідхоплення, а при замиканні силових контактів KM1 струми фаз «А», «В», «С» надходять на відповідні контакти обмоток двигуна, після чого двигун починає обертання, наприклад, у ліву сторону. Тут же, нормально-замкнений контакт KM1.2, розташований в колі живлення котушки пускача KM2, розмикається і не дає включитися магнітному пускачеві KM2 доти, поки ще в роботі пускач KM1. Це так званий «захист від непередбачуваних ситуацій» (рис. 6.38), і про нього трохи нижче.

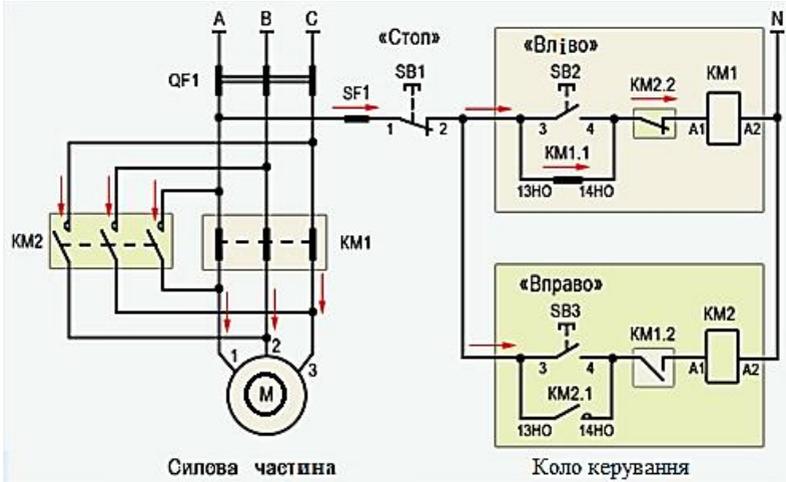


Рисунок 6.35 – Робота кіл керування при обертанні двигуна вліво

Щоб задати двигуну обертання в протилежний бік достатньо поміняти місцями будь-які дві фази живлення, наприклад, «В» і «С». Ось цим якраз і займається пускач KM2. Але перш ніж натиснути кнопку «Вправо» та задати двигуну обертання у зворотний бік, потрібно кнопкою «Стоп» зупинити попереднє обертання. При цьому розірветься ланцюг і струм керуючої фази «А» перестане надходити на котушку пускача KM1, поворотальна пружина поверне осердя з контактами у початковий стан, силові контакти розімкнуться і відключать двигун М від трифазної напруги живлення. Схема повернеться в початковий стан або режим очікування (рис. 6.36).

Після натискання кнопки SB3 струм фази А через нормально-замкнений контакт KM1.2 надходить на котушку магнітного пускача KM2, пускач спрацьовує і через свій контакт KM2.1 встає на самопідхоплення. Своїми силовими контактами KM2 пускач перекине фази В і С місцями і двигун М стане обертатися в інший бік. При цьому контакт KM2.2, під'єднаний в колі живлення пускача KM1, розімкнеться і не дасть пускачеві KM1 включитися поки в роботі пускач KM2 (рис. 6.37).

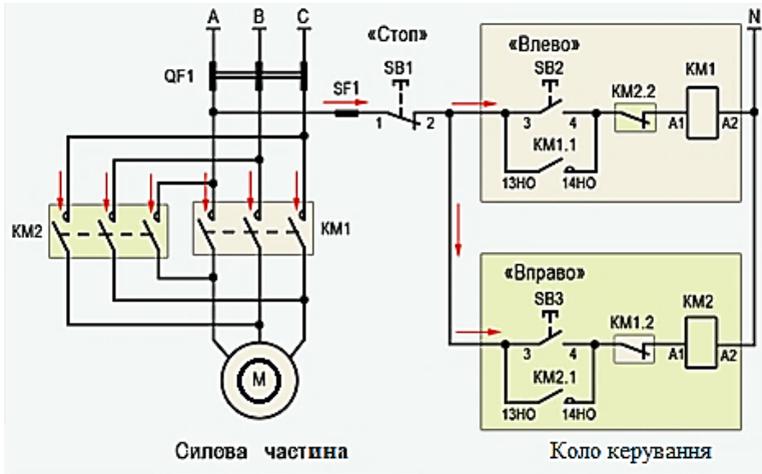


Рисунок 6.36 – Робота кіл керування перед реверсом обертання двигуна (вправо)

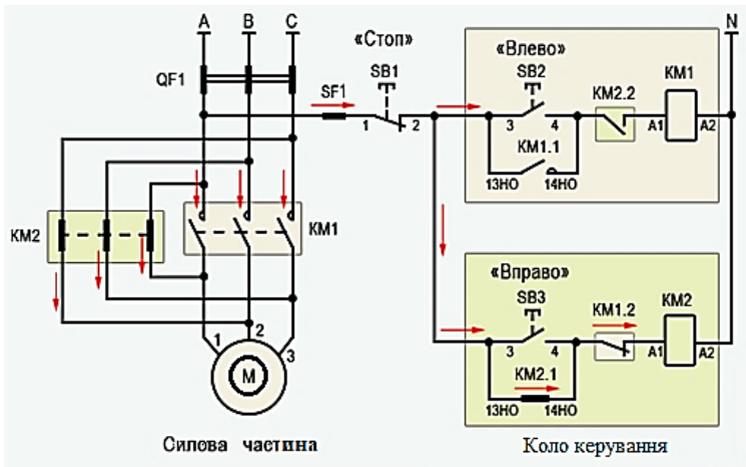


Рисунок 6.37 – Робота кіл керування під час обертання двигуна вправо

А тепер розглянемо роботу силової частини схеми, яка і відповідає за перекидання фаз живлення для здійснення реверсу

обертання двигуна. З'єднання силових контактів пускача КМ1 виконано так, що при їх спрацьовуванні струм фази «А» надходить на обмотку №1, струм фази «В» – на обмотку №2, та струм фаза «С» – на обмотку №3. Двигун, як ми визначилися, отримує обертання вліво (рис. 6.38, а). Тут перекидання фаз не здійснюється.

З'єднання силових контактів пускача КМ2 виконано таким чином, що при його спрацьовуванні фази «В» і «С» змінюються місцями: фаза «В» через середній контакт подається на обмотку №3, а фаза «С» – через крайній лівий подається на обмотку № 2. Фаза "А" залишається без змін (рис. 6.38, б).

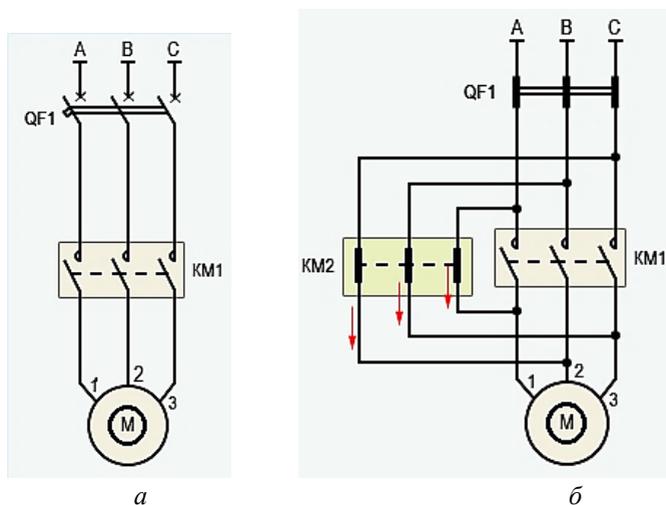


Рисунок 6.38 – Схема під'єднання головних контактів пускача для реверсу двигуна

Захист силових кіл від короткого замикання або захист від непередбачуваних ситуацій. Як відомо, перш ніж змінити обертання двигуна, його потрібно зупинити. Але не завжди так виходить, тому що ніхто не застрахований від помилок. І ось уявіть ситуацію, коли немає захисту. Двигун обертається вліво, пускач КМ1 знаходиться у роботі, та з його виводів струми всіх трьох фаз надходять на обмотки, кожна на свою. Тепер, не

відключаючи пускач КМ1, ми включаємо пускач КМ2. Фази "В" і "С", які ми поміняли місцями для реверсу, зустрінуться на виході пускача КМ1. Тоді відбудеться замикання між фазами «В» та «С». А для того, щоб цього не трапилося, у схемі використовують нормально-замкнені контакти пускачів, які встановлюють перед котушками цих же пускачів, і таким чином виключається можливість включення одного магнітного пускача поки не буде знеструмлений інший.

Для Вашого уявлення перегляньте відеоролик про підключення реверсивного магнітного пускача за посиланням <https://www.youtube.com/watch?v=URHgYTH3alo>.

6.5 Тиристорні контактори та пускачі

Поряд з контактними комутаційними апаратами промисловістю виробляються та експлуатуються в електроустановках апарати на напівпровідникових пристроях, зокрема тиристорні контактори та пускачі. Вони використовуються для пуску, реверсу та відключення асинхронних двигунів, інших активних та активно-індуктивних навантажень.

6.5.1 Тиристорні контактори

Робота тиристорних контакторів заснована на властивості тиристорів в широких межах змінювати провідність та знаходитись у двох станах: включеному та виключеному. Включення тиристора здійснюється сигналами управління, а відключення при зниженні анодного струму до струму вдержання (практично до нульового значення). Зокрема, в колах змінного струму це відбувається при природному переході струму через нульове значення. Тиристор може проводити струм впродовж одного напівперіоду, тому для управління навантаженням у кожній фазі апарату вмикають по два тиристора зустрічно-паралельно. Тиристорні контактори використовують як для однофазних, так і для трифазних навантажень, а виконані можуть

бути на тиристорах, симісторах та діодах. Варіанти схем силових тиристорних ключів надані на рис. 6.39 та 6.40.

Кожний з тиристорів пропускає струм на протязі одного напівперіоду, тому допустимий струм через навантаження має діюче значення таке:

$$I_n \leq \frac{\pi}{\sqrt{2}} I_{тип}$$

де $I_{тип}$ – допустиме середнє значення струму через тиристор.

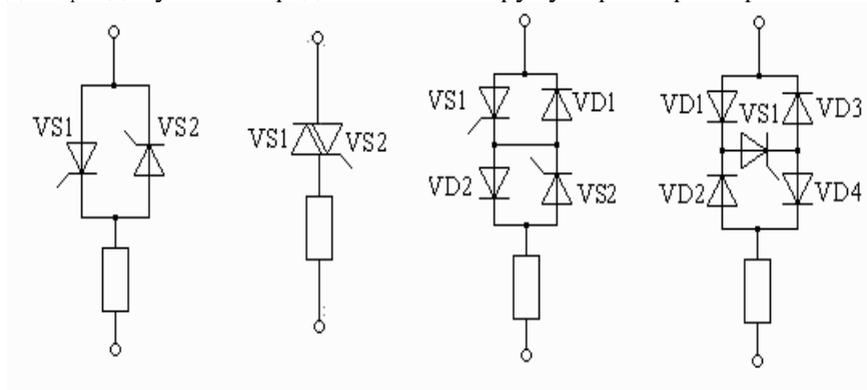


Рисунок 6.39 – Принципіальні схеми однофазних тиристорних ключів змінного струму

Для схем із симісторами та тиристорами, що проводять струм протягом двох напівперіодів, допустимий струм навантаження такий:

$$I_n \leq \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{тип}$$

Максимальна зворотна напруга тиристора має бути не менша за амплітудне значення напруги мережі:

$$U_{обр} \geq K_3 \sqrt{2} U_c$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, враховуючий можливі комутаційні перенапруження напруження у мережі.

Для комутуючих пристроїв із зустрічно-паралельним включенням тиристорів, яке використовується найбільш часто, простий та ефективний пристрій управління може бути створений шляхом з'єднання управляючих електродів з їх анодами (або управляючих електродів між собою, що, з точки зору процесу, що триває, майже еквівалентно) за допомогою будь-якого ключа.

При цьому анодна напруга, прикладена до тиристорів, є джерелом імпульсів керування. Принципова схема такого пристрою надана на рисунку 6.41.

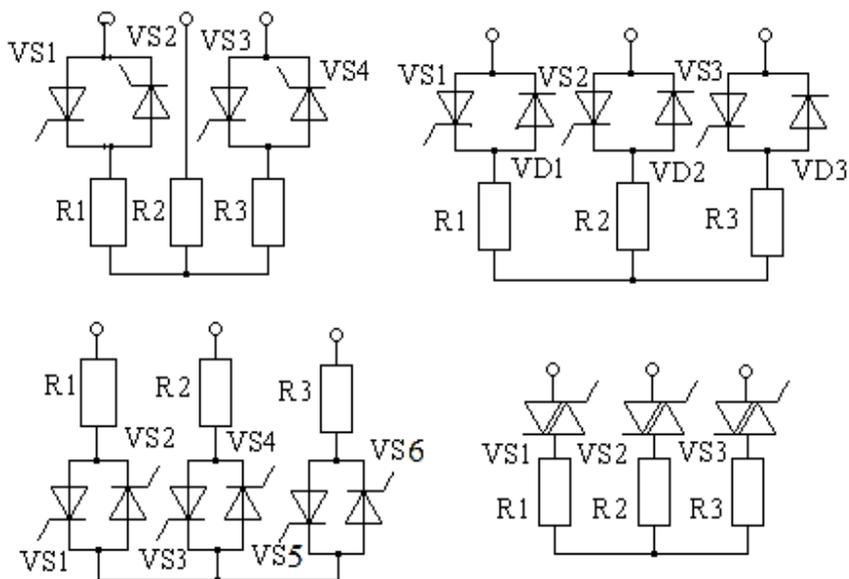


Рисунок 6.40 – Схема трифазних тиристорних ключів змінного струму

При замиканні ключа К у напівперіод провідності тиристора VS1, під дією напруги живлення позитивної полярності у колі

управляющего электрода цього тиристора піде струм таким колом: $A \rightarrow VD2 \rightarrow R \rightarrow K \rightarrow VS1 \rightarrow Z \rightarrow B$.

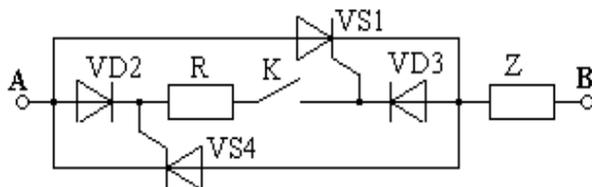


Рисунок 6.41 – Схема тиристорного ключа

Після досягнення струму у цьому колі величини, достатньої для включення тиристора VS1, останній включається. Починаючи з цього моменту, напруга на тиристорах стає такою, що дорівнює прямому падінню напруги на тиристорі VS1, струм у колі керування практично зникає, але тиристор залишається у провідному стані до кінця напівперіоду. В кінці напівперіоду струм навантаження, що протікає крізь тиристор VS1, зменшується до нуля, після чого тиристор закривається до наступної подачі чергового імпульсу керування. В черговий напівперіод аналогічний процес відбуватиметься з тиристором VS4. Через ключ K протікають короткі імпульси струму, амплітуда яких дорівнює значенню струму включення тиристора, а їх тривалість може бути визначена (для активного навантаження) за формулою:

$$t_u = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{I_{вкл} (R + R_n)}{U_{с макс}}$$

Часовий проміжок між початком напівперіоду та моментом включення тиристора називається кутом управління тиристора α . При комутації номінальних навантажень величину α встановлюють мінімальною. При перевантаженнях для зниження струму до допустимих величин α збільшується. Крива струму з активним навантаженням аналогічна кривій напруги на навантаженні, рис. 6.42, а.

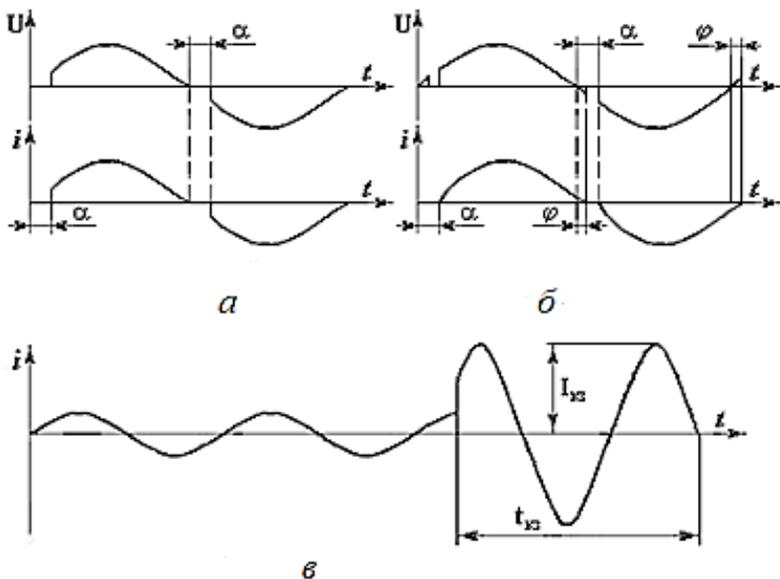


Рисунок 6.42 – Напруги та струми, які комутуються тиристорами:

a – при активній навантаженні; *б* – при активно-індуктивному навантаженні; *в* – при відключенні короткого замикання.

В колах з активно-індуктивним навантаженням струм відстає по фазі від напруги, завдяки цьому крива струму не співпадає за формою з кривою напруги на навантаженні. Струм протікає й після переходу напруги мережі через нульове значення, внаслідок чого безструмова пауза скорочується (рис. 6.42, б).

При виникненні короткого замикання відключення комутатора виконується зняттям імпульсів керування з тиристорів, тобто відключенням їх кола управління. Час відключення струмів короткого замикання тиристорним комутатором менший порівняно з контактним апаратом, оскільки струм у тиристорі при відсутності імпульсів керування протікає менше одного півперіоду мережі живлення. До повного часу відключення короткого замикання входить також час спрацьовування елементів кола захисту.

6.5.2 Тиристорні пускачі

Специфічні види пускачів крім типових завдань через свій функціонал, можуть використовуватися і в більш специфічних умовах. Розглянемо їх коротко на прикладі тиристорного пускача, вибухозахищених комутаторів типу ПВР-125р, також ПВИ-250 В, підключення через контактори терморегуляторів та організація автоматичного вводу резерву (АВР).

Особливість даного типу пускових реле у тому, що у них використовується метод прямого фізичного розриву кола. Тобто вони є безконтактними і в принципі позбавлені ключових недоліків звичних пристроїв (механічного зносу контактів, утворення дуги тощо). Правильно включити електродвигун можна на тиристорних пристроях (ПТ), схема підключення яких наведена на рис. 6.43.

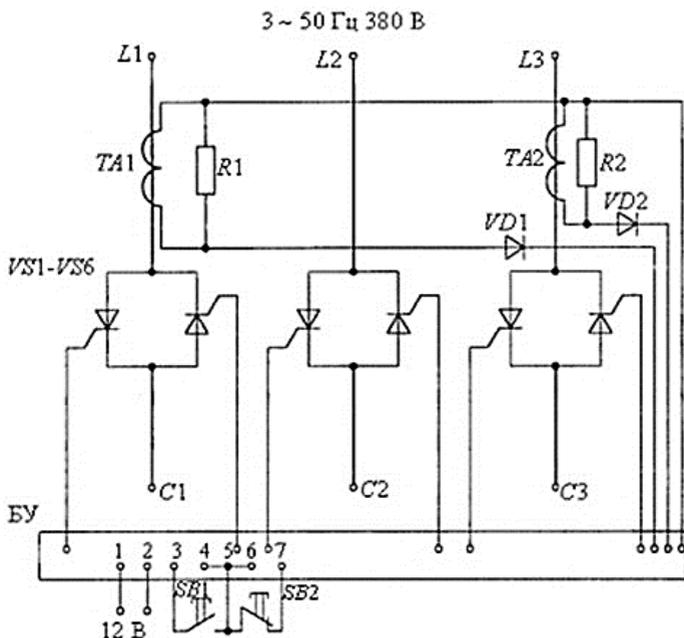


Рисунок 6.43 – Схема підключення тиристорних пускачів [89, 90]

В електричному колі задіяні наступні елементи:

- L1, L2, L3 – фазні дроти (полюси);
- ТА1, ТА 2 – трансформатори струми;
- R1, R 2 – резистори;
- VD1, VD 2 – транзистори;
- VS1...VS6 – тиристори;
- БУ – блок керування;
- SB1, SB2 – кнопки «Пуск» и «Стоп».

Електродвигуни використовуються також на різних гірничодобувних підприємствах, шахтах тощо, де зберігається потенційна вибухонебезпечна обстановка, запиленість та інші негативні фактори. Отже, виконання пускових пристроїв має передбачати перелічені ситуації. У таких умовах застосовують релейні модулі ПВР-125р і ПВІ-250 В(БТ) (рис. 6.44).



Рисунок 6.44 – Пускач ПВР-125р [89]

Пускач типу ПВР є реверсивним модульним блоком, який монтується у вибухозахищеному корпусі. Він використовується для введення в роботу трифазних електродвигунів різноманітної гірничодобувної техніки, що працює у виробленні вугільних шахт. До ПВР пред'являються особливі вимоги щодо протидії метану і пилу.

Пускач ПВИ-250 В (БТ, Д) використовується в таких же умовах, як і ПВР, але виходячи з маркування має ще й захист від іскри. Призначений для включення та вимикання двигунів шахтної техніки. За його допомогою забезпечується додатковий захист від можливих коротких замикань чи перевантажень у електричній мережі (рис. 6.45).

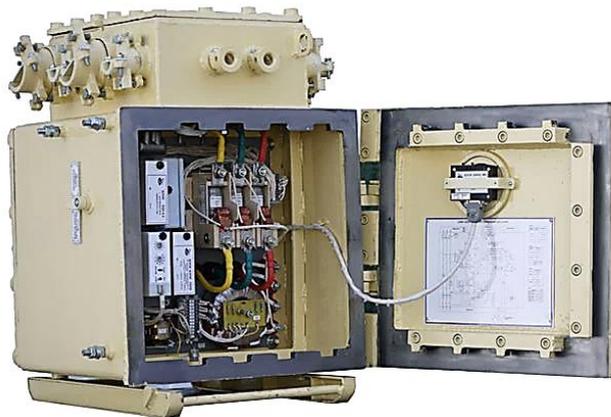


Рисунок 6.45 – Пускач ПВИ-250 В [89]

Ще одним випадком, коли затребуване використання комутаторів є облаштування систем АВР (аварійного введення резерву). Таким чином підвищується надійність електропостачання, оскільки існує щонайменше два його джерела. Правильно організувати вузол введення на АВР можна за такою схемою (рис. 6.46). Тут можна бачити два джерела живлення (1 та 2), автоматичні вимикачі на кожній з ліній (АВ1, АВ2), пускачі та їх контактні вузли (ПМ1 та ПМ2). На випадок, якщо джерела електроенергії є повністю незалежними (наприклад, одна з ліній йде від іншого постачальника електроенергії), у схемі передбачено реле контролю напруги РКН, яке вибирає гарантовану лінію вводу.

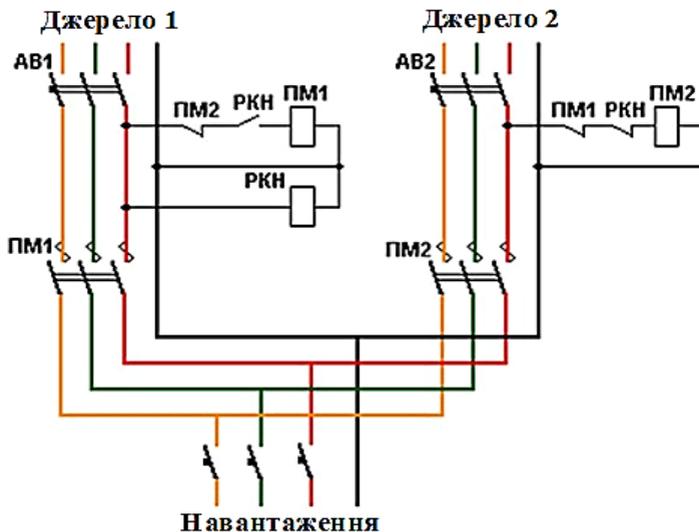


Рисунок 6.46 – Схема формування АВР на пускачах [90]

6.6 Гібридні контактори

Гібридними комутаційними апаратами називаються комбіновані апарати для комутації електричних кіл шляхом спільної роботи електронних ключів та механічних контактів.

Мета такої комбінації – поєднання корисних якостей електромеханічних та електронних апаратів, а також досягнення нових характеристик із покращеними техніко-економічними показниками. Механічні контакти в замкненому стані мають мале падіння напруги при протіканні струму і мають досить високий опір в розімкненому стані. Електронні ключі виконують бездугову комутацію, забезпечують високу швидкодію та дозволяють регулювати параметри електроенергії.

Приклад найпростішої схеми гібридного апарату постійного струму, що реалізує швидкодію тиристора, наведено на рис. 6.47. При подачі імпульсу керування на тиристор відбувається практично миттєве підключення навантаження Z_n до джерела напруги E . Потім відбувається замикання механічних контактів K ,

які шунтують тиристор. Діаграма струмів наведено на рис. 6.47, б. У момент часу t_0 відбувається включення тиристора, через нього починає протікати струм навантаження i_n . Потім у момент часу t_1 цей струм переходить у електромеханічні контакти, опір яких на декілька порядків менше, ніж прямий опір тиристора, що проводить. Така схема може бути успішно використана для швидкого підключення резервних джерел постійного струму, наприклад акумуляторної батареї. Принцип гібридної комутації проілюстровано на рис. 6.47 [75].

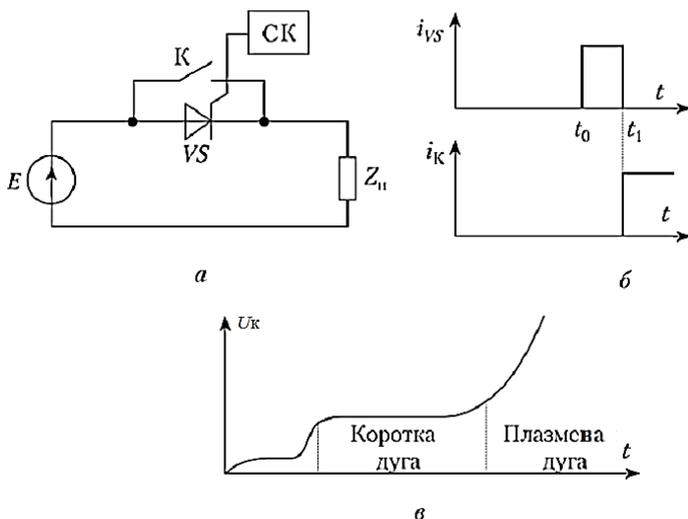


Рисунок 6.47 – Принцип гібридної комутації: а - принципова схема; б - діаграми струму; в - графік дугоутворення на контактах

Гібридні апарати відрізняються за видом електронного ключа (транзисторні, тиристорні та ін.), а також за способом з'єднання його з механічними контактами: паралельні, послідовні та паралельно-послідовні.

Звичайні тиристори застосовуються в гібридних апаратах постійного струму нечасто через те, що їх виключення потребує примусової комутації. Тому в якості статичних електронних ключів зазвичай використовуються повністю керовані ключі: транзистори всіх різновидів або тиристори, що замикаються.

Принцип роботи різних комбінацій механічних контактів з електронними ключами розглянемо з прикладу схем гібридних контакторів.

На рис. 6.48 наведено спрощену схему гібридного контактора з паралельним з'єднанням транзисторів і контактів. Контакти змінюють стан за допомогою електромагнітного приводу, як і в звичайних контакторах. Увімкнення апарата відбувається у наступній послідовності. У момент часу t_1 система керування СК формує сигнали на включення транзистора VT і контакту К. Транзистор включається практично миттєво, і через нього починає протікати струм навантаження i_H , який зазвичай має активно-індуктивний характер. У цьому випадку струм i_H плавно нарощуватиметься по експоненційному закону до значення, що встановилося. З затримкою часу, обумовлену інерційністю електромагнітного приводу, в момент часу t_2 , замикаються контакти, і транзистор VT шунтується. В результаті струм навантаження i_H переходить на контакт К. Після цього підтримувати транзистор у увімкненому стані необов'язково.

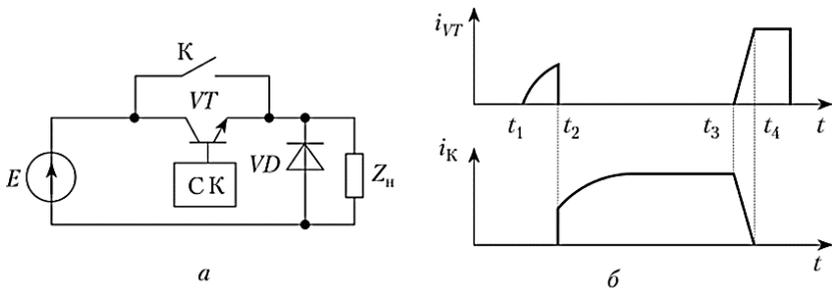


Рисунок 6.48 – Гібридний контактор паралельного типу:
 а – принципова схема; б – діаграми струмів.

Для вимикання контактора необхідно в СК сформувати сигнали на включення транзистора VT і вимикання контактів К. При подачі цих сигналів в момент часу t_3 транзистор VT є підготовленим до проходження по ньому струму, а контакт К під впливом електромагнітного приводу починає розмикатися. У початковий період розмикання контактів, якими протікає струм

навантаження, виникає коротка електрична дуга. На рис. 6.48, б показано початкову ділянку характеристики зміни напруги на контактах К під час їх розмикання. З урахуванням швидкодії транзистора перехід струму з контакту у транзистор можна вважати практично миттєвим (часові затримки пов'язані з паразитними індуктивностями конструкції). Після завершення переходу струму i_n в транзистор контакти К контактора продовжують розмикатися, але вже у знеструмленому стані. В результаті в контакт К не розвивається процес плазмової дуги. Якщо врахувати, що замикання контактів відбувалося при низькій напрузі, яка дорівнює напрузі насиченого транзистора, то можна сказати, що всі процеси комутації (при вмиканні і вимкненні) відбуваються в полегшеному для електромеханічного контактора режимі. В результаті досягається мінімальне електричне зношування контактів і, відповідно, збільшення ресурсу їх роботи. Крім того, відсутність дугоутворення дозволяє значно спростити конструкцію контактної системи та приводу.

Після закінчення розмикання контакту К моменту часу t_4 припиняється подача імпульсу вмикання на транзистор VT, і джерело E виявляється відключеним від навантаження Z_n . При активно-індуктивному навантаженні струм після вимкнення транзистора VT протікає через зворотний діод VD (рис. 6.48, а). Таким чином, у гібридному контакторі з паралельним з'єднанням контакту та електронного ключа зберігаються швидкодія на включення, властиве електронним апаратам, та низькі втрати потужності у включеному стані, характерні для електромагнітних контакторів. Однак ця схема не забезпечує високий опір ізоляції між джерелом та споживачем у розімкненому стані, властиве контактним апаратам, і не забезпечує високої швидкодії при вимкненні кола, що важливо для виконання функцій захисту при аварійних режимах роботи. Ці завдання дозволяє вирішити варіант із послідовним з'єднанням.

Схема силової частини гібридного контактора постійного струму з послідовним з'єднанням транзистора та електромеханічного контакту наведено на рис. 6.49.

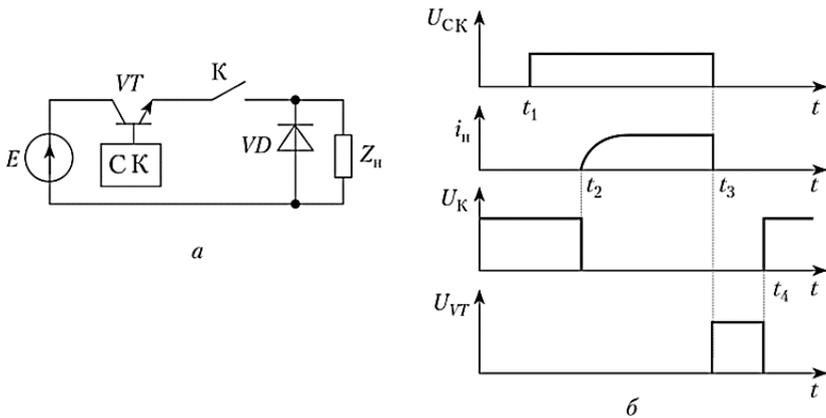


Рисунок 6.49 – Гібридний контактор послідовного типу:
 а – принципова схема; б – діаграми струмів та напруги.

У початковому стані гібридний контактор вимкнений і напруга джерела E прикладена до розімкнених контактів K , тому що їх опір значно більше опору вимкненого транзистора VT . При включенні гібридного контактора в момент часу t_1 у CK формуються сигнали на замикання контакту K з деякою затримкою включення транзистора VT . Після замикання контактів K в момент часу t_2 на транзисторі з'являється пряма напруга, і потім він системою керування переводиться в провідний стан в режимі насичення. Для вимкнення контактора CK формує сигнали на вимкнення транзистора VT та розмикання контактів K . Завдяки швидкодії першим (у момент часу t_3) транзистор VT вимикається і відключає навантаження Z_n від джерела напруги E . Струм активно-індуктивного навантаження починає протікати через зворотний діод VD . Потім, на момент часу t_4 , контакти K розмикаються. Розмикання контактів K як при вимкненні апарату, так само і при їх замиканні, відбувається без струмового навантаження, тобто у режимі холостого ходу.

В результаті дугоутворення на контактах не виникає, і їхня електрична зносостійкість істотно зростає. З принципу дії гібридного апарату з послідовним з'єднанням випливає, що це рішення дозволяє реалізувати швидкодію електронних ключів при вимкненні. У той же час не усуваються значні втрати потужності

у ввімкненому апараті, оскільки електронний ключ безперервно проводить струм навантаження.

Частково переваги розглянутих схем гібридних апаратів поєднує варіант із паралельно-послідовним з'єднанням контактів та електронного ключа, наведений на рис. 6.50, *a*. Цей гібридний контактор має два механічні контакти $K1$ та $K2$. Один з них ($K1$) підключений паралельно до транзистора, а інший ($K2$) — послідовно. Ці контакти можуть мати загальний привід, але при цьому повинна забезпечуватися затримка на розмикання та випередження на замикання контакту $K1$ щодо контакту $K2$, що впливає із принципу дії гібридного апарату [53].

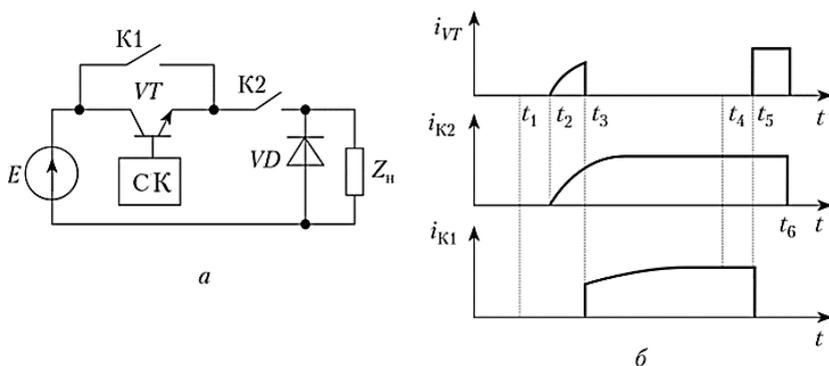


Рисунок 6.50 – Гібридний контактор паралельно-послідовного типу:

a – принципова схема; *б* – діаграми струмів.

Розглянемо послідовність операцій при комутації апарату (рис. 6.50, *б*). У стані «вимкнено» обидва контакти розімкнені і транзистор вимкнено. Для включення контактора в момент часу t_1 система керування формує імпульси на включення транзистора VT і замикання контактів $K1$ і $K2$. Першим повинен замкнутися контакт $K2$, після чого практично миттєво переходить у стан транзистор VT , що проводить, так як на нього подано відповідний сигнал керування. Потім момент часу t_3 замикаються контакти $K1$,

і струм навантаження переходить з транзистора в коло контакту К1. На цьому включення гібридного апарату закінчується.

Вимкнення контактора відбувається в такий спосіб. У момент часу t_4 формуються сигнали розмикання контактів К1 і К2. Спочатку починає розмикатися контакт К1, і в момент t_5 струм переходить на транзистор VT. При цьому протікають такі самі процеси, що і в контакторі з паралельним з'єднанням контактів і транзистора. Після переходу струму навантаження на транзистор VT в момент часу t_6 формується сигнал на вимкнення транзистора, і джерело напруги E залишається відключеним від навантаження, а зворотний діод VD створює шлях для спадання струму при активно-індуктивному навантаженні. Потім відбувається розмикання контактів К2, і схема переходить у вимкнений стан. Варіант з паралельно-последовним з'єднанням поєднує переваги гібридних апаратів тільки з паралельним та з последовним з'єднанням, крім одного – швидкодії при вимкненні, властивому контактору з последовним з'єднанням. Це обмежує сферу його використання.

6.7 Контрольні питання

6.7.1. Чим відрізняється контактор від магнітного пускача?

6.7.2. Що таке провал контактів і для чого він необхідний?

6.7.3. Для чого необхідне попереднє натискання контактної пружини?

6.7.4. Який зв'язок між комутаційною зносостійкістю та провалом контактів?

6.7.5. Яким чином найбільш оптимально повинна розташовуватися тягова характеристика по відношенню до протидіючих характеристик контактора або пускача?

6.7.6. Поясніть основні відмінності між системами последовного та паралельного магнітного дуття.

6.7.7. Яким чином у магнітному пускачі здійснюється захист від струмів перевантаження?

6.7.8. Як визначити напрямок переміщення дуги в дугогасному пристрої при застосуванні магнітного дуття?

6.7.9. Дати визначення магнітного пускача.

6.7.10. Записати категорії застосування магнітних пускачів та особливості їх застосування.

6.7.11. Зобразити нормально розімкнений (NO) та нормально замкнений (NC) контакти у неробочому стані та записати, що це означає?

6.7.12. Яка інформація вказується на бічній стороні магнітного пускача?

6.7.13. Який принцип роботи магнітного пускача?

6.7.14. Зобразити класичну схему прямого включення трифазного електродвигуна з магнітним пускачем та описати принцип її роботи.

6.7.15. У яких випадках та з якою метою використовується контактна приставка?

6.7.16. Принцип роботи тиристорних ключів змінного струму керованого від контактів.

6.7.17. Принцип роботи тиристорних ключів змінного струму керованого від генератора імпульсів.

6.7.19. Переваги та недоліки тиристорних контакторів змінного струму у порівнянні з контактними.

6.7.20. Чому генератор керуючих імпульсів працює на високій частоті?

6.7.21. Які схеми однофазних (трифазних) контакторів існують?

6.7.22. Поясніть принцип роботи електромагнітного захисту тиристорного пускача.

6.7.23. Що називають гібридним електричним апаратом?

6.7.24. Перерахуйте переваги та недоліки гібридних апаратів. Яке їхнє функціональне призначення?

6.7.25. Поясніть роботу гібридного контактора.

6.7.26. Який захист гібридних контакторів від струмів короткого замикання?

7 ВИМИКАЧІ

7.1 Класифікація вимикачів низької напруги

Автоматичні вимикачі (вимикачі, автомати) є комутаційними електричними апаратами, призначеними для проведення струму кола в нормальних режимах та для автоматичного захисту електричних мереж та обладнання від аварійних режимів (струмів короткого замикання, струмів перевантаження, зниження або зникнення напруги, зміни напрямку струму, виникнення магнітного поля потужних генераторів в аварійних умовах тощо), а також для нечастої комутації номінальних струмів (6-30 разів на добу). Ці апарати відносяться до комутаційних апаратів ручного керування, проте багато типів мають електромагнітний або електрорухомиий привод, що дає змогу керувати ними на відстані.

Нагадаємо, що термін «електрична апаратура комутації та керування» означає сукупність електричних апаратів, їх комбінацій (комплектних пристроїв) та приєданого обладнання, що призначені для комутації електричних кіл, керування технологічними процесами та для захисту електричного кола від перевантаження та струмів короткого замикання. Головною відмінністю автоматів від плавкої вставки – це можливість багаторазового використання та стабільність заданого граничного (порогового) значення (уставки) спрацьовування [34, 45, 55, 72, 75]. Завдяки простоті, зручності, безпеці обслуговування та надійності захисту від струмів короткого замикання ці апарати широко застосовуються для електричного обладнання малої та великої потужності.

Вимоги до автоматичних вимикачів сформульовано в ДСТУ 3025-95 [20] встановлює наступну класифікацію автоматичних вимикачів:

За родом струму головного кола:

- постійного струму;
- змінного струму;
- постійного та змінного струму.

Номінальні струми головних кіл вимикачів, призначених для роботи за температури навколишнього повітря +40 °С, повинні

відповідати ГОСТ 1516.2-97 [15]. Номінальні струми для головних кіл вимикача вибирають з ряду: 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 2000; 4000; 6300 А.

Додатково можуть випускатися вимикачі на номінальні струми головних кіл вимикачів: 1500; 3000; 3200 А. Номінальні струми максимальних розчіплювачів вимикачів, призначених для роботи за температури навколишнього повітря +40 °С, повинні відповідати ДСТУ 3025-95 [20]. Допускаються номінальні струми максимальних розчіплювачів струму: 15; 45; 120; 150; 300; 320; 600; 1200; 1500; 2000; 3000; 3200 А.

За конструкцією існують наступні типи або різновиди автоматичних вимикачів (див. рис. 7.1):

- повітряні автоматичні вимикачі (англ. Air Circuit Breaker, скорочено – АСВ) зі струмами від 800 А до 6300 А;

- вимикачі у литому корпусі (англ. Moulded-Case Circuit-Breaker – МССВ) зі струмами від 10 А до 2500 А.

Промислові автоматичні вимикачі у корпусі (АСВ та МССВ) призначені для захисту розподільчих мереж 50/60 Гц з напругою до 660 В та робочим струмом до 1600 А. Застосовуються у великих щитових підстанціях та на виробництві для підключення потужного обладнання або як головний ввідний автоматичний вимикач, а також для захисту електричних двигунів (МССВ). Також має місце морського застосування на судах, а також для постачання на експорт до країн з помірним та тропічним кліматом.;

- модульні автоматичні вимикачі (англ. Miniature Circuit-Breaker – МСВ) зі струмами від 0,5 А до 125 А призначені для розміщення у монтажній панелі (в електричний щиток) на DIN-рейку. Застосовується для захисту у побутових цілях, а також у комерційних та промислових мережах енергорозподілу;

- апарати, які позначаються абрєвіатурою RCCB (англ. Residual Current operated Circuit-Breaker without integral overcurrent protection) або RCD (residual current device), раніше в технічній літературі позначалися абрєвіатурою УЗО (рос. Устройство Защитного Отключения).

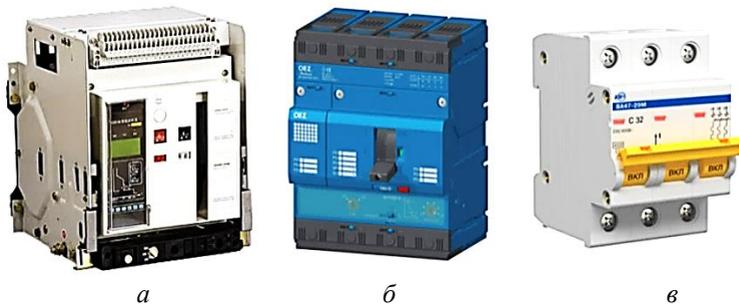


Рисунок 7.1 – Типи та види автоматичних вимикачів [93]:

a – повітряний автоматичний вимикач (АСВ); *б* – вимикач в литому корпусі (МССВ); *в* – модульний автоматичний вимикач (МСВ).

За кількістю полюсів головного кола:

- однополюсні;
- двополюсні;
- триполюсні;
- чотириполюсні.

За наявності струмообмеження:

- струмообмежувальні;
- неструмообмежувальні.

Струмообмежувальні вимикачі обмежують значення струму КЗ за допомогою швидкого введення в ланцюг додаткового опору електричної дуги (у перший же напівперіод, до того, як струм КЗ значно зростає) і подальшого швидкого відключення КЗ. При цьому струм КЗ не досягає очікуваного розрахункового максимального значення струмообмеження починається з деякого значення струму, що визначається характеристикою струмообмеження. Наприклад, у струмообмежувальних автоматах серії А3700Б при великих очікуваних струмах КЗ контакти, що мають спеціальну конструкцію, відразу ж відкидаються електродинамічними силами, вводячи в ланцюг опір дуги, і потім вже не стикаються, через вчасне скидання електромагнітним розчіплювачем. При малих струмах КЗ контакти не відкидаються, а відключення проводиться так само розчіплювачем [80].

Неструмообмежувальні вимикачі не обмежують струм КЗ в колі, і він може досягати максимального очікуваного значення .

За видами розчіплювачів:

– з надструмовим розчіплювачем – це може бути розчіплювач для захисту від перевантажень, яким зазвичай є тепловий розчіплювач, або розчіплювач для захисту від коротких замикань, тобто розчіплювач миттєвої дії, яким зазвичай є електромагніт, і який у вітчизняній технічній літературі часто називають максимальним розчіплювачем струму;

– з шунтовим або незалежним розчіплювачем – для забезпечення спрацьовування вимикача по команді ззовні;

– з мінімальним або нульовим розчіплювачем напруги – це розчіплювач зниження напруги, що забезпечує я спрацьовування (виконання операції розмикання) вимикача при зниженні напруги живлення нижче певного рівня;

– з напівпровідниковими розчіплювачами, які мають вимірювальний елемент, блок напівпровідникових реле та вихідний електромагніт, що впливає на механізм вільного розчіплення автомата. Вимірювальним елементом можуть бути або трансформатор струму (на змінному струмі), або дросельний магнітний підсилювач (на постійному струмі). Останнім часом все більшого поширення набувають електронні розчіплювачі з мікропроцесорним керуванням (мікроконтролером).

У багатьох автоматах застосовують комбіновані розчіплювачі, що використовують теплові елементи для захисту від струмів перевантажень та електромагнітні для захисту від струмів коротких замикань без витримки часу (відсікання). Вимикач має також додаткові складальні одиниці, які вбудовуються у вимикач або кріпляться до нього зовні. Ними можуть бути незалежний, нульовий та мінімальний розчіплювачі, вільні та допоміжні контакти, ручний та електромагнітний дистанційний привід, сигналізація автоматичного відключення, пристрій для замикання вимикача у положенні «відключено». Незалежний розчіплювач є електромагніт з живленням від стороннього джерела напруги. Мінімальний та нульовий розчіплювачі можуть виконуватися з витримкою часу та без

витримки часу. За допомогою незалежного або мінімального розчіплювача можливе дистанційне вимкнення автомата.

Розчіплювачі можуть мати можливість регулювання або не мати такої можливості.

За характеристикою витримки часу максимальних розчіплювачів струму:

- без витримки часу;
- з витримкою часу, незалежною від струму;
- з витримкою часу, обернено залежною від струму;
- із поєднанням зазначених характеристик.

Оскільки вимкнення апарату може відбуватися без витримки часу або з витримкою, то за власним часом відключення $t_{c\cdot\text{відм}}$ (проміжок часу від моменту, коли контрольований параметр перебільшив встановлене для нього значення, до моменту початку розходження контактів) розрізняють нормальні вимикачі ($t_{c\cdot\text{відм}} = 0,02 \dots 1$ с), вимикачі з витримкою часу (селективні) та швидкодіючі вимикачі ($t_{c\cdot\text{відм}} < 0,005$ с).

За наявності вільних контактів (блок-контактів) для вторинних кіл:

- з контактами;
- без контактів.

За способом приєднання зовнішніх провідників:

- із заднім приєднанням;
- з переднім приєднанням;
- з комбінованим приєднанням (верхні затискачі із заднім приєднанням, а нижні – з переднім приєднанням або навпаки);
- з універсальним приєднанням (переднім та заднім).

За видом монтування (установки):

- втичні;
- викотні;
- стаціонарні.

Стаціонарні вимикачі монтуються безпосередньо у розподільчому пристрої. Втичні та викотні вимикачі складаються з основи з розетковими контактами, яка монтується у розподільчому пристрої, та власне вимикача із штирьовими контактами, розташованими на задній поверхні корпусу. Для

приєднання втичного вимикача його достатньо втикнути в основу. Основа викотного вимикача має спеціальну консоль для навішування при монтуванні вимикача, який за допомогою спеціальної рукоятки вкочується в основу і приєднується до відповідного кола у розподільчому пристрої (див. таблицю 6.1).

За видом виконання відсічення:

- селективні,
- неселективні.

За видом приводу:

- з ручним;
- з руховим;
- з пружинним.

Привод автоматичного вимикача служить для включення, автоматичного відключення і може бути ручним безпосередньої дії та дистанційним (електромагнітним, пневматичним тощо).

За наявністю та ступенем захисту вимикача від впливу навколишнього середовища та від зіткнення з частинами вимикача, що знаходяться під напругою, та його рухомими частинами, розташованими всередині оболонки (відповідно до вимог ДСТУ 3025-95 [21]):

- захищене;
- незахищене.

Автоматичні вимикачі поділяються на:

– *установчі* автоматичні вимикачі, які мають захисний ізоляційний (пластмасовий) корпус і можуть встановлюватися в загальнодоступних місцях;

– *універсальні* – не мають такого корпусу та призначені для встановлення в розподільчих пристроях;

– *швидкодійні* (власний час спрацьовування не перевищує 5 мс);

– *нешвидкодійні* (від 10 до 100 мс);

– *автомати зворотного струму*, що спрацьовують тільки при зміні напрямку струму в колі, що захищається;

– *селективні*, що мають регульований час спрацьовування у зоні струмів короткого замикання з регульованою витримкою часу до 1 с;

– *поляризовані* автомати відключають коло лише при наростанні струму в прямому напрямку, *неполяризовані* – при струмі будь-якого напрямку.

Швидкодія вимикачів забезпечується самим принципом дії (поляризований електромагнітний або індукційно-динамічний принципи та інші), а також умовами для швидкого гасіння електричної дуги. Такий принцип використовується в струмообмежувальних автоматах.

7.2 Конструкція та принцип роботи автоматичних вимикачів

Будь-який автоматичний вимикач, незалежно від того, скільки він має полюсів, обов'язково мають наступні конструктивні вузли:

- головну контактну систему;
- дугогасну систему;
- привод пристрою розчіплення,
- розчіплювач (переривник, переривники);
- допоміжні контакти (необов'язково).

Перш ніж з'ясувати, як працює автоматичний вимикач, розберемо призначення та принцип дії його основних вузлів – електромагнітного розчіплювача, теплового розчіплювача, дугогасної камери, механізму взводу та розчіплення.

Контактна система може бути триступінчастою (з головними, проміжними та дугогасними контактами), двоступінчастою (з головними та дугогасними контактами) та одноступінчастою (при використанні металокераміки).

Дугогасна система автомата призначена для гасіння дуги, що виникає при відключенні автомата. Широко застосовують дугогасні камери зі сталевими пластинами (ефект розподілу довгої дуги на короткі). При великих струмах, що відключаються, застосовують поздовжньо-щілинні та лабіринтно-щілинні камери, де використовується ефект гасіння дуги у вузькій щілині. Матеріал камери повинен мати високу дугостійкість.

Комбіновані дугогасні пристрої – щілинні камери у поєднанні з дугогасними решітками – застосовують для гасіння дуги при великих струмах.

Для кожного окремого виконання автоматичного вимикача існує граничний струм короткого замикання, який гарантовано не призводить до виходу з ладу автомата. Перевищення цього струму може спричинити спалювання або зварювання контактів. Наприклад, у популярних серіях побутових автоматів при струмі спрацьовування від 6А до 50 А граничний струм зазвичай становить від 1000 А до 10000 А.

Також автоматичні вимикачі можуть мати реле прямої дії, які називаються переривниками.

Всі перераховані вище типи автоматичних вимикачів мають свої характеристики для певних параметрів спрацьовування.

Кожний полюс, крім терміналів, контактів та дугогасних систем має окремі розчіплювачі для захисту від коротких замикань та перевантажень (в деяких виконаннях вимикачів захист від перевантажень не передбачається). Інші елементи конструкції є спільними для усіх полюсів).

Конструктивно розчіплювачі (переривники) – це електромагнітні, електронні, мікропроцесорні або термобіметалеві елементи, що служать для відключення автоматичного вимикача через механізм вільного розчіплення при короткому замиканні, перевантаженні і зникненні напруги в первинному колі (безпосередньо: електромагнітні та термобіметалеві елементи, або електронні чи мікропроцесорні елементи). Вони вивільняють засоби утримання головних контактів у замкненому стані та дозволяють розмикання або замикання вимикача й, таким чином, здійснюють захист електричних кіл та обладнання від ненормальних режимів. У вимикачах зазвичай застосовуються розчіплювачі у вигляді електромагнітів або біметалів (рис. 7.2).

Механізм вільного розчеплення, який забезпечує спрацьовування (розмикання електричного кола) навіть у тому випадку, якщо ззовні надходить команда на замикання контактів (наприклад, актуатор механічно утримується у положенні «ввімкнене»), складається з важелів, засувок, коромисел і пружин, що відключають, і призначений для миттєвого відключення автоматичного вимикача (незалежно від положення органу включення: неможливість утримання автоматичного вимикача у включеному положенні при спрацьовуванні розчіплювача), а

також для усунення повторного включення автоматичного вимикача замикання при тривалій команді на включення.

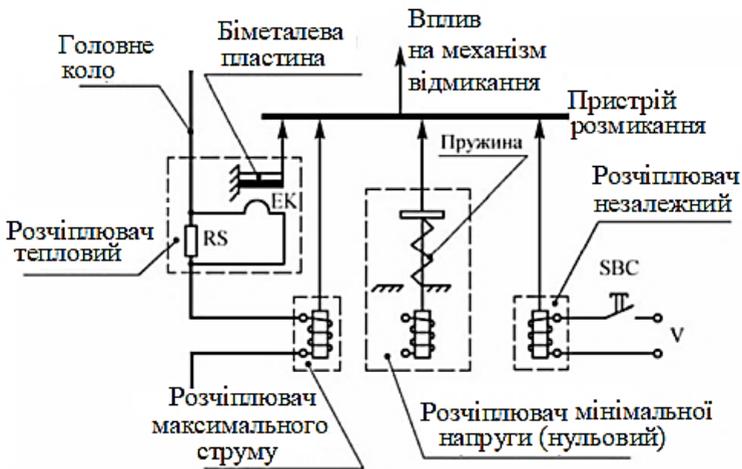


Рисунок 7.2 – Загальна конструкція механізму розчіплення [51]

Електромагнітний розчіплювач (миттєвої дії) конструктивно – це соленоїд, рухоме осердя якого також може приводити в дію механізм розчіплення (рис. 7.15). Струм, що проходить через вимикач, протікає по обмотці соленоїда і викликає втягування осердя при перевищенні заданого порога струму. Миттєвий розчіплювач, на відміну від теплового, спрацьовує дуже швидко (частки секунди), але при значно більшому перевищенні струму у 2...10 разів від номінального значення, залежно від типу (автоматичні вимикачі поділяються на типи (класи) А, В, С та D залежно від чутливості миттєвого розчіплювача). В автоматичних вимикачах на великі струми, застосовуються електронні розчіплювачі (наприклад, автоматичні вимикачі серії «Електрон», деякі типи автоматів серій А-37, ВА), а останнім часом – і мікропроцесорні розчіплювачі (мікропроцесорні блоки захисту) [3, 4, 5].

Тепловий розчіплювач – це біметалева пластина, яка нагрівається струмом, що протікає (див. п.п. 4.7). При протіканні струму вище допустимого значення біметалева пластина

згинається і приводить в дію механізм розчіплення. Час спрацьовування залежить від струму (часо-струмової характеристики [5]) і може змінюватися від секунд до години. Мінімальний струм, при якому повинен спрацьовувати тепловий розчіплювач, становить 1,45 від струму уставки теплового розчіплювача.

Налаштування струму спрацьовування зазвичай проводиться у процесі виготовлення регулювальним гвинтом. На відміну від плавкого запобіжника автоматичний вимикач готовий до наступного використання після охолодження пластини. Роль теплового розчіплювача також може виконувати електромагнітний (миттєвий) розчіплювач, оснащений гідравлічним сповільнювачем спрацьовування. Такі автоматичні вимикачі відрізняються пожежною безпекою, тому що не мають елемента, що нагрівається (біметалевої пластини) [20].

Крім перерахованих раніше, також найбільш розповсюдженими розчіплювачами, які безпосередньо вбудовуються в корпус (каркас) вимикача, є такі:

- шунтовий або незалежний розчіплювач – для забезпечення спрацьовування вимикача по команді ззовні;
- розчіплювач зниження напруги – для забезпечення спрацьовування (виконання операції розмикання) вимикача при зниженні напруги живлення нижче певного рівня.

Розчіплювачі можуть мати можливість регулювання, або не мати такої можливості.

Основними кількісними характеристиками автоматичного вимикача є номінальна робоча напруга U_e , номінальний струм I_n , тобто встановлене виробником значення струму, який вимикач може витримувати у безперервному режимі на відкритому повітрі, а також номінальна робоча здатність до відмикання коротких замикань I_{cs} та номінальна гранична здатність до відмикання коротких замикань I_{cu} . Обидві останні характеристики виражаються у кілоамперах і визначаються як значення очікуваного струму короткого замикання, який вимикач спроможний відімкнути. Різниця між I_{cs} та I_{cu} полягає в тому, що після відмикання струму I_{cs} вимикач повинен зберігати певний рівень працездатності, зазначений у стандарті ДСТУ ІЕС 60947-6-

1:2007 [25], а після відмикання струму I_{cu} вимикач може втратити працездатність.

Для вимикачів категорії В важливою кількісною характеристикою є номінальний короткочасно витримуваний струм I_{cw} – це значення струму, який вимикач має витримувати впродовж певного часу згідно з умовами випробувань, визначених стандартом ДСТУ ІЕС 60947-6-1:2007 [25].

Основною захисною характеристикою вимикача є часострумова характеристика – крива, що показує залежність часу, зокрема часу розчіплення, або часу розмикання або часу відмикання, який складається з часу розмикання та часу горіння дуги), від очікуваного струму при заданих умовах роботи. На відміну від аналогічної характеристики запобіжника, часострумова характеристика вимикача має ступінчастий характер (рис. 7.3). У зоні перевантаження захист забезпечується зазвичай біметалевим розчіплювачем, а у зоні коротких замикань – електромагнітним розчіплювачем. Границею, що розділяє зазначені зони є струм уставки I_s миттєвого розчіплювача, який не повинен спрацювати при струмі $0,8 \cdot I_s$ та спрацювати швидше ніж за 0,2 с при струмі $1,2 \cdot I_s$. Струм уставки зазвичай становить $10 \cdot I_n$ або $12 \cdot I_n$.



Рисунок 7.3 – Часо-струмова характеристика вимикача (I – очікуваний струм у колі, мс) [28]

У зоні перевантажень затримка спрацювання є зворотно-залежною від струму: час спрацювання поблизу струму уставки може бути меншим за секунду, а поблизу номінального струму може наближатися до двох годин. Відповідно до вимог стандарту

IEC 60898-1 [60] та IEC 60898-2 [61] розчіплення не повинно наставати впродовж визначеного умовного часу при струмі $1,05 \cdot I_n$ (умовний струм нерозчіплення) , а при струмі $1,3 \cdot I_n$ (умовний струм розчіплення) розчіплення має відбутися обов'язково впродовж того самого часу. Значення умовного часу визначено в IEC 60947-2 і становить дві години при $I_n > 63$ А та одну годину при $I_n \leq 63$ А.

Характеристика автомата позначається латинськими літерами: А, В, С, D, К, L, Z. Найбільшого поширення в побуті набули автоматичні вимикачі з характеристиками В, С, D. Раніше в електрообладнанні ЖКГ часто застосовувалися автомати з характеристикою L, струми спрацьовування яких укладалися в діапазон струмів автоматів з характеристикою С.

Можна пояснити залежності миттєвого розчіплювача від номінального струму (уставки) I_n апарату захисту на прикладі часо-струмових характеристик автоматичних вимикачів YON MD63 [58] згідно з ГОСТ Р 50345-2010 та МЕК 60898-1:2003 мають наступні типи характеристик (див. рис. 7.4) [60, 61]:

- захисна характеристика В – це коли електромагнітний розчіплювач спрацьовує у діапазоні від $3 \cdot I_n$ до $5 \cdot I_n$. Тепловий розчіплювач не спрацьовує протягом однієї години при струмі $1,13 \cdot I_n$, а спрацьовує протягом 1 години за струму $1,45 \cdot I_n$;

- захисна характеристика С – це коли електромагнітний розчіплювач спрацьовує у діапазоні від $5 \cdot I_n$ до $10 \cdot I_n$. Тепловий розчіплювач не спрацьовує протягом 1 години при струмі $1,13 \cdot I_n$, а спрацьовує протягом 1 години за струму $1,45 \cdot I_n$;

- захисна характеристика D – це коли електромагнітний розчіплювач спрацьовує у діапазоні від $10 \cdot I_n$ до $20 \cdot I_n$. Тепловий розчіплювач не спрацьовує протягом однієї години при струмі $1,13 \cdot I_n$, але спрацьовує протягом однієї години при струмі $1,45 \cdot I_n$;

- захисна характеристика Z – це коли електромагнітний розчіплювач спрацьовує у діапазоні від $3,2 \cdot I_n$ до $4,8 \cdot I_n$. Тепловий розчіплювач не спрацьовує протягом 1 години при струмі $1,05 \cdot I_n$, а спрацьовує протягом 1 години за струму $1,3 \cdot I_n$;

- захисна характеристика L – це коли електромагнітний розчіплювач спрацьовує у діапазоні від $6,4 \cdot I_n$ до $9,6 \cdot I_n$. Тепловий

розчіплювач не спрацьовує протягом 1 години при струмі $1,05 \cdot I_n$, але спрацьовує протягом 1 години за струму $1,3 \cdot I_n$;

– захисна характеристика К – це коли електромагнітний розчіплювач спрацьовує у діапазоні від $9,6 \cdot I_n$ до $14,4 \cdot I_n$. Тепловий розчіплювач не спрацьовує протягом 1 години при струмі $1,05 \cdot I_n$, а спрацьовує протягом 1 години за струму $1,3 \cdot I_n$.

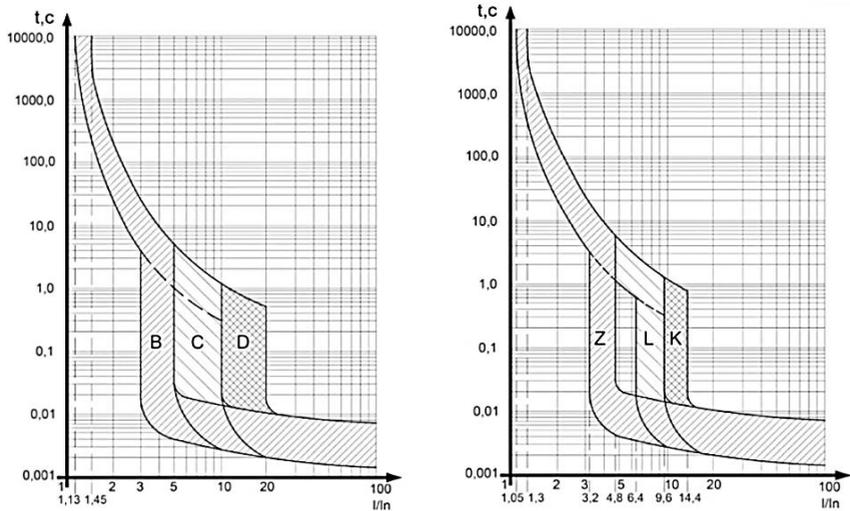


Рисунок 7.4 – Часо-струмові характеристики автоматичних вимикачів YON MD63 [58]

Отже, навіщо потрібно стільки різновидів автоматичних вимикачів з різними характеристиками? Розглянемо типові (рекомендовані) варіанти застосування вищезгаданих автоматів.

1) МА – характеризується відсутністю теплового розчіплювача, параметри миттєвого розчіплювача відповідають характеристиці А. Рекомендується для захисту від струмів короткого замикання кіл, що мають окремий захист від струмів навантаження. Наприклад, кіл живлення електродвигунів із встановленими в них максимально-струмовими реле, та інших потужних агрегатів.

2) А – характеризується найбільшою чутливістю, тобто мінімальними струмами спрацьовування. Тепловий розчіплювач

найчастіше спрацьовує за умови перевищення струму від номінального значення вимикача на 30%. Котушка електромагнітного розчеплення знеструмлює мережу протягом приблизно 0,05 секунд, якщо електрострум у колі перевищує номінальний на 100%. Якщо з будь-якої причини після збільшення сили струму вдвічі електромагнітний соленоїд не спрацював, то біметалевий розчіплювач відключає живлення протягом 20 – 30 секунд. Автомати, що мають часо-струмову характеристику А, застосовуються в мережах, в яких неприпустимі навіть короткочасні навантаження під час роботи. До таких відносяться кола з включеними до них напівпровідниковими елементами. Рекомендується для захисту відхідних ліній великої протяжності та напівпровідникових пристроїв.

В – апарати цієї категорії мають меншу чутливість, ніж такі, що відносяться до типу А. Електромагнітний розчіплювач у них спрацьовує при перевищенні номінального струму на 200%, а час на спрацьовування становить 0,015 сек. Спрацьовування біметалевої пластини у розмикачі з характеристикою В при аналогічному перевищенні номіналу вимикача займає 4...5 секунд. Обладнання цього типу рекомендується для застосування в освітлювальних колах загального призначення, для застосування в мережах, в які включені розетки, прилади освітлення та в інших колах, де пускове підвищення електроструму відсутнє або має мінімальне значення, але не підходять для кіл, що мають багато приладів з імпульсними блоками живлення, оскільки багато блоків мають великий пусковий струм.

3) С – пристрої цього типу є найпоширенішими у побутових мережах. Їхня перевантажувальна здатність ще вища, ніж у раніше описаних. Для того, щоб відбулося спрацьовування соленоїда електромагнітного розчіплювача, встановленого в такому приладі, потрібно, щоб струм, що проходить через нього, перевищив номінальну величину в 5 разів. Спрацьовування теплового розчіплювача при п'ятикратному перевищенні номінального значення апарату захисту відбувається через 15 секунд. Застосування автоматичних вимикачів з часо-струмовою характеристикою С, як ми вже зазначили, зазвичай проводиться у

побутових мережах. Вони добре виконують функцію пристроїв захисту загальної мережі, і зазвичай використовується в колах загального призначення з помірними пусковими струмами (наприклад, для живлення побутових приладів).

4) D – ці пристрої мають найвищу перевантажувальну здатність. Для спрацьовування електромагнітної котушки, встановленої в апараті такого типу, потрібно, щоб номінальне значення електроструму захисного автомата було перевищеним як мінімум в 10 разів. Спрацьовування теплового розчіплювача в такому разі відбувається через 0,4 с. Пристрої з характеристикою D найчастіше використовуються у загальних мережах будівель та споруд, де вони грають роль підстрахування. Їх спрацьовування відбувається у тому випадку, якщо не відбулося своєчасного відключення електроенергії автоматами захисту кола в окремих приміщеннях. Також їх встановлюють у колах з великою величиною пускових струмів, до яких підключені, наприклад, електродвигуни. Вони рекомендується для захисту кіл з наявністю активно-індукційного навантаження, а також можуть використовуватися для забезпечення селективності захисту розподільчих мереж, коли з будь-яких причин не можна підвищувати або знижувати номінальний струм апарату захисту.

5) K – встановлюється в колах з вираженим індуктивним навантаженням.

6) L – використовується у електрообладнанні ЖКГ.

7) Z – рекомендується для захисту мереж живлення електронних пристроїв.

Автомати із захисними характеристиками категорії K, L та Z поширені набагато менше, ніж ті, про які було зазначено вище. Прилади типу K мають великий розкид у величинах струму, що необхідні для електромагнітного розчеплення. Так, для кола змінного струму цей показник повинен перевищувати номінальне значення у 12 разів, а для постійного – у 18 разів. Спрацьовування електромагнітного соленоїда відбувається не більше ніж через 0,02 сек. Спрацьовування теплового розчіплювача в такому обладнанні може статися при перевищенні номінального струму всього на 5%. Цими особливостями обумовлено застосування пристроїв типу K у колах із винятково індуктивним навантаженням. Прилади типу

Z також мають різні значення струму спрацьовування соленоїда електромагнітного розчіплювача, але розкид при цьому не такий великий, як у вимикачів категорії К. У колах змінного струму для їх відключення перевищення струмового номіналу має бути триразовим, а в мережах постійного струму – значення струму має бути в 4,5 разів більше за номінальне. Апарати з характеристикою Z використовуються лише в лініях, до яких підключено електронні пристрої [72].

7.2.1 Повітряні автоматичні вимикачі

Повітряний автоматичний вимикач (силовий автоматичний вимикач, автоматичний вимикач) – це електричний апарат, який здатний вмикати, проводити та вимикати електричний струм. Хоча майже увесь робочий час ці апарати, які застосовуються у системах розподілення електричної енергії, знаходяться у замкненому стані і працюють при нормальних умовах в колі (у такому стані вони можуть знаходитися дні, тижні, місяці й навіть роки), основним їх призначенням є захист електрообладнання від надструмів – перевантажень та коротких замикань.

Сучасний автоматичний вимикач (автомат) повинен відповідати насамперед не тільки цим двом вимогам, але й також бути зручним та безпечним в експлуатації протягом усього терміну служби. Ці вимоги також враховують специфіку застосування окремого вимикача, таку, як частота перемикачів, підвищені вимоги до вібростійкості, вільного просторового стану, агресивне зовнішнє середовище, що прискорює корозію металу, а також вплив температури та вологості навколишнього середовища. Відключення струмів перевантаження та короткого замикання автоматичним вимикачем повинно відбуватись відповідно до заданих часо-струмових характеристик.

Структура автоматичного вимикача (як приклад розглянуто двополюсний вимикач) зображена на рис. 7.5. Електричні зв'язки між елементами структури зображені суцільними лініями червоного кольору, механічні зв'язки – контурними стрілками чорного кольору. Литий (пластиковий) корпус або металевий

каркас зазвичай є спільним для усіх (від одного до чотирьох) полюсів автоматичного вимикача.

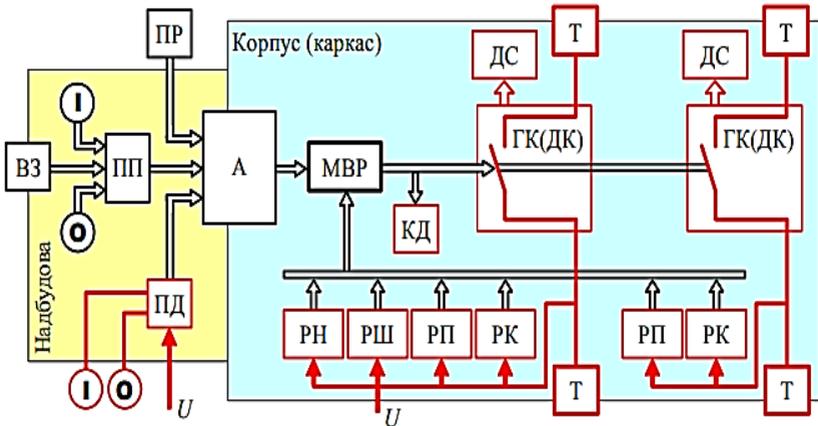


Рисунок 7.5 – Структура повітряного вимикача [28]:

- Т – термінали; ГК – головний контакт; ДК – дугогасний контакт;
- ДС – дугогасна система; КД – контакт допоміжних кіл; МВР – механізм вільного розчіплення; А – ручний актуатор; РК – розчіплювач для захисту від коротких замикань; РП – розчіплювач для захисту від перевантажень;
- РШ – шунтовий розчіплювач; РН – розчіплювач для захисту від зниження напруги мережі; ПД – дистанційний привід; ПР – ручний привід;
- ПП – пружинний привід; ВЗ – важіль зведення пружин;
- І, О – кнопки керування вмиканням та вимиканням через пружинний механічний або дистанційний електричний привід.

Сучасні повітряні вимикачі (англ. Air Circuit Breaker – АСВ) мають подвійний розрив, тобто по два розмикаючі контакти на фазу. Така конструкція полюса забезпечує те, що у всіх моделях автоматичних вимикачів номінальний короткочасно витримуваний струм I_{cw} дорівнює номінальній експлуатаційній найбільшій відключає здатності I_{cs} . Такі автоматичні вимикачі знаходять своє застосування як на промислових, так і на адміністративних об'єктах.

Система «подвійного розриву» головних контактів гарантує миттєве відключення струмів короткого замикання та суттєво зменшує знос головних контактів. Симетрична внутрішня

структура контактів, які використовують технологію «подвійного розриву» означає, що рухомий контакт буде ізолюваний від джерела напруги при зміні напрямку силового підключення. Ця система дозволяє збільшувати термін експлуатації АСВ, а також електричний і механічний ресурс циклів замикання/розмикання контактів. Відсутність гвинтових з'єднань та гнучких виводів вимикача дозволяє істотно збільшити термін служби головних контактів, а також сприяє підвищенню надійності операції включення та вимкнення АСВ.

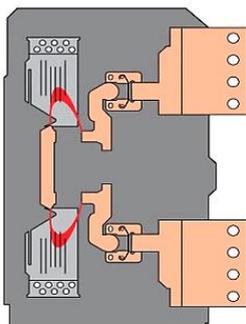


Рисунок 7.6 – Система «подвійного розриву» головних контактів повітряного вимикача

У порівнянні з розробками автоматичних вимикачів попереднього покоління сучасні апарати характеризуються меншою глибиною, а це відповідно дозволяє зменшити площу, яку він займає у розподільчому пристрої. До того ж можливість доступу з передньої панелі значно полегшує їх монтування, експлуатацію та технічне обслуговування АСВ. Використання подвійної ізоляції дозволяє користувачеві легко і безпечно встановлювати практично всі аксесуари, що додаються до базової комплектації вимикача. Для полегшення доступу, клеми кола керування, допоміжних контактів та контактів положення розташовуються у передній частині апарату. За потреби користувач може змінити фронтальне під'єднання силового кола на вертикальне або горизонтальне, і навпаки. Автоматичний

вимикач висувного виконання складається з безпосередньо апарату та шасі.

7.2.2 Автоматичні вимикачі загального призначення із мікропроцесорними розчіплювачами

Сучасні вимикачі категорії В у своєму складі мають мікроконтролери (мікропроцесорні розчіплювачі), які дозволяють регулювати часо-струмову характеристику, наближаючи її до характеристики пошкодження об'єкту захисту, а також встановлювати короточасні затримки для забезпечення селективності спрацьовування з розташованими ближче до навантажень вимикачами, які мають спрацьовувати з меншими затримками або без затримок (вимикачі категорії А), попереджаючи, небажані спрацьовування вимикачів, розташованих на більш високих рівнях.

Вони мають можливість точного настроювання основних параметрів апарату захисту:

- рівень робочого струму захисту;
- час захисту від навантаження;
- час спрацьовування в зоні перевантаження з функцією «теплової пам'яті» та без неї ;
- струм селективного відсічення;
- час селективного струмового відсічення.

Набір регульованих параметрів може змінюватись в залежності від типу та призначення апарату захисту. Також у багатьох автоматах є кнопка «Тест», що дозволяє проводити періодичну перевірку апарату захисту споживачем. Органи регулювання зазвичай виведені на лицьову панель апарату захисту, що дозволяє при проведенні випробувань легко зрозуміти, як налаштовані параметри захисту. Крім механічних поворотних регуляторів різними виробниками використовують і електронні варіанти панелей управління. Приклад такого виду апаратів захисту – автоматичний вимикач Schneider Electric [93] з електронним розчіплювачем та панеллю керування (рис. 7.7).

Для розуміння принципу роботи вимикача розглянемо для прикладу конструкцію сучасного повітряного автоматичного

вимикача комутації та захисту електроенергії, що виробляє компанія Terasaki, серії TemPower2, які призначені для експлуатації в промисловій енергетиці та у житловому будівництві [43, 58].



Рисунок 7.7 – Автоматичний вимикач Schneider Electric литий з електронним розчіплювачем та панеллю керування [43, 58, 76]

Автоматичний вимикач викотної модифікації зазвичай складається із двох частин (рис. 7.8 та 7.9):

- висувної частини АСВ базового модуля автоматичного вимикача, тобто елемента висувного механізму – 30 (рис. 7.9);
- висувного кошику АСВ (шасі) – 11 (див. рис. 7.8).

Висувна частина (апарат) комплектується:

- електронним блоком захисту (скорочено OCR – від англійської мови Overcurrent Release) програмуємим мікропроцесорним розчіплювачем – 5;
- роз’ємними контактами силового кола – 25;
- нерухомими контактами силового кола – 26;
- рухомим контактом силового кола – 27;
- колом керування, що під’єднане до клемної колодки кола керування – 10 та 23;
- приєднаннями контактів положення клемми – 8, що дозволяють здійснювати індикацію стану автоматичного вимикача («ON» або «OFF») завдяки індикатору – 16;
- приєднаннями додаткових контактів клемми – 9;

- котушкою вмикання – 21;
- дугогасними камерами, що гасять дугу при розмиканні головних контактів під час спрацьовування автоматичного вимикача – 19;
- мотора-привода – 22 взведення пружини замикання – 20;
- вимірювальним трансформатором струму – 28;
- трансформатором струму – 29.

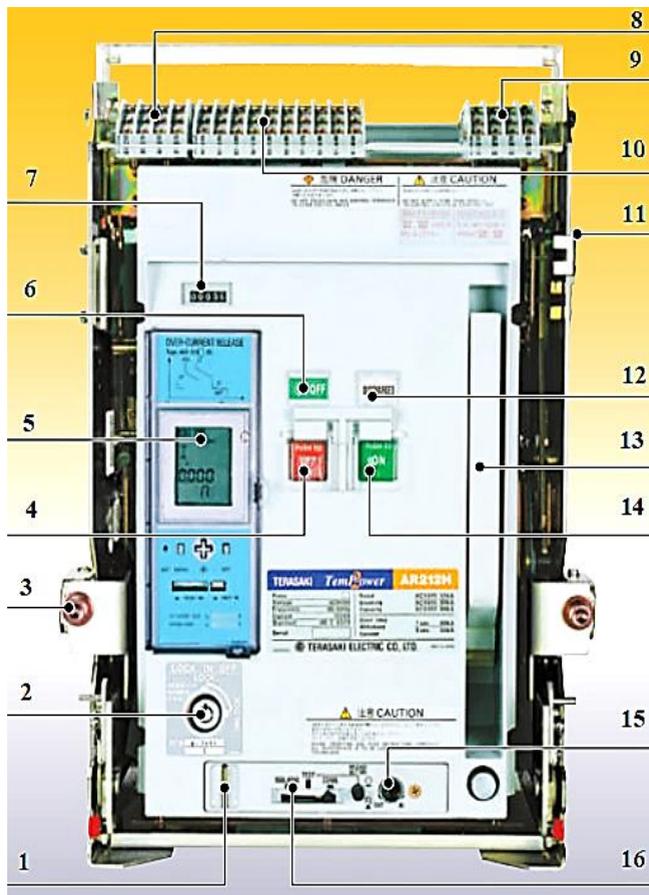


Рисунок 7.8 – Зовнішній вигляд повітряного автоматичного вимикача TemPower [58]

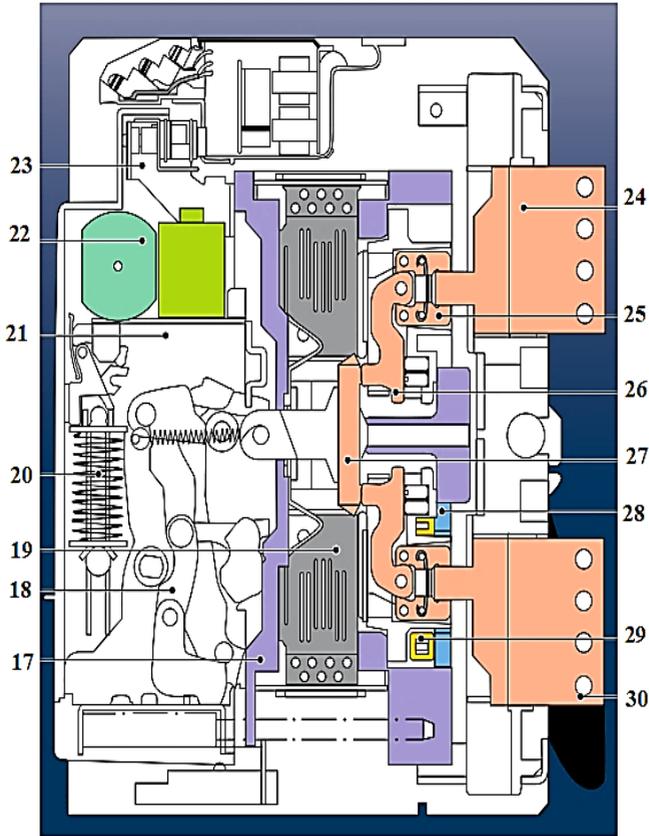


Рисунок 7.9 – Внутрішня конструкція повітряного автоматичного вимикача TemPower [58]

Механізм відмикання складається з:

- механізму переміщення (вмикання та відмикання) рухомих контактів – 18 за сигналом механізму розчіплювача, який в свою чергу відмикає автоматичний вимикач при індикації перевантаження струму в колі;
- литої ізоляційної вставки – 17.

Вмикання вимикача відбувається натисканням кнопки 14, а для відмикання – натисканням кнопки 4. При цьому індикатор

стану («ON» або «OFF») 16 показує стан автоматичного вимикача (у робочому або неробочому). Індикатор взводу пружини 12 показує, що пружина знаходиться або у «зведеному», або «не зведеному» стані. Ручка (важіль) взводу пружини 13 – призначена для взводу пружини за допомогою двигуна 22. Індикатор стану механізму відмикання показує один з трьох варіантів: «Підключене», «Тест», «Ізольоване». Болт фіксації автомата 3 – призначений для фіксації положення автомата при положенні «Підключене». Для викочування автомату необхідно вставити ручку в отвір для ручки викочування механізму відмикання 15 і відкрити замок кнопки відмикання 2. Блок стану 1 – призначений для фіксації положення автомата в одному з трьох положень: «Підключене», «Тест», «Ізольоване». Пристрій лічильника кількості перемикачів 7 рахує кількість перемикачів автомата («ON» або «OFF»), при цьому кількість перемикачів автомата з положення «OFF» у положення «ON» рахується як один цикл.

Електронні блоки захисту (далі за текстом OCR - скорочено від англійського Overcurrent Release), що виробляються компанією Terasaki, забезпечують регульовану по струму та часу захист від перевантаження (L), селективне струмове відсічення (S) та миттєве струмове відсічення (I) (далі за текстом – LSI-характеристики). Наявність даних функцій забезпечує регульовану затримку спрацьовування автоматичного вимикача при перевантаженні (L), а також забезпечує лінійну зміну I^2t характеристики автоматичного вимикача (S).

Як показано на рис. 7.10 зазначені характеристики дуже важливі для забезпечення селективності захисту та для координації з іншими захисними пристроями (у даному прикладі з нижчестоящими запобіжниками та вищими реле).

Серія АСВ TemPower2 оснащена електронним блоком захисту (OCR), який відслідковує чинне (середньоквадратичне) значення струму, що протікає через АСВ, і забезпечує ряд додаткових захисних функцій на відміну від звичайного максимального розчіплювача струму, якими комплектуються інші автоматичні вимикачі.

Характеристика типу «L» – це для захисту розподільчих мереж. Характеристика типу «R» – для захисту розподільчих мереж. Характеристика типу «S» – для захисту генератору.

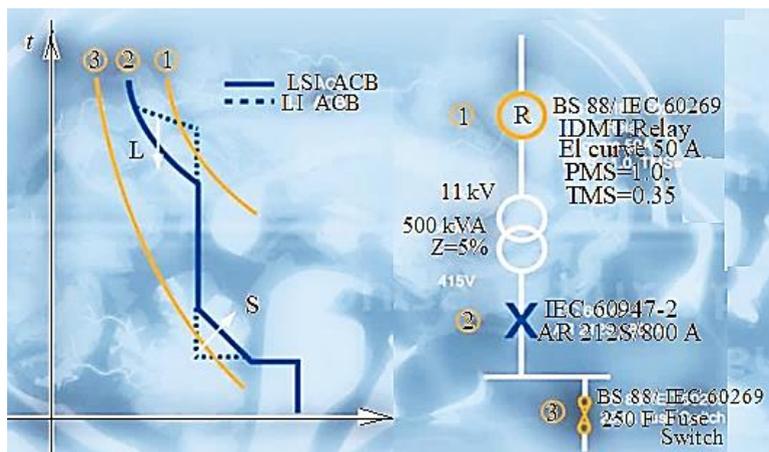


Рисунок 7.10 – Характеристики захисту повітряного автоматичного вимикача компанії Terasaki серії TemPower [58]:

- L – регульований за струмом та часом захист від перевантаження;
- S – селективне струмове відсічення;
- I – миттєве струмове відсічення..

Функція захисту від перевантаження регулюється в межах від 40 % до 100 % від номінального струму. Здійснюється реєстрація чинного (середньоквадратичного) значення включно до 19-ої гармоніки. Забезпечується захист нейтралі від гармонік кратних трьом, (тобто 3-я, 9-а і 15-а), крім того в OCR типу AGR21B/31B доступна функція «термічної пам'яті».

Функція захисту від реверсного режиму (характеристика типу «S») забезпечує додатковий захист при паралельній роботі генераторів та трансформаторів. Використання OCR типів AGR22B/31B для захисту генераторів з функцією захисту від перетікання (реверсу) електроенергії виключає необхідність застосування зовнішнього реле напрямку потужності. Функція

доступна тільки при використанні OCR типу AGR з характеристикою типу «S».

2-й канал сигналізації попереднього відключення (PTA2) (опція). Функція забезпечує контроль та перемикання на додаткове джерело живлення у разі коли струм навантаження підвищується вище за допустиме. Наприклад, функцію можна відрегулювати таким чином, що при увімкненні сигналізації попереднього відключення буде подано команду на запуск резервного генератора для забезпечення безперервного живлення. Функція доступна тільки в деяких OCR типів AGR22B/31B з характеристикою типу «S».

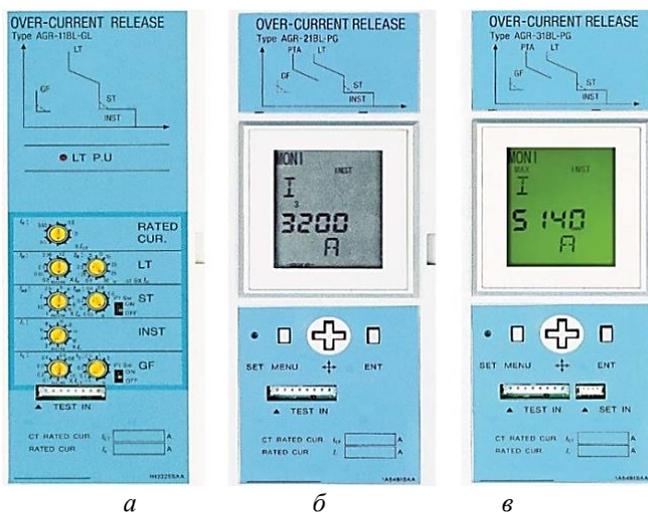


Рисунок 7.11 – Стандартний OCR типу AGR-11B зворотними ступеневими перемикачами (а), з ЖК дисплеєм «Амперметр» (б) та з ЖК дисплеєм «Аналізатор» (в)

Функція захисту нейтралі (NP) (опція). У трьохфазних системах з нейтраллю, можуть бути нелінійні спотворення, а гармоніки кратні трьом (3-я, 6-а, 9-а) можуть призводити до протікання через нейтральний провідник струмів великих значень. Ця функція захищає нейтральний провід від пошкодження та

перегріву під дією струму великого значення і доступна для всіх типів OCR, за винятком OCR з характеристикою типу «S».

Функція захисту від замикання на землю (GF) усуває необхідність встановлення зовнішніх реле для забезпечення захисту від замикання на землю з боку навантаження у розподільчих мережах із системою заземлення TN-C або TN-S. При цьому захист від замикання на землю з боку лінії є опціональним. Система TN-C – система TN, в якій нульовий захисний та нульовий робочий провідники поєднані в один по всій його довжині. Система TN-S – система TN, в якій нульовий захисний та нульовий робочий провідники розділені один по всій його довжині.

Функція відключення при витоку на землю (ELT) використовується спільно із зовнішнім трансформатором струму в нульовому проводі, і забезпечує захист від витоку на землю струмів малої величини.

Функція захисту від неправильного чергування фаз (NS) не допускає неправильне чергування фаз, яке може бути обумовлене обривом фази або зворотним чергуванням фаз, і запобігає загоряння двигуна або пошкодження обладнання.

Зовнішній дисплей. Якщо АСВ встановлений у розподільчому пристрої, то показники OCR виявляються прихованими від оператора, а використання великого зовнішнього дисплея дозволить оператору контролювати ці показники. Значення фазних струмів лінійних або фазних напруг, потужності та коефіцієнта потужності можна зчитувати із зовнішнього дисплея, або передавати сигнал на зовнішній пристрій (4 для програмуємих аналогових виводи 4...20 mA).

Удосконалений рідкокристалічний дисплей для OCR типу AGR-31B обладнаний рідкокристалічним дисплеєм, який дозволяє контролювати значення фазних струмів, напруг, потужності, електроенергії, коефіцієнта потужності, частоти та інших параметрів.

Протокол віддаленого зв'язку (опція) підтримує передачу даних за допомогою протоколу зв'язку Modbus. Вимірювання електричних величин: струм, напруга, повна потужність, активна потужність, реактивна потужність, $\cos \phi$, частота. Аналіз

аварійних відключень: тип (перевантаження, коротке замикання), величина струму короткого замикання, час відключення, історія відключень та інші. Інформація про стан: контроль за положенням головних контактів, зношення головних контактів, вимірювання температури головних контактів.

Функція контролю температури головних контактів (ОН) (опція) контролює температуру головних контактів АСВ. При перевищенні температури 155°C спрацьовує аварійна сигналізація. Безперервний контроль температури контактів забезпечує постійне інформування для захисних і прогнозуючих стан програм та функцій.

Функція сигналізації зниження напруги (UV) контролює напругу силового кола, і в разі зниження напруги нижче встановленого значення забезпечується аварійна сигналізація на ЖК дисплеї, а також за допомогою вихідного сигналу за допомогою сигнального контакту. Сигналізація включається, коли напруга силового кола знижується нижче встановленого значення (40 %, 60 % або 80 % від номінальної напруги U_n), і вимикається, коли напруга силового кола відновлюється до встановленого значення (80 %, 85 %, 90 % або 95% від номінальної напруги U_n). Якщо номінальна напруга силового кола перевищує 250 В АС, необхідно використовувати понижувальний трансформатор напруги.

Функція блокування зони короткого замикання (Z) – це коли АСВ спрацює першим, незалежно від значення його уставки короточасної затримки, знижуючи тим самим теплові та механічні навантаження на розподільчу мережу.

7.3 Модульний автоматичний вимикач

Зупинимось докладніше на модульному автоматичному вимикачі, який є основним елементом захисту електрообладнання мереж побутових, житлових та комерційних приміщень. Відразу зазначимо, що зовнішній вигляд модульних автоматичних вимикачів одного й того самого виробника буде однаковий, і характеристики спрацьовування на їх зовнішній вигляд не впливають. Модульними вони називаються тому, що їх ширина

стандартизована і в залежності від кількості полюсів, кратна 17,5 мм (рис. 7.12).

На задній частині є спеціальне кріплення для монтажу на DIN-рейку та кріплення на ній за допомогою спеціальної клямки. DIN-рейка – це металева рейка спеціальної форми, шириною 35 мм, призначена для кріплення модульних пристроїв (автоматів, УЗО, різноманітних реле, пускачів, клемників тощо; навіть випускаються лічильники електроенергії спеціально для установки на DIN-рейку). Для монтажу на рейку необхідно завести корпус автомата за верхню частину DIN-рейки та натиснути на нижню частину автомата, щоб зафіксувати фіксатор. Для зняття з DIN-рейки необхідно підчепити знизу фіксатор засувки і зняти автомат.



Рисунок 7.12 – Модульні автоматичні вимикачі побутового та аналогічного призначення [43, 58, 63]

Конструкцію та принцип роботи модульного вимикача для Вашого візуального уявлення можна подивитися за посиланням https://www.youtube.com/watch?v=w3kj59G_AF4.

7.3.1 Розшифровка маркування модульних автоматичних вимикачів

Для електротехнічної продукції характерним є використання найважливіших експлуатаційних характеристик у маркуванні виробів. Для освітлювальних ламп це споживана потужність та сила світлового потоку. Маркування автоматичних вимикачів набагато складніше, назва виробу можна втиснути мінімум

інформації. Зазвичай це номінальна робоча напруга. Тому символи маркування наносять на корпус автомата:

Маркування вимикачів, незалежно від виробника та характеристик, здійснюється за єдиним принципом. Це дозволяє підібрати потрібний апарат для певного завдання. Наноситься маркування стійкими до стирання фарбами і розташовується на лицьовій стороні або боці пристрою, щоб була можливість вивчення характеристик без розмонтування з розподільчого модуля (див. рис. 7.13).

Корпуси автоматичних вимикачів виготовляються з діелектричного матеріалу, на передній панелі якого нанесено торгову марку (бренд) виробника, каталожний номер. Основні характеристики – номінальна напруга і струм (в нашому прикладі – це номінальний струм 16 А) та часо-струмова характеристика (у нашому прикладі – С).



Рисунок 7.13 – Маркування модульних вимикачів [58, 67, 72]

Інформація про логотип, назву заводу-виробника наноситься у верхній частині передньої панелі порівняно великими символами над іншими позначеннями. Це можуть бути ІЕК, АВВ, Schneider Electric [93] та інші написи, що відповідають назві компанії, яка виготовила вимикач. Серія пристрою – це літерно-цифрове позначення, що необхідно для швидкої ідентифікації моделі. Це

дозволяє визначити цінову категорію автоматичного вимикача та деякі його характеристики. Маркування літерним позначенням параметрів, за яких відбуватиметься розмикання кола, у професійному середовищі більш відоме, як «часо-струмові характеристики» (ЧСХ). Як вже зазначалося раніше вона являє собою відношення величини струму, що протікає через вимикач, до номінального (що протікає в пристрої, який захищається).

7.3.2 Пристрій та принцип роботи модульного автоматичного вимикача

Модульний автоматичний вимикач зовні представлений у вигляді корпусу та рукоятки керування, які виконані з ПВХ-пластикату зниженої горючості. Також незброєним поглядом можна визначити клеми (нижня та верхня) для підключення кабелю або дроту. Піднімаючи рукоятку керування вгору, автоматичний вимикач підключається до кола, що захищається, а опустивши рукоятку вниз – відключається від нього (рис. 7.14).

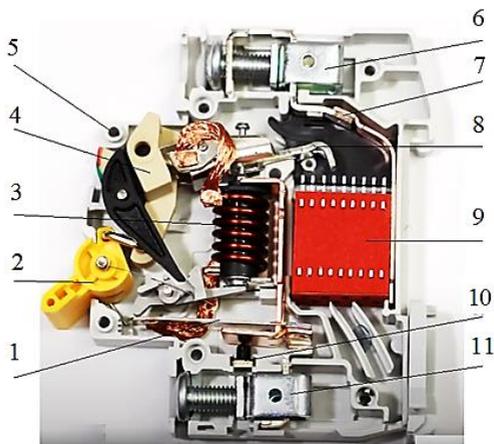


Рисунок 7.14 – Конструкція модульного вимикача [58, 72]

На рисунку цифрами позначені: 5 – корпус; 4 – механізм виводу та розчеплення, що взаємопов'язаний з важелем керування;

3 – електромагнітний розчіплювач – це котушка (електромагніт) та рухоме осердя (якір), яке виконує функцію штовхача; ці елементи в сукупності забезпечують захист від струмів КЗ (рис. 7.15, *a*); 2 – рукоятка ручного увімкнення/відмикання; 1 – тепловий розчіплювач (біметалева пластина), що забезпечує захист від підвищеного навантаження (рис. 7.15, *б*); 10 – регулювальний гвинт теплового розчіплювача, за допомогою якого забезпечується регулювання значення струму, при якому розчіплювач повинен спрацювати.; 6, 11 – верхня та нижня (відповідно) гвинтові клеми підключення; 7, 8 – нерухомий і рухомий (відповідно) силові контакти, що забезпечують комутацію; 9 – дугогасна камера, що виконує швидке гасіння дугового розряду, який утворюється під час розмикання контактів.

Робота автоматичного вимикача у різних режимах відбувається за наступними принципами.

У *нормальному (неаварійному) режимі* роботи автоматичного вимикача, коли рукоятка керування 2 зводиться, електричний струм подається до автомата через провід живлення, підключений до верхньої клеми 6, далі струм проходить на нерухомий контакт 7, через нього на підключений до нього рухомий контакт 8, далі через гнучкий провідник подається на котушку соленоїда 3, після котушки по гнучкому провіднику на біметалеву пластину 1 теплового розчіплювача, від нього на нижню гвинтову клему 11 і далі – в коло підключеного навантаження.

При виникненні *режиму короткого замикання* електромагнітний розчіплювач автоматичного вимикача повинен зробити миттєве відімкнення навантаження. Принцип дії полягає в наступному: при значному перевищенні номінального струму, що протікає через обмотку електромагніту, виникає потужне магнітне поле, яке тягне вниз якір з рухомим контактом. Якір у свою чергу натискає на важіль спускового механізму, внаслідок чого відбувається відключення навантаження. Необхідно відзначити, що внаслідок миттєвого виникнення магнітного поля автоматичний вимикач встигає вимкнутись до появи небажаних наслідків. Однак під час розмикання можливе виникнення дугового розряду між рухомим та нерухомим контактами. Дуга рухається у бік дугогасної камери. Потрапляючи на пластини, дуга

розщеплюється, зтягується до камери і гасне. Продукти горіння, що утворилися, разом з надлишковим тиском виходять назовні через спеціальний отвір в корпусі автомата.

Захист при виникненні *режиму перевантаження* виконує тепловий розчіплювач. Принцип роботи даного розчіплювача полягає в наступному: коли струм, що протікає через біметалеву пластину, стає рівним або більше встановленого певного значення, пластина нагрівається та поступово згинається. Досягнувши певного кута вигину, вона натискає своїм кінцем на важіль спускового механізму. Таким чином, автомат відключається. Терморозчіплювач, на відміну від магнітного, є більш повільним. Для його спрацьовування потрібно більше часу, але він більш точний і легше піддається налаштуванню.

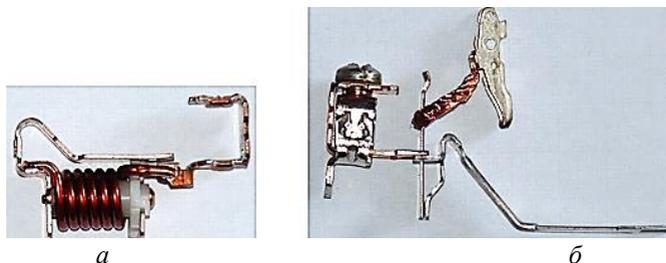


Рисунок 7.15 – Електромагнітний (а) розчіплювач та біметалева пластина (б) модульного автоматичного вимикача General Electric G61 [43]

Влітку іноді зустрічаються такі ситуації, особливо в офісах, де до однієї розеткової групи підключено комп'ютери, оргтехніка, кондиціонери, через це лінії перевантажені, до того ж електроштити зазвичай встановлені в холах, де немає кондиціонерів і погано провітрюються. Спрацьовування автоматів у таких випадках часто явище. Це можна пояснити тим, що номінальний струм автоматичного вимикача, вказаний на корпусі, наводиться для температури навколишнього середовища $+30^{\circ}\text{C}$, тому в каталогах виробників зазвичай вказуються поправки до номінального струму, в залежності від температури навколишнього середовища. Як приклад, наведені дані в таблиці з каталогу Hager [43].

Крім того, на величину номінального струму автомата впливають встановлені поруч інші автомати. І якщо їх багато (а в сучасних електрощитах їх зазвичай на одну DIN-річку встановлюється 12 шт.). До того ж, якщо через більшість з них підключене навантаження, то вони можуть істотно підігрівати один одного. Для більшої наочності можна подивитися відео, в якому роз'яснюється, чому в спеку спрацьовує автоматичний вимикач <https://www.youtube.com/watch?v=MGRg6O1XFik>.

Таблиця 7.1 – Поправки до номінального струму вимикачів в залежності від температури навколишнього середовища

I_n (A)	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
0,5	0,5	0,47	0,45	0,4	0,38	-	-
1	1	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
2	2	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
3	3	2,8	2,5	2,4	2,3	2,1	1,9
4	4	3,7	3,5	3,3	3	2,8	2,5
6	6	5,6	5,3	5	4,6	4,2	3,8
10	10	9,4	8,8	8	7,5	7	6,4
16	16	15	14	13	12	11	10
20	20	18,5	17,5	16,5	15	14	13
25	25	23,5	22	20,5	19	17,5	16
32	32	30	28	26	24	22	20
40	40	37,5	35	33	30	28	25
50	50	47	44	41	38	35	32
63	63	59	55	51	48	44	40

7.4 Пристрій захисту від залишкового струму

Захист від інших ненормальних режимів (наприклад, струмів витоку або зворотних струмів тощо) здійснюють окремі пристрої, які контролюють наявність цих режимів і, коли відповідний режим стає небезпечним, видають сигнал на шунтовий розчіплювач з метою виконання вимикачем операції вимикання. У надбудові над

корпусом вимикача може бути змонтований механізм, який забезпечує керування вимикачем за допомогою важеля, розташованого на зовнішній поверхні розподільчої шафи, у якій змонтовано вимикач (ручний привод), або електричний привод для дистанційного керування вимикачем, або пружинний привод, пружини якого зводяться за допомогою спеціального важеля, виведеного на поверхню надбудови.

Вимикач залишкового струму (RCCB, англ. Residual Current Circuit-Breaker, надалі як диференційний автоматичний вимикач) є найбільш часто використовуваним пристроєм з групи пристроїв захисту від струму короткого замикання (RCD від англ. Residual Current Device).

На сьогоднішній час діє міжнародна класифікація пристрою захисного захисту (рос. устройство защитного отключения УЗО), розроблена міжнародною електротехнічною комісією (МЕК):

- RCD (residual current protective device) – захисний пристрій по диференційному (різницю) струму, загальна назва ПЗВ. Крім того, прийнято загальну назву – RCD — residual current protective device. Точний переклад – захисний пристрій по різницевою (диференційному) струму;

- PRCD (Portable residual current protective device) – переносний захисний пристрій по диференціальному струму;

- PRCD – S (portable residual current protective device – safety) – переносний захисний пристрій диференціального струму (в кабелі-подовжувачі);

- SRCD (fixed socket outless residual current protective device) — захисний пристрій диференціального струму (вбудований в розетку);

- RCCB (residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection) – захисний пристрій по диференціальному струму без вбудованого захисту від надструмів;

- RCBO (residual current operated circuit-breakers with integral overcurrent protection) – захисний пристрій по диференціальному струму з вбудованим захистом від надструмів;

- RCM (residual current monitor) – пристрій контролю диференціального струму (струму витоку).

Іноді ще можна зустріти загальні терміни FI-вимикачі або FI-перемикачі, «F» означає слово «помилки» і «I» – це символ електричної сили струму. В результаті стандартизації на міжнародному рівні термін RCD також використовується загалом у німецькомовних стандартах та літературі з 2008 року.

Взагалі за кордоном прийнято такі позначення [43, 60, 61]:

– у Німеччині, Австрії – Fehlerstrom-Schutzschalter (Fehlerstrom-Schutzeinrichtung), скорочено: FI – Schutzschalter (F – Fehler – пошкодження, несправність, витік, I – символ струму в електротехніці, Schutzschalter – захисний вимикач, Schutzeinrichtung – захисний пристрій);

– у Франції – DD – disjoncteur dinerentiel (диференціальний вимикач);

– у Великобританії – E.L.C.B. (earth leakage circuit breaker – вимикач струму витоку на землю);

– у США – GFCI (Ground Fault Circuit Interrupter – розмикач струму витоку на землю).

Пристрої захисту від залишкового струму всіх типів відмикають напругу у разі небезпечно високих залишкових струмів на землю і, таким чином, мають важливе значення для зниження небезпечних для життя нещасних випадків з електричним струмом в низьковольтних мережах. Вони підключаються перед пристроями максимального струмового захисту у розподільчих колах. Також існує комбінація у вигляді автоматичних вимикачів диференційного струму (АВДС), яка поєднує в одному пристрої функцію пристрою захисного відключення та лінійного вимикача.

Вимикач залишкового струму (RCCB) конструктивно є пристроєм з механічним перемикачем з відповідною до нього характеристикою відключення залишкового струму. Таким чином, переважно це призведе до розриву кола лише при протіканні струму витоку на землю. Час відмикання є таким, щоб мінімізувати ризик життя людини. Оскільки RCCB (без захисту від надструмів) не можуть виявляти або реагувати на надструми або короткі замикання, вони повинні бути послідовно з'єднані з пристроєм надструму, таким як запобіжник або МСВ

(мініатюрний автоматичний вимикач). Апарати RCCB обов'язково мають бути захищені послідовно приєднаними апаратами захисту від коротких замикань (англ. Selection of External Short Circuit Protection Device – SCPD). При цьому апарат набуває здатності витримувати значні струми короткого замикання (очікувані значення можуть перевищувати 10 кА) без виникнення змін, що погіршують його функції. Параметри рекомендованих SCPD надаються у каталогах виробників; апарати, у яких поєднується здатність до захисту від струмів витоку та здатність до захисту від надструмів (перевантажень та коротких замикань).

Функціонально УЗО можна визначити як швидкодіючий захисний вимикач, що реагує на диференційний струм у провідниках, що підводять електроенергію до електроустановки, що захищається. Основні його функціональні блоки представлені на рис. 7.16. Найважливішим функціональним блоком є диференціальний трансформатор струму. В абсолютній більшості цих пристроїв, вироблених і тих, що знаходяться в експлуатації в даний час у всьому світі, саме трансформатор струму використовується як датчик диференціального струму. Пусковий орган (пороговий елемент) виконується, як правило, на чутливих магнітоелектричних реле прямої дії або електронних компонентах. Виконавчий механізм включає силову контактну групу з механізмом приводу (рис. 7.16).

Автоматичний вимикач струму витоку на землю (англ. Earth Leakage Circuit Breaker – ELCB), тобто пристрій залишкового струму було розроблено для задоволення потреб промисловості. Вони підходять для трифазних кіл та великих струмових навантажень. Поріг залишкового струму та затримка спрацьовування часто регулюються, що дозволяє здійснювати вибірковість між різними автоматичними вимикачами. Реле витоку на землю фактично працюють лише у поєднанні з автоматичним вимикачем, що відмикає коло у разі замикання на землю вимикача. Ось чому цей пристрій називається ELCB – вимикачем витоку на землю. Фазовий та нейтральний провідники проходять через тороїдальний трансформатор, створюючи магнітне поле, пропорційне його струму.

Вимикач витоку на землю може бути класифікований відповідно до ІЕС 60529 [60, 61] або в першому випадку реле підходить для моніторингу схеми та надання інформації про ізоляцію мережі. У другому випадку реле підходить для захисту людей від небезпеки ураження електричним струмом. Відповідно до нового МЕК ДСТУ EN 60947 [24, 25, 32] виробники реле залишкового струму повинен перевіряти та гарантувати характеристики захисту для всього кола, що складається з тороїдального трансформатора + реле + тиристора відмикання + контактних під'єднань.

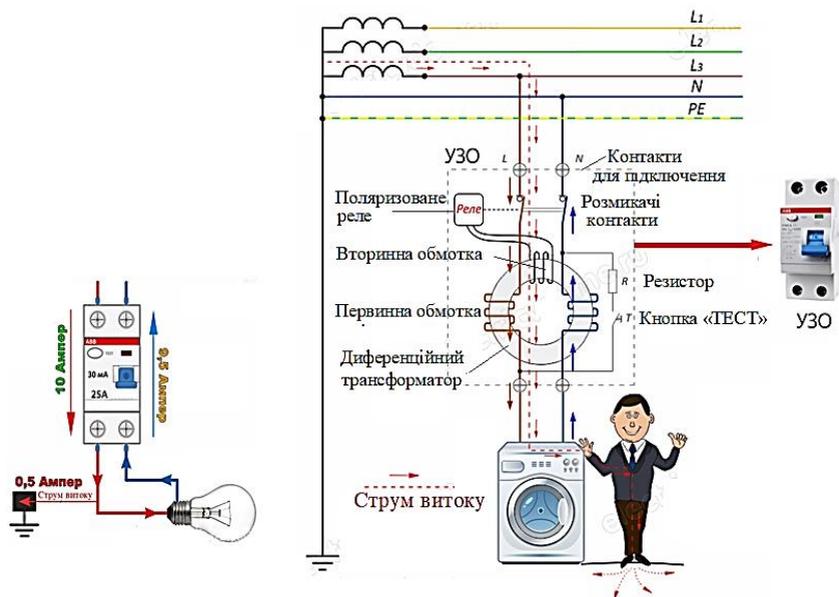


Рисунок 7.16 – Пристрій захисту від струмів витоку на землю

Принцип роботи ELCB в однофазній мережі полягає у порівнянні струму у фазі та нейтралі. Для цього всередині приладу є диференціальний трансформатор з двома первинними та однією вторинною обмоткою (рис. 7.16). У нормальних ситуаціях векторна сума струмів дорівнює нулю. У разі несправності тороїдальний трансформатор виявляє дисбаланс і посилає сигнал на реле і порівнює його із заданим граничним значенням.

Вихідний контакт реле вмикається, коли значення виявлення несправності вище заданого порога і триває більше, ніж задане значення часу вимкнення. Відповідно до першого правила Кірхгофа струм у нульовому та фазному провідниках має бути однаковим. А отже, диференційний струм це не струм у дроті, а різниця у силі струму у цих проводах. Його поява вказує на появу струму витoku через пошкоджену ізоляцію або людини, що потрапила під напругу (див. рис. 7.16). Значення диференціального струму, за якого відбувається спрацьовування пристрою залишкового струму, визначається ПУЕ [42] (п.7.1.79) і не може бути більше за 30 мА – струму невідпускання через електротравму [42]. Наприклад, для електроприладів ванної кімнати уставка встановлюється ще нижче, лише 10 мА.

Тепер уявімо, що людина торкнулася електроприладу, який в результаті пошкодження ізоляції опинився під фазною напругою. Тепер через пристрій ELCB крім струму навантаження буде протікати додатковий струм – струм витoku. У цьому випадку, струми у фазному та нульовому дроті не будуть рівні. Результуючий магнітний потік диференційного трансформатора також не буде дорівнювати нулю $\Phi_{\Sigma} \neq 0$. Під впливом результуючого магнітного потоку в контрольній обмотці збуджується ЕРС, під дією ЕРС у ній виникає струм. Струм, що виник у контрольній обмотці, приводить в дію магнітоелектричне реле, яке відключає силові контакти.

Максимальний струм у контрольній обмотці з'явиться тоді, коли в одній із силових обмоток струму не буде. Тобто, це ситуація, коли людина торкнеться фазного дроту, наприклад, у розетці. В такому разі струм у нульовому дроті не буде протікати.

Але може виникнути ситуація помилкового спрацьовування ELCB, яке відбувається не через аварійну ситуацію. Іноді це відбувається без видимих причин, і таке відключення пов'язане з тим, як працює ELCB. Якщо виключити несправність самого апарата, то хибне спрацьовування викликається «штатним» струмом витoku. Згідно з ПУЕ [42] (п.7.1.83) нормою вважається 10мкА на метр довжини кабелю і 1,8 мА на кіловат потужності електроприладу і, для запобігання випадкового вимкнення, для УЗО з уставкою 30 мА, загальний запланований струм витoku не

може бути більшим за 10 мА, а для ванної кімнати з диференційним захистом 10мА – не більшим за 3,3 мА [42].

Отже, за великої протяжності кабелів диференційне реле бажано встановлювати поруч із електрообладнанням, а електроприлади загальною потужністю понад 5,5 кВт розділяти на групи з установкою окремого ELCB для кожної з них.

Вимикач залишкового струму із захистом від перевантаження позначають аббревіатурою RCBO (Residual current operated Circuit-Breaker with integral Overcurrent protection). Вони можуть бути як функціонально незалежними від напруги мережі, так і функціонально залежними від неї. Фактично це пристрій із залишковим струмом, в який вбудований MCB, тобто RCBO є еквівалентом RCCB + MCB.

Основні функції, які RCBO може забезпечити: захист від струмів замикання на землю; захист від перевантажень та струмів короткого замикання.

Ці автомати, що реагують на диференціальний струм із вбудованим захистом від надструмів встановлюються в електричних колах змінного струму частоти 50 Гц із глухозаземленою нейтраллю номінальною напругою не вище 400 В та номінальними струмами до 63 А. Вони призначені для захисту людей від ураження електричним струмом у разі несправності електрообладнання або при ненавмисному контакті з відкритими провідними частинами електрообладнання, запобігання загоранням та пожежам, що виникають внаслідок протікання струмів витоку та замикань на землю, а також для захисту від перевантаження та короткого замикання. RCBO відносяться до класу пристроїв, що функціонально залежать від напруги мережі (не розмикаються автоматично у разі зникнення напруги). Двополюсні RCBO призначені для стаціонарного встановлення при нерухомих дротових з'єднаннях та в нормальних і жорстких умовах експлуатації за ГОСТ Р МЕК 335-1 в однофазних, а чотириполюсні – у трифазних електричних мережах (рис. 7.17).



Рисунок 7. 17 – Автоматичні вимикачі диференціального струму [74]

Щоб не плутати автоматичний вимикач витоку на землю та диференціальний захисний вимикач, більшість виробників маркують свою продукцію відповідною аббревіатурою АВДТ.

Як вже було зазначено, диференційні вимикачі не мають захисту від надструмів, тому перед ними обов'язково повинні встановлюватися автоматичні вимикачі або запобіжники. На відміну від них диференційний автоматичний вимикач або диференційний автомат (скорочено АТ або АВДТ, що розшифровується як автоматичний вимикач диференційного струму), має також назву – диференційний вимикач із захистом від надструмів.

З назви стає зрозуміло, що це комбінований апарат, що має функції як пристрою захисного відключення (УЗО), так і автоматичного вимикача. У застосуванні комбінованих апаратів є такі явні *переваги*:

- один апарат замінює два – УЗО та автоматичний вимикач;
- диференційні автомати мають менші габарити за шириною, ніж УЗО та автоматичний вимикач (економиться місце у монтажному блоці, внаслідок чого, можна застосувати блок на меншу кількість модулів, і це економічно вигідніше);
- диференційні автомати, як правило, дешевше, ніж окремо УЗО плюс автомат;
- надійність електричного блоку більша (менше апаратів у щитку, менше з'єднань, менше перехідних контактних опорів).

Здавалося б, питання щодо вибору між застосуванням пристроїв захисного відключення та диференційними автоматами явно вирішено на користь останніх. Однак через те, що конструктивно диференційні автомати бувають двох типів, а саме як автоматичного вимикача з диференціальною приставкою так і як моноблока, встановлення їх в схеми не завжди доцільно.

Диференційні автомати першого типу є автоматичний вимикач із захистом від надструмів на кожному полюсі, до якого додається модуль диференціального захисту (в апаратах бюджетного рівня, як правило, електронний). На корпус електронного блоку винесено кнопку «Возврат (Повернення)», яка сигналізує про спрацювання диференційного автомату за струмом витоку. Цей тип пристроїв останнім часом витісняється моноблочними апаратами, що мають той же функціонал, але менші габарити.

У диференційних автоматів другого типу у фазному полюсі апарату встановлено захист від надструмів – електромагнітний та тепловий розчіплювачі, а у нейтральному полюсі – елементи диференційного захисту. Всі елементи захисту у разі виникнення відповідних аварійних ситуацій (перевантаження, короткого замикання, струму витоку) впливають на єдиний механізм вільного розчеплення, який відмикає вимикач. Такі диференційні автоматичні вимикачі мають бути сконструйовані таким чином, щоб при вмиканні вимикача першими замикалися контакти нейтрального полюса, а потім фазного. Розмикання контактів при відмиканні диференційного автомата відбувається у зворотному порядку: першими розмикаються контакти фазного полюса, а після цього – нейтрального. Через це не має необхідності встановлення в нейтральному полюсі дугогасної камери, що дозволяє зменшити габарити всього апарату. Решта принципу дії та маркування диференційних автоматів аналогічна автоматичним вимикачам та пристроям захисного відмикання.

Оскільки диференційний автомат є комбінованим апаратом, який поєднує в собі функції автоматичного вимикача та пристрою захисного відключення, то вибір пристроїв даного типу зводиться до вибору номінального струму, часо-струмової характеристики та уставки спрацювання по струму витоку. Тобто номінальний

струм апарата вибирається із міркувань відповідності перерізу проводки, що захищається, і сумарного навантаження. При цьому номінальний струм пристрою захисту від надструмів повинен бути не більше тривалого допустимого струму для даного перерізу дроту і не менше, ніж сумарне навантаження в колі, що захищається. Вибір час-струмової характеристики залежить від типу навантаження та наявності пускових струмів у навантаженні (див. п.п. 7.2, рис. 7.2, 73). У побуті, як правило, застосовуються автоматичні вимикачі з характеристиками В – захист ланцюгів з активним навантаженням (нагрівальні прилади, лампи розжарювання тощо) та С – решта всього навантаження. При наявності рухового навантаження (наприклад, насос) необхідно застосовувати автомати з характеристикою D. Але, диференційні автомати випускаються в основному з характеристиками В і С. При виборі уставки спрацьовування струму витoku (номінального диференційного струму відмикання) необхідно керуватися тим, що апарати з уставками 10 мА та 30 мА призначені для захисту життя та здоров'я людей від ураження електричним струмом, а з уставками 100 мА та 300 мА – для захисту будівель та споруд від пожеж при тривалому протіканні струмів витoku (іскріння, погані контакти, знос ізоляції тощо).



Рисунок 7. 18 – Основні візуальні відмінності між автоматичними вимикачами [75]

Імпортні пристрої можна розрізнити за іншими ознаками. Наприклад, номінал струму пристрою захисного відмикання позначається цифрою та літерою «А» (Ампер) після неї – наприклад, 16 А.

Струмовий номінал диференційного автомата пишеться інакше: попереду ставиться латинська літера, відповідна до характеристики вбудованих розчіплювачів. Після цього йде цифра, що означає значення номінального струму – наприклад, С 16.

Найефективніше використання апаратів RCBO – це використовувати один у кожній схемі, через те, що якщо одна зі схем виявляє несправність, а отже не впливатиме на інші схеми. Оскільки ціна на ці пристрої падає, RCBO є ефективним способом захисту життя та обладнання [73, 75, 77].

Крім переваг комбінованих апаратів захисту у них є і *недоліки*.

По-перше, як вже зазначалось, більшість диференційних автоматів бюджетного рівня – це пристрої з електронним модулем диференційного захисту. А це означає, що такі апарати функціонально залежать від напруги і, наприклад, у випадку аварійної ситуації такої, як обрив робочого нульового провідника, втрачає свої захисні властивості (відноситься тільки до захисту від струмів витoku, бо захист від навантаження та короткого замикання в даному випадку функціонуватиме нормально). Електронні апарати захисту взагалі чутливі до якості напруги живлення, тому не варто нехтувати періодичною (не менше одного разу на місяць) перевіркою їхньої працездатності шляхом натискання кнопки «Тест» на лицьовій частині пристрою. Якщо УЗО чи диференційний автомат при цьому не спрацює, його необхідно замінити.

По-друге, якщо з будь-якої причини, наприклад, в результаті помилки електрика, будуть переплутані фазний і нейтральний провідники на вході диференційного автоматичного вимикача, він буде повністю непрацездатним. Якщо напругу живлення подати на нижні клеми диференційного автомата замість верхніх, то електронна плата апарату, з великою ймовірністю, згорить. Тому при підключенні диференційних автоматів необхідно суворо дотримуватися фазування і підключати провідники живлення та

навантаження відповідно до маркування на корпусі апарата. Як правило, живлення – на верхні клеми (1 – фаза, N – нейтраль), навантаження – на нижні клеми (2 – фаза, N – нейтраль).

По-третє, оскільки захист від перевантаження і короткого замикання розташований лише у фазному полюсі диференційного автомата, то при виникненні надструмів у нейтральному полюсі (наприклад, при неправильному підключенні) дроти залишаються без захисту, що може призвести до серйозної аварії.

По-четверте, у апаратів моноблочного типу причина спрацьовування пристрою не завжди зрозуміла: чи це від виникнення надструму, чи від виникнення струму витоку. Це ускладнює пошук та усунення аварійної ситуації.

Тепер, знаючи переваги та недоліки диференційних автоматів, можна зробити висновки при виборі між пристроями захисного відмикання та диференційними автоматами. Отже, диференційні автоматичні вимикачі не повинні застосовуватися як ввідні апарати захисту з двох причин:

- відсутність захисту від надструмів у нейтральному полюсі (стосується лише диференційних автоматів з кількістю полюсів $1+N$ та $3+N$);

- електронний модуль диференційного захисту та, як наслідок, функціональна залежність від напруги живлення.

Диференційні автомати з електронним диференційним модулем (втім, як і будь-які інші електронні апарати) не рекомендується застосовувати в електричних мережах з нестабільною напругою живлення (наприклад, з частими перепадами напруги) без відповідного захисту – стабілізатора або реле контролю напруги.

Розглянемо пристрої компанії ENEXT (Україна) виробляє диференційні автомати двох серій e.industrial.elcb та e.elcb.pro (рис. 7.19) [74]. Основна відмінність від інших подібних апаратів на ринку України та головна перевага – це електромеханічний модуль диференційного захисту. Через це автомати ENEXT функціонально не залежать від напруги живлення і зберігають працездатність при обриві робочого нуля. Диференційні автоматичні вимикачі серій e.industrial.elcb та e.elcb.pro мають виконання $1+N$ (1 полюс + нейтраль) у корпусі шириною 36 мм та

призначені для захисту однофазних кіл змінного струму. Основна відмінність даних серій - це здатність, що відключає, тобто. максимальний струм, який апарат може відключити. Диференційний автомат серії e.industrial.elcb має здатність відмикання 10 кА, тобто можуть застосовуватися як для захисту побутових споживачів, також і промислових мереж із високими рівнями струмів короткого замикання. Апарати серії e.elcb.pro мають здатність відмикання 6 кА, що для захисту побутових електричних мереж, як правило, є більш ніж достатнім.

У диференційних автоматів серії e.industrial.elcb відсутня візуальна індикація спрацьовування струму витоку, що, як було зазначено раніше, є одним із недоліків автоматів моноблочного типу. Через що обслуговуючому персоналу важко визначити причину відмикання вимикача.

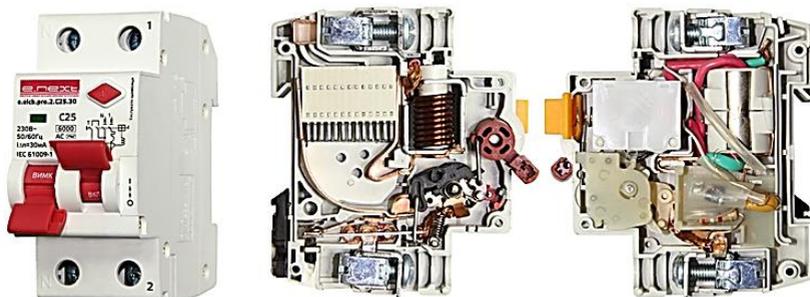


Рисунок 7. 19 – Конструкція диференційного вимикача із захистом від надструмів серії e.elcb.pro ТМ ENEXT [74]

Цього недоліку позбавлений диференційний вимикач із захистом від надструмів серії e.elcb.pro ТМ ENEXT. Рукоятка включення автоматів даної серії розділена на дві частини: якщо причиною спрацьовування диференційного автомата стало виникнення надструмів, то відключиться лише одна половина рукоятки (при цьому розмикаються обидва контакти: і фазний, і нейтральний); якщо спрацьовування відбулося через струм витоку, то відключаються обидві половинки рукоятки вмикання.

Виходячи з усього зазначеного вище, диференційні автоматичні вимикачі рекомендується застосовувати тільки як захист відхідних ліній (розеткових груп, кіл освітлення) після вхідних автоматичного вимикача (із захистом від надструмів у всіх полюсах) та електромеханічного пристрою захисного відключення (функціонально незалежного від напруги живлення та збереження працездатності під час обриву робочого нульового провідника). Особливо це стосується застосування електронних диференційних автоматів.

7.5 Селективні автоматичні вимикачі

Визначення «селективність» має на увазі захисний механізм та налагоджене функціонування пристроїв, що складаються з окремих частин, які послідовно з'єднані один з одним. Найчастіше такими приладами є різні види автоматів, запобіжників, УЗО тощо. Результатом їх роботи є попередження згоряння електромеханізмів у разі виникнення загроз.

Як вже було раніше зазначено, вимикачі, що застосовуються у системах розподілення електричної енергії і поділяються на певні категорії застосування, не завжди призначені для забезпечення селективності при коротких замиканнях, бо спрацьовують без витримки часу. Вимикачі категорії В спеціально призначені для забезпечення селективності при коротких замиканнях, коли вони мають спрацьовувати з витримкою часу. Нормальні та селективні автоматичні вимикачі струмообмежувальної дії не мають. Селективність автоматичних вимикачів означає можливість встановлення різного часу відсічення з витримкою апаратів, що знаходяться в електричній мережі і залежать від захисту цими вимикачами.

Перевагою селективної системи є її властивість відключати лише необхідні кола мережі, причому решта системи залишається в робочому стані. Єдина умова – узгодженість захисних пристроїв між собою.

Селективні автоматичні вимикачі (англ. Selective Main Circuit Breaker) – це автоматичні вимикачі з витримкою часу (0,25...0,6 сек.) при відсіченні [87], які дозволяють здійснити

селективний захист мереж шляхом встановлення автоматичних вимикачів з різними витримками часу: найменшою у споживача і ступінчасто зростаючою до джерела живлення. Такі вимикачі, у поєднанні з вимикачами з миттєвим відсіченням на нижній щаблі, дозволяють розробляти селективне спрацьовування при короткому замиканні. Вони відповідно до німецького стандарту DIN VDE 0641-21 мають функцію селективності, а отже не потребують додаткового живлення для розмикання, замикання контактів та для виконання захисної функції (тобто пристрій є електромеханічним).

Поява автоматичного селективного вимикача спочатку планувалося як випуск пристрою захисту, що має найкращі характеристики з точки зору виконання функцій ввідного пристрою захисту і передбачає забезпечення повної селективності.

Області застосування і функції SMCB зазвичай є наступними:

- ізолюючий пристрій у блоках-щитах обліку при нижчестоящому електрообладнанні, яке стосується споживачів;

- у міських розподільчих пристроях (блоках) або відкритих розподільчих пристроях як селективний груповий або резервний пристрій захисту, особливо там, де потрібен високий рівень безперервності живлення, наприклад, для електрообладнання, яке стосується «Служби безпеки» (IEC 60346-5-56), «Медичних приміщень» (IEC 60364-7-710) тощо;

- загальне застосування з характеристикою E;

- захист кіл, де протікають великі значення струму (наприклад, пускові струми) з характеристикою K.

Селективні вимикачі дозволяють:

- забезпечити можливість електроживлення у широкому діапазоні температур;

- забезпечити захист проводів та кабелів у разі робочого перевантаження або короткого замикання;

- додатково обмежити наскрізний струм та наскрізну енергію у разі спрацьовування по короткому замиканню у розподільчій мережі;

- відключити та роз'єднати системи, навіть некваліфікованим персоналом;

– забезпечити селективність по відношенню до нижче розташованих автоматів захисту та вище розташованих запобіжників;

– забезпечити високий ступінь безперебійності електроживлення.

Селективні автоматичні вимикачі (SMCB) серії S750DR є автоматичними вимикачами з особливою функцією селективності, що працює незалежно від напруги. Це означає, що вони не вимагають додаткового живлення для розмикання та замикання контакту і тому особливо підходять для використання в енергетичних системах розподілу з максимальними вимогами до безперебійності. Унікальний принцип струмообмежувальної селективності пропонує нові підходи для координації пристроїв захисту від надструмів.

Автомати цього типу мають основний і додатковий робочі ланцюги, які дозволяють відключити аварійну ділянку електромережі, контрольовану нижче розташованого апарату, і зберегти подачу струму споживачам, що залишилися. Часовий діапазон процесів швидкодії та селекції також відображають криві автоматичних вимикачів. Спрацьовування пристроїв захисту відбувається не тільки залежно від струму, але й від нагрівання проводів, що забезпечується тепловим реле. Простіше кажучи, електромагнітний розчіплювач реагує на струм, а теплове реле – на нагрівання проводів.

Саме від налаштування останнього залежить часо-струмова характеристика автоматичного вимикача. Значення теплового навантаження має перевищувати номінальне значення для проводів певного перерізу більш ніж 1,45 разу. Воно визначається з урахуванням способу прокладання проводів та загального навантаження. Залежно від встановленої уставки теплове реле може спрацьовувати миттєво або зберігати працездатність мережі протягом певного часу, але не більше години.

Селективність між вводом і відхідними автоматичними вимикачами на всьому діапазоні струмів короткого замикання (навіть до здатності відключення автомата, що розташований після (нижче)) забезпечується конструкцією самого селективного

автоматичного вимикача (рис. 7.20), і пояснюється схемою, зображеною на рис. 7.21.

Селективні автомати компанії АББ (SMCB) серії S750DR діють відповідно до принципу незалежності від напруги. Їм не потрібне додаткове джерело живлення ні для замикання / розмикання контактів, ні для виконання захисної функції. Для відключення при перевантаженні використовується біметал. У разі виникнення КЗ S750DR як і звичайний автоматичний вимикач повинен розімкнути головні контакти за допомогою електромагнітного миттєвого розчіплювача за час менше, ніж 1 мс для забезпечення ефективного обмеження струмів короткого замикання. Якщо при цьому по КЗ спрацює нижче розташований пристрій захисту, контакти S750DR автоматично замкнуться за допомогою простої пружинної системи, що не потребує додаткової енергії.

Якщо коротке замикання відбувається між S750DR та автоматичним вимикачем з боку навантаження, селективний біметалічний розчіплювач забезпечує короточасну затримку спрацьовування. І селективний і звичайний біметал подають сигнал на механізм, гарантуючи, що контакти залишаться у відкритому положенні, забезпечуючи функцію роз'єднання. Струм обмежується, і дуга гаситься, як і у випадку стандартних автоматичних вимикачів, за рахунок швидкого розмикання контактів з допомогою «молоточка» електромагнітного розчіплювача та швидкого нарощування напруги дуги в дугогасній камері.

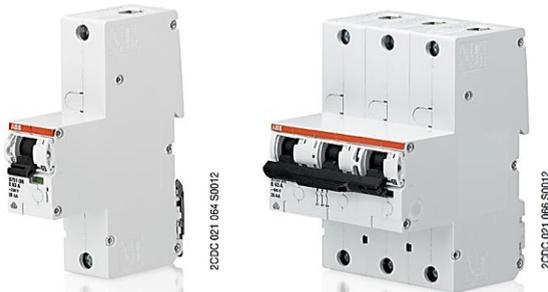


Рисунок 7.20 – Селективні одно- та триполюсний автоматичні вимикачі АББ S753DR E63 [63]

Розглянемо процеси, що відбуваються усередині селективного автоматичного вимикача у разі аварії. Уявімо систему, в якій використовується селективний автоматичний вимикач як ввідний пристрій захисту, а як нижчий пристрій захисту – мініатюрний автоматичний вимикач.

На схемі видно два струмові шляхи: один з них – це основний і має такі ж самі елементи, що і звичайний автоматичний вимикач (електромагнітну котушку – миттєвий розчіплювач, біметал – це розчіплювач навантаження та блок основних контактів), а також додатковий струмовий шлях, який також має контакти і селективний біметал (рис. 7.21).

Можливі два випадки. Перший – аварія (коротке замикання) відбувається в навантаженні (за автоматом, що відходить). Другий – аварія відбувається між ввідним і відхідним автоматами. У першому випадку в момент короткого замикання відпрацюють розчіплювачі мініатюрного автоматичного вимикача та основного струмового шляху селективного автоматичного вимикача. Однак, при цьому струм продовжить протікати по додатковому шляху ввідного автомата. Оскільки аварію усунене, пружина знову замкне блок основних контактів. Таким чином забезпечується безперервне протікання струму та безперебійність живлення навантажень, тобто селективність.

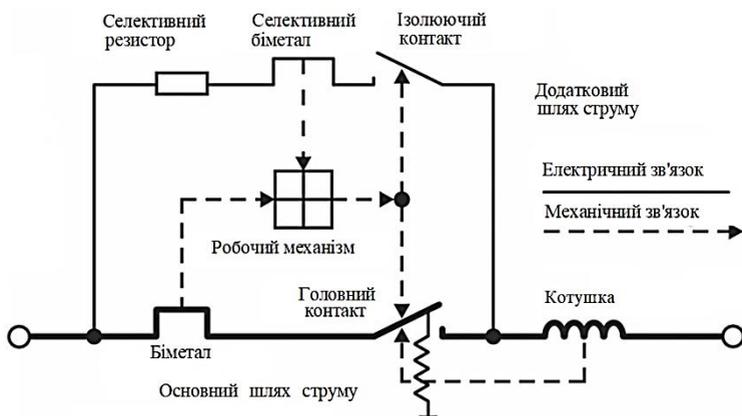


Рисунок 7.21 – Схема внутрішнього пристрою селективного автоматичного вимикача [63]

У другому випадку в момент аварії також розімкнуться основні контакти селективного автоматичного вимикача. Далі, оскільки аварія продовжить існувати, селективний біметал також розімкне контакти по додатковому струмовому шляху, при цьому заблокувавши пружину і не дозволить їй замкнути основні контакти. Таким чином, розімкненими залишаються і основний, і додатковий струмовий шляхи, тим самим забезпечуючи захист від короткого замикання. В результаті можна зазначити, що селективний автоматичний вимикач забезпечує селективність, і захищає від струмів короткого замикання.

Такий принцип дії SMCB дозволяє досягти особливо високого ступеня селективності – струмообмежувальної селективності.

У разі короткого замикання у розподільчих колах S750DR підтримує автоматичний вимикач з боку навантаження і обмежує енергію, тим самим зводячи до мінімуму вплив на всю електроустановку та мережу живлення. Така селективна робота S750 DR надає переваги в порівнянні з технологіями запобіжників.

Розглянемо схему селективного захисту вимикачами диференціального струму (ВДТ) 6 кА з витримкою часу на відмикання, що розробляється і виготовляється компанією Schneider Electric [76, 93], які є новою серією модульного обладнання для житлового будівництва [58, 93] (див. рис. 7.22).

Діючі стандарти СП 256.1325800.2016 «Електроустановки житлових та громадських будівель. Правила проектування та монтажу» вимагають підвищеного рівня захисту від загоряння пристроями диференційного струму з номінальним диференціальним струмом відмикання до 300 мА. При цьому для дотримання селективності спрацьовування такими пристроями при дво- та багатоступінчастою схемою пристрою уставка та час спрацьовування ВДТ, встановленого ближче до джерела живлення, щонайменше в 3 рази більше, ніж у ВДТ, встановленого ближче до споживача. Іншими словами, ВДТ на вводі повинно мати уставку диференційного струму до 300 мА та витримку часу спрацьовування, тобто бути селективним.

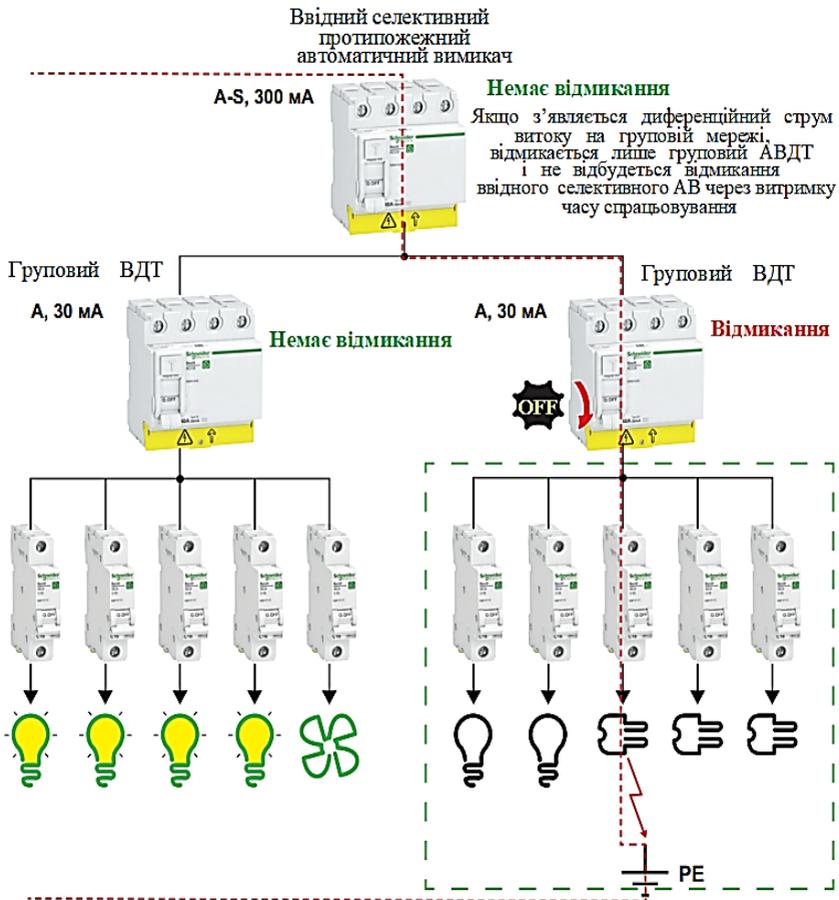


Рисунок 7.22 – Схема забезпечення захисту селективним автоматичним вимикачем Resi9 Schneider Electric [76, 93]

Для більшої наочності можна подивитися відео, в якому роз'яснюється, як спрацьовує селективний автоматичний вимикач <https://www.youtube.com/watch?v=Rb-p4lZsvzk..>

7.6 Контрольні питання

7.6.1. Перерахуйте відомі вам різновиди автоматичних вимикачів.

7.6.2. Яким є принцип роботи автоматичних вимикачів?

7.6.3. Що розуміється під струмообмежувальною здатністю автоматичного вимикача при відключенні струмів короткого замикання?

7.6.4. Для чого в автоматичному вимикачі є розривні та основні контакти?

7.6.5. Що таке механізм вільного розчеплення та його основне призначення?

7.6.6. Для чого контактна система автоматичного вимикача має компенсатор електродинамічних зусиль?

7.6.7. Як регулюється струм спрацьовування в швидкодіючому автоматичному вимикачі?

7.6.8. Який принцип роботи УЗО?

7.6.9. Чим відрізняється УЗО від запобіжників?

7.6.10. За який час спрацьовує УЗО?

7.6.11. Чи можна замінити запобіжники на УЗО?

7.6.12. Перерахуйте елементи УЗО

7.6.13. У яких випадках УЗО не реагує на коротке замикання? Чому?

7.6.14. Чому прогин біметалевої пластини відбувається повільно?

8 ЗАПОБІЖНИКИ

Запобіжники – це електричні апарати, призначені для захисту електричних кіл від струмів короткого замикання та струмів навантаження. Вони переважно використовуються для захисту від струмів короткого замикання, а для захисту від струмів перевантаження в більшості випадків перевага надається тепловим реле та автоматичним вимикачам [30, 37, 53, 67 – 70].

Основним елементом запобіжника є плавка вставка постійного або змінного перерізу, яка при струмах спрацьовування згорає (плавиться з подальшим виникненням і гасінням електричної дуги), через що відбувається виключення електричного кола. По конструктивному виконанню запобіжники умовно можна розділити на відкриті (вставка не захищена патроном або розміщена в трубці, що не закрита на торцях), закриті (вставка розміщена в закритому патроні) та засипні (вставка знаходиться в патроні, повністю заповненому дрібнозернистим наповнювачем, наприклад, кварцовим піском).



Рисунок 8.1 – Різновиди запобіжників [28, 67...70]

Найбільш поширеними матеріалами плавких вставок є мідь, цинк, алюміній, свинець та срібло. Мідь схильна до інтенсивного окислення, що може призвести до збільшення опору мідної вставки і, отже, до зміни захисної характеристики запобіжника. Тому мідні вставки піддаються лудженню (покриваються шаром олова). У засипних запобіжниках найбільш поширеним наповнювачем є кварцовий пісок із вмістом оксиду кремнію SiO_2 не менше 99%. Найкращим наповнювачем за своїми дугогасними

властивостями є крейда (CaCO_3), який після перегорання вставки на відміну від піску не утворює залишкових струмопровідних шляхів і придатний для багаторазового використання. Але крейда значно дорожча за пісок, і це обмежує його широке застосування. Для кращого використання наповнювача як тепловідводного і дугогасного середовища в засипному запобіжнику зазвичай розміщені кілька паралельно з'єднаних вставок, сумарний переріз яких еквівалентний перетину однієї вставки запобіжника на такий же самий робочий струм. Запобіжники доступні у багатьох типах корпусів, наприклад, у популярній маленькій вставці зі скляної трубки 3AG діаметром 6,35 мм та довжиною 32 мм.



Рисунок 8.2 – Традиційні запобіжники з плавким елементом [24, 28, 30, 67...70]

Крім перерахованих запобіжників традиційного виконання в особливу групу можна виділити рідкометалеві запобіжники та запобіжники інерційного типу. У рідкометалевому запобіжнику в якості плавкого елемента застосовується рідкий метал (галій, сплав галій/індій/олово тощо), яким заповнюється канал розрахункового перерізу відповідно до робочого струму в герметизованому та вакуумованому патроні. Запобіжник електрично (послідовно) і механічно пов'язаний із захисним апаратом, наприклад, автоматичним вимикачем. При виробництві такого запобіжника метал з рідкого стану переходить у пароподібний. Тиск, що виникає при цьому в патроні, через спеціальний шток механічно впливає на розчіплювач

автоматичного вимикача, який саме і здійснює відключення електричного кола. Відразу після цього пари металу знову переходять у рідкий стан (через 0,5...2 мс) і запобіжник готовий до повторного спрацьовування. Інерційні запобіжники від звичайних відрізняються наявністю двох вставок різного перерізу та виконання, які забезпечують захист споживача (найчастіше асинхронних двигунів) як при значних струмах короткого замикання, так і при порівняно невеликих струмах перевантаження. Слід зазначити, що в даний час запобіжники найчастіше застосовуються або як апарат захисту від струмів короткого замикання, або як апарат захисту від гранично великих струмів короткого замикання при сумісній роботі з автоматичним вимикачем (тобто попередньо включений запобіжник перед автоматичним вимикачем в електричній схемі).

Робоча (захисна) часоштовмова характеристика запобіжника надана на рис. 8.3, де $I_{ном}$ – номінальний струм, який вказується на плавкій вставці, а $I_{п}$ – граничний струм (струм, при якому плавка вставка перегорає за час не менше однієї години), в більшості випадків приймається за початкове значення при розрахунках. Залежно від матеріалу вставки граничний струм може перевищувати номінальне значення від на 10% до 70%.

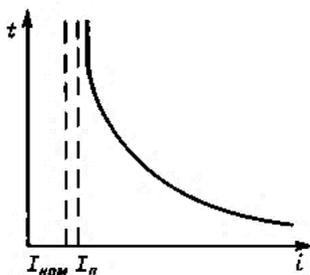


Рисунок 8.3 – Захисна характеристика запобіжника [45]

Менші значення відносяться до матеріалів з більш стабільною захисною характеристикою (менше схильними до зовнішніх атмосферних умов і режимів експлуатації електрообладнання,

наприклад, срібло), а більші значення – до нестабільних у зазначеному відношенні матеріалів (наприклад, алюміній).

8.1 Змінна плавка вставка

На рис. 4.2 показані деякі варіанти виконання плавких вставок. Приклади конструктивного виконання запобіжників закритого типу і з наповнювачем показано нижче на рис. 4.3, *а*, *б*. Фігурні плавкі вставки на відміну від вставок постійного перерізу мають ряд переваг: знижується рівень перенапруги при спрацьовуванні запобіжника, меншою мірою засмічується внутрішня порожнина патрона парами металу, зменшуються теплові втрати та інше.

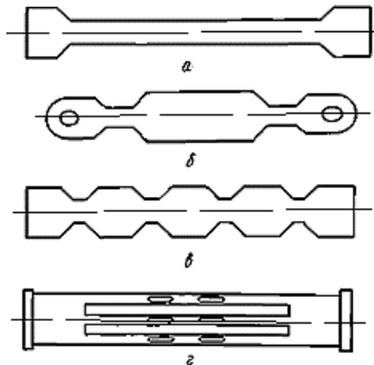


Рисунок 4.2 – Різні конструктивні варіанти виконання плавких вставок [45, 53]:

- а* – постійного перерізу;
- б* – змінного перерізу (фігурні вставки) на напругу переважно не вище 220 В;
- в* – змінного перерізу на напругу вище 380 В;
- г* – для запобіжника з наповнювачем.

В деяких випадках, коли потрібна висока здатність відключення запобіжника, його патрон виготовляється зі спеціального газогенеруючого матеріалу (найчастіше – з фібри). При перегоранні вставки і дотиканні електричної дуги зі стінками такого патрона відбувається інтенсивне і ясне газовиділення. Це

призводить до збільшення тиску всередині патрона, що, у свою чергу, покращує умови теплопередачі від дуги, і прискорює процес дугогасіння і, що в результаті збільшує здатність відключення запобіжника.

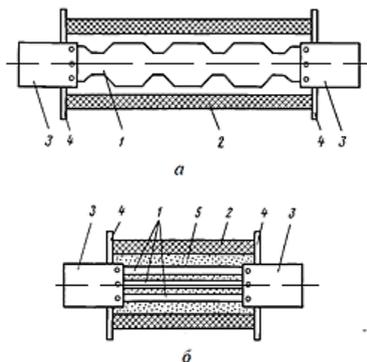


Рисунок 4.3 – Приклади конструктивного виконання запобіжників закритого типу (а) та з наповнювачем (б) [53]:

1 – плавкі вставки; 2 – ізолюючий патрон (корпус); 3 – струмопровідні деталі; 4 – захисні ковпачки; 5 – наповнювач.

Граничний струм запобіжника відкритого типу або його мінімальний струм спрацьовування розраховується на основі балансу підведеної та відведеної потужності і оцінюється за співвідношенням:

$$I_{\Pi} = \sqrt{\frac{K_T \cdot S_{\text{охл}} (\vartheta_{\text{пл}} - \vartheta_0)}{\rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{пл}})}},$$

де K_T – коефіцієнт теплопередачі;

$S_{\text{охл}}$ – площа поверхні охолодження;

$\vartheta_{\text{пл}}$ – температура плавлення матеріалу вставки;

ϑ_0 – температура навколишнього середовища;

ρ_0 – питомий електричний опір матеріалу вставки;
 α – температурний коефіцієнт опору.

Граничний струм засипного запобіжника розраховується:

$$I_{II} = \pi d \sqrt{\frac{\vartheta_{nl} - \vartheta_o}{2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{nl}) \left(\frac{8}{K_T \cdot D_H} + \frac{1}{\lambda_H} \ln \frac{D_{BH}}{d} + \frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{D_H}{D_{BH}} \right)}},$$

де D_{BH} і D_H – внутрішній і зовнішній діаметр трубки;

λ_H і λ_T – теплопровідність наповнювача та матеріалу трубки;

d – діаметр плавкої вставки.

Повний час спрацювання запобіжника:

$$t_{cp} = t_1 + t_2 + t_3,$$

де t_1 – час нагріву вставки від температури навколишнього середовища до температури плавлення;

t_2 – час плавлення вставки (час переходу матеріалу вставки з твердого в рідкий стан після досягнення температури плавлення);

t_3 – час гасіння дуги.

Розрахунок часострумової характеристики зазвичай проводиться за припущенням, що процес нагрівання має адиабатний характер. Практика показує, що це припустимо при струмах, які перевищують номінальний струм у три або більше разів. Значення складових повного часу спрацювання запобіжника визначаються:

$$t_1 = A_1 \frac{S^2}{I^2}; \quad t_2 = A_2 \frac{S^2}{I^2},$$

де S – переріз плавкої вставки;

I – струм спрацьовування запобіжника;

A_1 і A_2 – постійні інтегрування, які визначаються електрофізичними характеристиками матеріалу вставки. Їх значення, $A^2 \cdot c / \text{мм}^4$, для деяких матеріалів такі:

$$\text{Ag} - A_1 = 62000; A_2 = 8000;$$

$$\text{Cu} - A_1 = 80000; A_2 = 11000;$$

$$\text{Zn} - A_1 = 9000; A_2 = 3000;$$

$$\text{Pb} - A_1 = 1200; A_2 = 400.$$

Час гасіння дуги розрахунку складно провести існуючими методами, тому варто обрахувати його емпіричними коефіцієнтами. З урахуванням цього повний час спрацьовування має наступний вигляд:

а) для запобіжника відкритого типу:

$$t_{\text{сnp}} = (1,2 \dots 1,3) \cdot (A_1 + \frac{A_2}{3}) \cdot \frac{S^2}{I^2} \cdot 10^{-4} ;$$

б) для засипного запобіжника:

$$t_{\text{сnp}} = (1,7 \dots 2) \cdot (A_1 + A_2) \cdot \frac{S^2}{I^2} \cdot 10^{-4} .$$

Традиційний запобіжник складається з тонкого металевого дроту (самого запобіжника), діаметр, матеріал, форма та система складання якого точно спроектовані. Коли струм, що протікає запобіжником, перевищує встановлену межу і продовжує текти протягом досить довгого часу, дріт нагрівається та розплавляється, розриваючи коло. Тепловиділення є наслідком протікання великого струму через опір плавкої вставки. Отже, важливим показником запобіжника є теплова характеристика – інтеграл квадрата струму в заданому інтервалі часу (джоулів інтеграл). Ця характеристика дозволяє досить точно оцінити тепловий вплив струму, що проходить через нього, і в наочній формі визначити захисну здатність запобіжника, особливо при малих часах спрацьовування. Для кожного типу запобіжника та його

номінального струму виробники надають найдокладніші графіки, що показують взаємозв'язок між значенням максимального струму та часом, необхідним для розплавлення запобіжника та, таким чином, припинення протікання струму. Це називається рейтингом I^2t (інтеграл Джоуля), який вказує на достатню теплову енергію в результаті протікання струму і вимірюється в Ампер²-секундах (A^2s). Відповідно, чим більше перевантаження в колі, тим менший час відключення.

Найбільш поширеними серіями запобіжників є: ПР-2 – на номінальні струми від 15 А до 1000 А і напругою 380 В, 500 В; ПП (швидкодіючі) – на номінальні струми від 30 до 6300 А і напруга від 150 до 1300 В; ПРС (різьбові, для малогабаритних розподільчих пристроїв) – на струми до 100 А і напруга до 500 В. Випускаються також запобіжники в комплекті з розрядниками, рубильниками і вимикачами – для зменшення габаритних розмірів розподільчих пристроїв [53]. Як приклад на рис. 8.4 наведені часові характеристики запобіжника ПП-57 на різні номінальні струми, а на рис. 8.5 – характеристики джоулевих інтегралів запобіжників ПНБ-5.

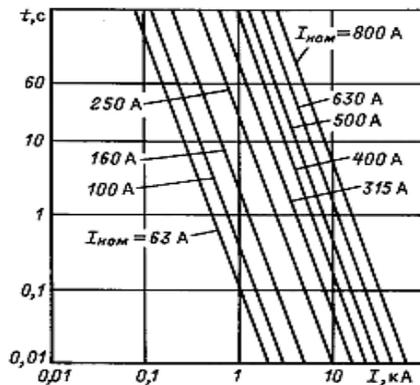


Рисунок 8.4 – Часо-струмові характеристики запобіжника ПП-57 на номінальну напругу 660 В [53]

Запобіжники із термічною активацією спрацьовування (тобто перегорання), які як було вище зазначено, історично є найстарішим захистом електричних кіл від навантаження. Звісно

вони досі широко використовується, тому що їх робота зрозуміла, надійна та схвалена юридичними стандартами енергопостачання і забезпечення безпеки.

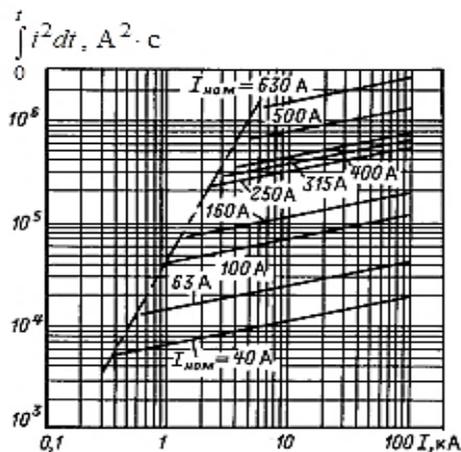


Рисунок 8.5 – Характеристики джоулевих інтегралів запобіжників ПНБ-5 [53]

Але зі збільшенням складності пристроїв і постійною мініатюризацією, конструкторам потрібна альтернатива звичайному запобіжнику, щоб зробити пристрій менше, простіше в монтуванні і більш безпечним. Традиційному запобіжнику з плавким елементом, що термічно активується, вже 150 років, і він є найбільш відомим типом захисту електричного обладнання. Він надійний та працює на основі простого принципу.

Спрацьовування досягається шляхом непервального розриву кола протікання струму, коли струм перевищує значення, що вказане у конструкції запобіжника.

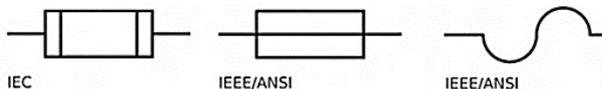


Рисунок 8.6 – Позначення запобіжників різними символами в електричних схемах відповідно до існуючого стандарту

Запобіжник не є єдиним апаратом захисту кола, що використовується у конструкціях. Існують інші пасивні компоненти, які забезпечують інші форми захисту шляхом обмеження струму, блокування, шунтування або відсікання піків струму або напруги. Але жоден з них не може забезпечити повного та непервертального відключення струму в колі, як плавка вставка. Такі елементи не замінюють запобіжник, а використовуються, коли традиційне рішення не підходить, або як доповнення. До інших добре відомих схем захисту відносяться:

- металооксидні варистори (MOV);
- термістори з позитивним температурним коефіцієнтом (PTC);
- діоди придушення перехідних процесів (TVS);
- розрядні елементи (GDT);
- полімерні запобіжники (PTC), що відновлюються;
- теплові запобіжники (спрацьовують при перегріві).

8.2 SMD запобіжники

Окрім класичних запобіжників, сьогодні у розпорядженні розробників електричної та електронної апаратури (ЕЕА) є і SMD-версії [70]. Вони використовують різні технології, що забезпечують виробництво запобіжників із заданими параметрами і характеристиками спрацьовування, такими як швидкий, повільний або уповільнений.

Зазвичай передбачається, що запобіжники є частинами, що замінюються, і повинні встановлюватися з відповідним гніздом. Ця взаємозамінність тепер не потрібна і може бути навіть небажаною завдяки новим технологічним рішенням сучасного електробудування. Особливо в пристроях з низьким енергоспоживанням, такими як стільникові телефони, зарядні пристрої, змінні адаптери та електронні іграшки, а також поширений варіант для пристроїв середньої потужності, включаючи електроінструменти, промислові контролери та потужніші схеми – автомобільні зарядки. У пристроях можуть бути потрібні запобіжники з різними номіналами для захисту

різних електричних кіл, у тому числі з чутливими шляхами проходження сигналу [70].

Саме визначення «SMD-резистори» з'явилося не так давно. Абревіатуру SMD (Surface Mounted Devices) можна перекласти українською мовою як «пристрій, встановлений на поверхню». Їх також називають чіп-резистори та використовуються вони при виробництві друкованих електронних плат. Вони мають набагато менші розміри порівняно з дротяними аналогами. Можуть бути найрізноманітнішої форми – прямокутник, квадрат, овал чи коло. Також такі резистори відрізняються низькою посадкою на друковану плату, що дозволяє їх розміщувати на схемі компактніше і суттєво економити корисну площу. На корпусі резистора є контактні виводи. Вони кріпляться одразу на доріжку електронної схеми. Особлива будова резистора дозволяє їх кріпити навіть за відсутності отворів у платі (рис. 8.7).

З точки зору безпеки в такому разі запобіжник не треба замінювати, якщо не відома справжня причина його виходу з роботи. У більшості випадків перегорілий запобіжник означає, що електроніка назавжди вийшла з ладу, і заміна її є марнуванням часу. Наприклад, якщо запобіжник є частиною схеми захисту літєвої батареї та її кола зарядки, він є одним і тим самим критичним компонентом цієї функції.



Рисунок 8.7 – SMD-резистори (Surface Mounted Devices [70])

Тому важливо знайти причину «перегоряння» запобіжника, а не просто замінити його наосліп. Утримувач запобіжника та його контакти збільшують ризики щодо надійності захисту від

надструмів через корозію, вібрацію та інші фактори навколишнього середовища. Через те виникає проблема розміру: адже запобіжник, припаяний до друкованої плати без ободу, буде меншим за розміром і його буде легше інтегрувати. Проблема із площею, яку займає електрична схема на платі, допомагає вирішити SMD версії запобіжників (рис. 8.8).

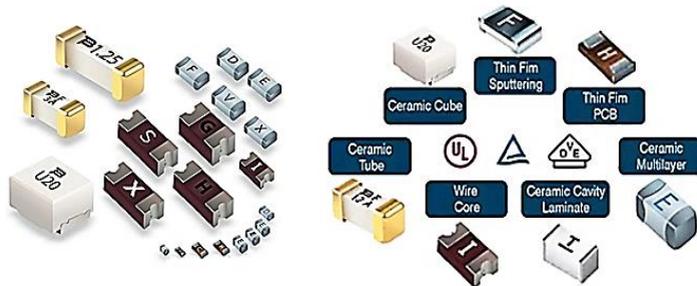


Рисунок 8.8 – Невеликі герметичні SMD-компоненти SMD запобіжників [70]

Їх теж можна збирати автоматично в типовому процесі SMT, тому не дивно, що вони набирають популярності. Але для того, щоб використовувати їх правильно, треба вийти за рамки традиційних дротяних запобіжників.

Широкий асортимент запобіжників SMD допомагає вирішити завдання сучасного дизайну електричних та електронних апаратів. Наприклад, одна з компаній розробила сімейство запобіжників SinglFuse SMD, які є доступними в широкому діапазоні робочих струмів та напруги. Асортимент таких запобіжників включає сім різних рішень: з напиленим тонкошаровим металевим шаром, з тонкошаровою пластиною, багатшаровою керамікою, керамічним ламінатом, дротяним сердечником, керамічною трубкою та кубом (рис. 8.9).

Технологія, що використовується для виробництва таких запобіжників, пов'язана з електричними параметрами цих елементів, такими як номінальний струм, номінальна напруга, здатність, що відключає, інтеграл I^2t і діапазон робочих температур. Версії, сумісні з АЕС-Q200, доступні для автомобільних пристроїв, де потрібні розширені специфікації та

надійна робота при широких температурах, що є однією з багатьох вимог галузі.

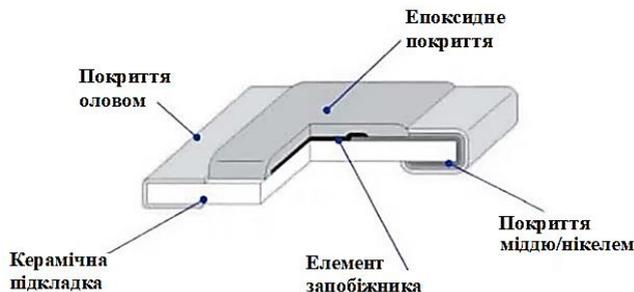


Рисунок 8.9 – Технологія, що використовується для виробництва запобіжників SMD версій [70]

Малий розмір SMD та великі можливості, коли зазвичай компоненти у маленькому корпусі мають деякі функціональні обмеження порівняно з більшими традиційними версіями, не стосується сімейства SinglFuse, бо ці елементи доступні в майже невидимих корпусах від 0402 (1 мм х 0,5 мм) для низьких номінальних струмів, до 3812 (3,8 мм х 2,5 мм), здатних витримувати великі навантаження. Крім розміру, SinglFuse доступні з різними характеристиками відклику, включаючи: швидкодіючий запобіжник, швидкодіючий точний – з більш жорстким допуском головних ключових характеристик; повільний – це той, який не реагує на короткочасний імпульсний струм, що перевищує значення номінального струму; із затриманням – це такі, що витримують короткочасне перевантаження по струму до фактичного спрацювання; для кіл з високим пусковим струмом.

Наприклад, Bourns SF-2410FP0062T-2 – це швидкодіючий прецизійний запобіжник у версії SMD (рис. 8.10). Він розрахований на роботу при 125 В змінного/постійного струму і має номінальний струм 62 мА за умови типового значення I^2t 0,0012 А²с. Запобіжник розмикається через 5 секунд при 200% номінальному струму, а на графіках далі показані основні індикатори часу спрацювання запобіжника. Також варто пам'ятати про падіння напруги $I \cdot R$ на проводі запобіжника через

його ненульовий опір, що має значення близько 6 Ом. Для номінального струму це падіння сягає максимум 40 мВ.



Рисунок 8.10 – Швидкодіючий прецизійний запобіжник у версії SMD Bourns SF-2410FP0062T-2 [70]

Технічний паспорт надає детальну інформацію про значення часу горіння вільної дуги для широкого діапазону струмів від дуже малих значень до номінального струму. Це параметр, який визначає профіль спрацьовування запобіжника в залежності від струму (рис. 8.11).

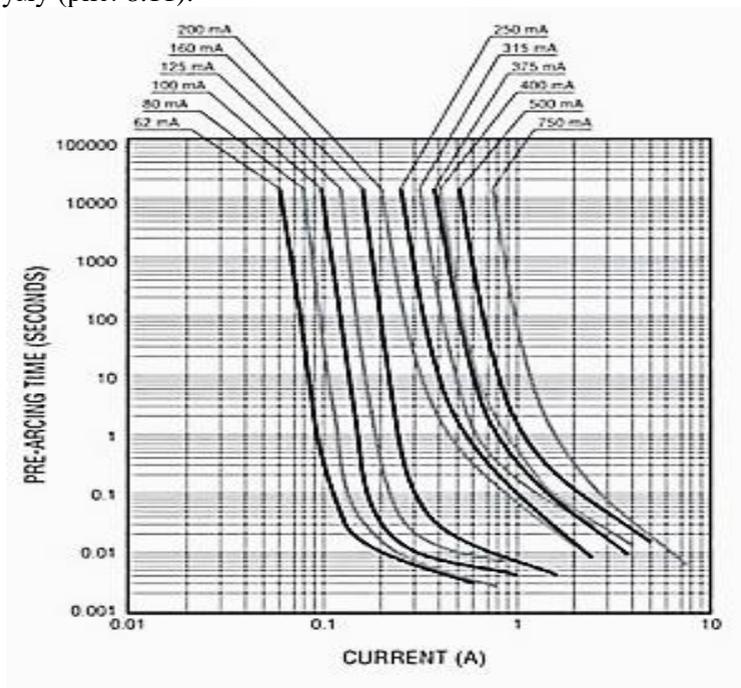


Рисунок 8.11 – Значення часу дуги від струмів запобіжників Bourns SF-2410FP0062T-2 [70]

В специфікаціях SF-2410FP0062T-2 також показаний критичний профіль I^2t для сукупної теплової енергії при різних рівнях струму, що протікає через запобіжник (рис. 8.12).

Цілом інший профіль забезпечує інерційний запобіжник (рис.9) SF-206S700 з номінальним струмом 7 А, який повинен згоріти протягом 5 секунд за умови 250% максимального номінального струму.

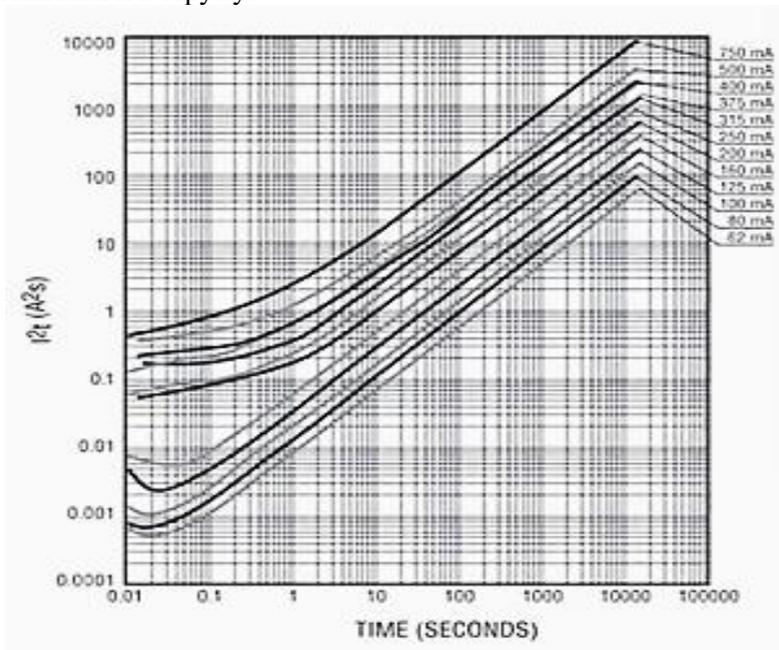


Рисунок 8.12 – Швидкодіючий прецизійний запобіжник у версії SMD Bourns SF-2410FP0062T-2 [70]

SF-1206S700 використовує технологію, відмінну від SF-2410FP-T, та виробляється в плоскому корпусі 3216 (EIA 1206, 1,55 мм x 3,1 мм) з висотою всього 0,6 мм. Його опір лише 7 мОм забезпечує невелике падіння напруги трохи менше 50 мВ при максимальному струмі.

Запобіжники з витримкою часу часто піддаються циклам високого пускового струму при включенні живлення, в технічному паспорті SF-1206S700 пояснюється вплив цих циклів

на характеристики компонентів, в тому числі в довіднику по планарним запобіжникам.

Загалом існує певна потреба в запобіжниках для поверхневого монтажу, які спрощують процес складання та виробництва, знижують схильність до вібрації та корозії конструкції, оскільки для них не потрібно гніздо-тримач.

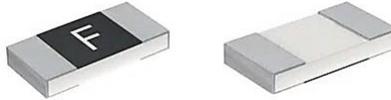


Рисунок 8.13 – 7-амперний запобіжник SF-206S700 з витримкою часу 5 с за умови 250% від максимального номінального струму у серії Bourns SF-1206S [70]

Серія запобіжників SMD пропонує розробникам широкий спектр діапазонів та типів максимального струмового захисту, які відповідають потребам сучасних друкованих плат та виробничих процесів. Нижче наведено дані SMD запобіжників від різних виробників.



**0603 slow blow
SMD fuse**
Certificate : UR ROHS
Розмір: 1,6 мм × 0,8 мм × 0,48 мм
Струм: 250 mA – 15 A
Напруга: 32 В/63 В



**6125 slow acting
SMD fuse**
Certificate : UR ROHS
Розмір: 1206
Струм: 500 mA – 7 A
Напруга: 32 В/63 В



**1206 slow blow
SMD fuse**
Certificate : UR ROHS
Розмір: 3,2 мм × 1,6 мм × 0,65 мм
Струм: 250 mA – 15 A
Напруга: 32 В/63 В

Рисунок 8.14 – Запобіжники, що здатні самовідновлюватися

Для Вашого уявлення можна подивитися відео за посиланням <https://www.youtube.com/watch?v=Ry4ZiMzT7Ok>.



Рисунок 8.15 – Швидкодіючі запобіжники

8.3 Контрольні питання

- 8.3.1. Навіщо вводиться поняття «граничний струм»?
- 8.3.2. Чому розрахунок перерізу плавкою вставки проводиться по прикордонному струму?
- 8.3.3. Чому в засипних запобіжниках застосовуються кілька паралельних плавких вставок?
- 8.3.4. Які переваги фігурної плавкої вставки порівняно зі вставкою постійного перерізу?
- 8.3.5. Які матеріали плавкої вставки краще для швидкодіючих запобіжників?
- 8.3.6. Як впливає (за всіх інших рівних умов) наявність у запобіжнику наповнювача на час його спрацьовування?
- 8.3.7. Як співвідносяться захисна характеристика запобіжника і навантажувальна характеристика об'єкта?
- 8.3.8. Поясніть що таке запобіжники, що самовідновлюються.
- 8.3.9. Чим відрізняються запобіжники з плавкою вставкою; електромеханічної конструкції; на основі електронних компонентів; таких, що самовідновлюються, з нелінійними оборотними властивостями після дії надструмів?

9 АВАРІЙНІ РЕЖИМИ В КОЛАХ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ

9.1 Засоби та ефективність захисту електричних кіл та споживачів

Для якісного та безперебійного постачання електричної енергії споживачам необхідне надійне узгодження роботи всіх елементів енергосистеми (джерела електроенергії, мережі, навантаження, пристроїв захисту). Особливу роль в цьому випадку грають пристрої захисту споживачів від можливих аварійних режимів в енергосистемі. Серед відомих і найбільш поширених таких споживачів можна виділити три характерні найпоширеніші групи: асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором (більше 50% споживачів), освітлювальні та силові напівпровідникові пристрої. Обсяг решти споживачів значно менший [10, 19, 21, 24, 45, 63].

Аналіз аварійних режимів дозволяє виділити наступні типи аварійних ситуацій, які найчастіше виникають на практиці (наприклад, споживач – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором):

- коротке замикання на затискачах двигуна, або в його статорній обмотці;
- обрив фази статорної обмотки двигуна (часто буває при захисті двигунів запобіжниками);
- загальмування ротора при пуску двигуна (частіше буває при прямому пуску двигуна);
- технологічні навантаження, що виникають при збільшенні навантаження під час функціонування двигуна;
- порушення процесу охолодження, спричинене порушенням роботи системи примусової вентиляції двигуна;
- зниження опору ізоляції, що відбувається внаслідок старіння ізоляції через циклічні температурні перевантаження.

Аварійні режими в колі асинхронного двигуна можуть викликати або короткочасне підвищення струму в 12...17 разів у порівнянні з номінальним (КЗ в колах), або тривале протікання

струму перевантаження, що в 5...7 разів перевищує номінальне значення струму. Для захисту електричних кіл від короткого замикання (КЗ) зазвичай застосовуються автоматичні вимикачі з максимальним розчіплювачем струму, реле струму, або запобіжники.

Аварійні режими, наприклад, перевантаження по струму, потребують вибору захисту, найбільш ефективного при тій чи іншій аварії. Так, при обриві фази АД найефективнішими є мінімальний струмовий та температурний захисти, а тепловий захист (теплові реле) є менш ефективним. При загальмованому роторі дуже ефективними є максимальні реле струму, а також температурний захист, але ж менш ефективним є тепловий захист. А при технологічному навантаженні найкращі результати дають температурний захист, а також ефективними є теплові реле. При порушенні охолодження двигуна захистити його може лише температурний захист. Зниження опору ізоляції статорної обмотки двигуна може спровокувати як навантаження в колі, і так само КЗ. Для захисту при цьому аварійному режимі застосовуються спеціальні пристрої контролю рівня ізоляції обмотки двигуна.

Широке впровадження силової напівпровідникової техніки в системах енергопостачання потребує застосування для її захисту ефективних пристроїв. Одним з головних недоліків силових напівпровідникових приладів є їх низька перевантажувальна здатність по струму [24, 25, 32, 45, 62], що супроводжується жорсткими умовами для апаратури захисту (щодо швидкодії, селективності та надійності спрацьовування). В даний час для захисту силових напівпровідникових приладів від короткого замикання як зовнішніх, так і внутрішніх, найчастіше застосовуються швидкодіючі автоматичні вимикачі, напівпровідникові вимикачі, вакуумні вимикачі, імпульсні дугові комутатори, швидкодіючі плавкі запобіжники тощо [51]. Доцільність застосування того чи іншого захисту силових напівпровідникових приладів визначається конкретними умовами їх експлуатації. Особлива частка захисту електричних кіл припадає на мережі напругою від 0,4 кВ до 750 кВ. Найбільш небезпечними та частими видами ушкоджень у таких мережах є КЗ між фазами та фазою на землю.

Найбільша частка споживачів припадає на мережі напругою 0,4 кВ, 6 та 10 кВ (останнім часом частіше застосовуються мережі напругою 0,66 кВ). Для живлення стаціонарних силових споживачів та освітлювального обладнання загального призначення застосовуються трифазні чотирьохпровідні мережі напругою 380/220 В з глухозаземленою нейтраллю. Силові споживачі живляться від джерела лінійної напруги, а освітлювальні прилади – від джерела фазної напруги. Потужні силові споживачі, наприклад, електродвигуни потужністю 160 кВт та більше, живляться напругою 660 В, 6 кВ і 10 кВ. Найпоширенішими аварійними режимами таких мережах є однофазні КЗ (до 60%), трифазні КЗ (до 10%), двофазні КЗ на землю (до 20%) та двофазні КЗ (до 10%). Захист електричних мереж напругою до 1000 В здійснюється, як правило, апаратами захисту, а мережі напругою понад 1000 В мають релейний захист. Найпоширенішими апаратами захисту мереж є автоматичні вимикачі та запобіжники. Якщо необхідно мати захист з високою швидкістю, чутливістю або селективністю, то застосовують релейний захист, виконаний на базі реле та автоматичних вимикачів [48, 49]. Електричні мережі напругою до 1000 В усередині приміщень повинні мати також захист від перевантаження, що має бути виконаний, як правило, на базі автоматичних вимикачів з тепловим або комбінованим розчіплювачами.

Головне завдання, що виникає при виборі апаратури захисту споживачів та електричних мереж, є узгодження захисних характеристик пристроїв захисту з граничнодопустимими навантаженнями за струмом та часом різних споживачів і мереж (проводів та кабелів). Для кожного конкретного типу споживачів найбільше узгодження може бути досягнуто з використанням певного типу апаратів захисту. На рис. 9.1, *a* наведено характеристики апарату захисту I і пускова характеристика 2 асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Характеристика I може бути реалізована автоматичним вимикачем з максимальним струмовим і тепловим розчіплювачами, або тепловим реле (у зоні струму перевантаження I_n двигуна).

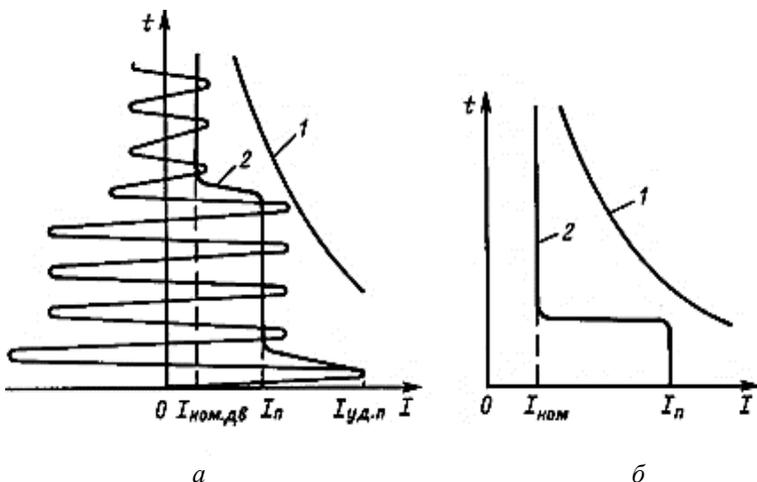


Рисунок 9.1 – Узгодження характеристик захисту та споживачів:

a – асинхронний двигун; b - перетворювач;
 1 – захисна характеристика апарату захисту; 2 – навантажувальна характеристика споживачів [45]

В свою чергу на рис. 9.1, b наведені характеристика 1 запобіжника і характеристика 2 силового перетворювача. Найбільш повне узгодження захисних і навантажувальних характеристик досягається в тому випадку, коли захисна характеристика апарату проходить вище і як найближче до навантажувальної характеристики споживача.

9.2 Особливості роботи апаратів у мережах 0,4 кВ

Застосування апаратів захисту у колах напругою 0,4 кВ визначається електричною схемою таких кіл, що в свою чергу визначає значення струмів КЗ у цих схемах [26, 27, 45]. Тому не можна розглядати та вибирати електричний апарат захисту без урахування особливостей схеми живлення, потужності джерела живлення, включаючи потужності енергосистеми, потужності та особливості роботи споживачів. Для мереж напругою 0,4 кВ струм КЗ в колі багато в чому залежить від параметрів з'єднувальних

дротів, наявності та якості контактних з'єднань, ефективності дугогасіння. При цьому правильний вибір матеріалу і перерізу з'єднувального кабелю впливає не тільки на значення струму КЗ і на пускові струми асинхронних двигунів, але також і на умови самозапуску двигуна при прямому пуску.

На рис. 9.2 наведено радіальну схему електропостачання споживачів (асинхронних двигунів M), що складається з двох незалежних підсистем. До складу кожної підсистеми входять понижуючі трансформатори $T1$ і $T2$, розташовані в комплектній трансформаторній підстанції (КТП), вторинні та третинні зборки (розподільчі пристрої РП1, РП2, РП3 та РП4).

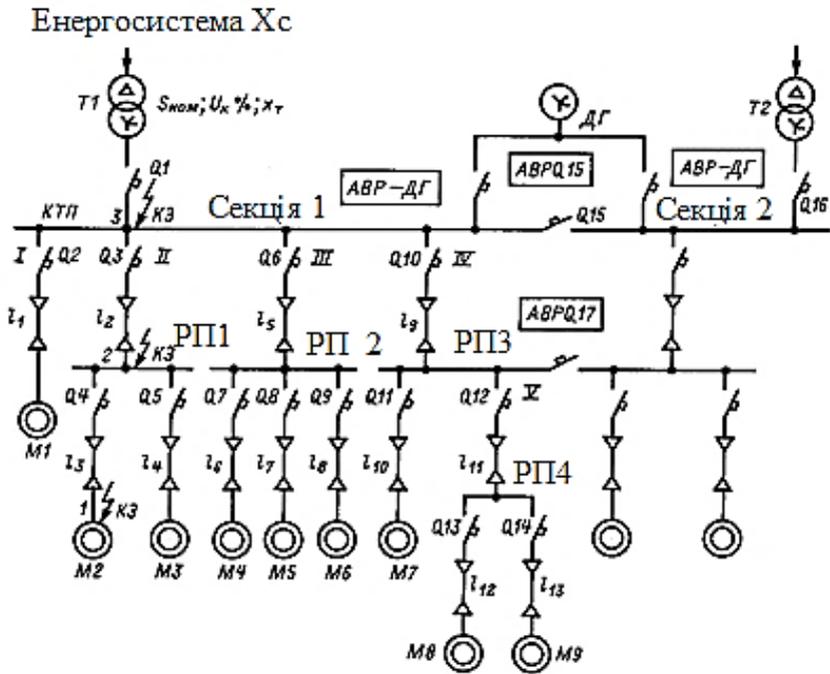


Рисунок 9.2 – Радіальна схема живлення електродвигунів:

T – трансформатори живлення; $ДГ$ – аварійний дизель-генератор;
 $АВР$ – пристрої автоматичного вмикання резерву; $РП$ – розподільчі пристрої [45].

Дві підсистеми пов'язані між собою на різних рівнях, що забезпечує взаємне резервування за допомогою пристроїв автоматичного включення резерву (АВР). Така система резервування виключає порушення подачі живлення на електродвигуни, особливо для тих, що мають робити у відповідальних технологічних процесах. Можливе застосування подвійного резервування в системі живлення, наприклад, за допомогою аварійного дизель-генератора (АВР-ДГ). Наявність зборок різного рівня дозволяє диференціювати споживачів за потужністю та ступеням важливості. Більш потужні споживачі (наприклад, асинхронні двигуни потужністю понад 55 кВт) підключаються безпосередньо до КТП, а менш потужні (до 10 кВт) – до вторинних та третинних зборок. Окрім радіальних схем електропостачання також існують магістральні та змішані. Всі вони з урахуванням особливостей мереж напругою 0,4 кВ передбачають облік структури побудови схеми, включаючи параметри з'єднувальних кабелів, з'єднань та апаратів захисту.

Для вибору апаратів захисту необхідно попередньо розрахувати струми КЗ в колах при максимальному режимі роботи живильної енергосистеми. При цьому розрахунковим струмом КЗ для вибору захисної апаратури, перевірки селективності її роботи, а також для перевірки самозапуску електродвигунів є трифазний струм КЗ. Його необхідно знати також при оцінці здатності відключення апаратів захисту. При виборі захисту, що встановлюється на початку лінії електропостачання (рис. 2.2), необхідно знати двофазний струм КЗ на затискачі двигуна в мережах з ізольованою нейтраллю і однофазний струм КЗ на затискачі двигуна в мережах із заземленою нейтраллю [45]. Крім того, однофазний та двофазний струми КЗ враховуються при перевірці чутливості апаратів захисту.

Струми КЗ можуть бути розраховані для заданої схеми електропостачання або визначені за розрахунковими кривими для найбільш розповсюджених типів трансформаторів, потужності енергосистеми, параметрів з'єднувальних кабелів з урахуванням і без урахування струмообмежувальної дії дуги в місці пошкодження [45]. При цьому не враховується активний опір енергосистеми та опір шин, а перехідний опір у місці контакту

приймається як 15 мОм. Струм КЗ може бути розрахований, якщо відомі параметри з'єднувальних кабелів та енергосистеми. Параметри з'єднувальних кабелів визначаються за умови номінальної роботи споживача.

Так для АД з короткозамкненим ротором номінальний струм двигуна визначається за формулою:

$$I_{ном.дв} = P_{ном} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_{ном.л} \cdot \eta_{ном} \cdot \cos \varphi), \quad (9.1)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність двигуна, кВт;

$U_{ном.л}$ – номінальна лінійна напруга на обмотці статора, В;

$\eta_{ном}$ – коефіцієнт корисної дії при номінальному моменті на валу двигуна;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Відповідно до [42] за номінальним струмом вибирається тип з'єднувального кабелю, його перетин і питомий опір кабелю, що дає можливість визначити активний та індуктивний опори кабелів (R_K і X_K). Параметри енергосистеми та живильного трансформатора (R_T і X_T) знаходимо використовуючи дані [14]. На практиці індуктивний опір енергосистеми X_C задається у співвідношенні з індуктивним опором X_T вторинної обмотки трансформатора, а активним опором енергосистеми нехтують. Прийнято вважати, що співвідношення X_C/X_T має дорівнювати значенням 2; 1; 0,1 відповідно до зростання потужності енергосистеми [51].

При розрахунку струму КЗ необхідно врахувати перехідний опір контактів $R_{пк}$ у місцях з'єднання кабелів та апаратів. Зазвичай в колах низької напруги перехідний опір контактів є порівняним, або перевершує опір кабелів, енергосистеми та трансформатора. Враховувати перехідний опір контактів дуже складно. Тому він приймається рівним 15 мОм, якщо його значення не відоме або важко визначити [42, 51].

Сумарний активний опір кола від трансформатора до двигуна становитиме:

$$R_{K3} = R_T + R_K + R_{ПК} .$$

Сумарний реактивний опір ланцюга:

$$X_{K3} = X_C + X_T + X_K .$$

Тоді модуль повного опору до точки КЗ:

$$Z_{K3} = \sqrt{X_{K3}^2 + R_{K3}^2} .$$

Струм трифазного КЗ дорівнює:

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном.л.}}}{\sqrt{3} Z_{K3}} . \quad (9.2)$$

Струм двофазного КЗ в мережах з ізольованою нейтраллю:

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{U_{\text{ном.л.}}}{2Z_{K3}} . \quad (9.3)$$

Ударний струм КЗ визначимо як

$$i_{y\delta} = k_{y\delta} \cdot I_{K3} \sqrt{2} , \quad (9.4)$$

де $k_{y\delta}$ – ударний коефіцієнт, що визначається за співвідношенням

X_{K3}/R_{K3} згідно [43, 51].

Для визначення струму КЗ можна скористатися розрахунковими кривими [42, 51].

9.3 Режими роботи низьковольтних комплектних пристроїв

Низьковольтний комплектний пристрій (НКП) складається з фізичних тіл, що випромінюють або споживають теплову енергію в обмеженому просторі. Оскільки температура θ в різних точках НКП не є однаковою через те, що всередині нього виникають теплові потоки, які можна описати рівнянням теплового поля [45]:

$$\theta = f(L, B, H, t), \quad (9.5)$$

де L, B, H – довжина, глибина та висота НКП;
 t – час.

Таким чином, температурне поле НКП є тривимірним та неоднорідним, що ускладнює його розрахунок. Теплота в НКП переноситься у напрямку стін шаф, оскільки вони мають нижчу температуру, ніж температура внутрішнього об'єму шафи. Тепловий потік згідно з формулою Ньютона-Рихмана

$$Q = q \cdot S_{\text{охл}}, \quad (9.6)$$

де $S_{\text{охл}}$ – площа поверхні охолодження, м^2 ;
 q – густина теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Побудувавши температурне поле внутрішнього об'єму НКП, можна уявити найуразливіші області цього пристрою, що дозволить полегшити роботу щодо раціонального розміщення елементів усередині НКП. Як основний тепловий параметр, що характеризує НКП, використовується допустима температура нагрівання частин елементів та конструкції самого пристрою. Зниження температури всередині пристрою нижче за допустиму призведе лише до збільшення габаритних розмірів НКП та зниження його техніко-економічних показників. Низьковольтний комплектний пристрій повинен нормально функціонувати при температурі середовища внутрішнього об'єму до $+55\text{ }^\circ\text{C}$, що є найефективнішим і раціональнішим [26, 27, 47, 55].

Якщо θ_1 – це температура навколишнього НКП середовища, а θ_2 – це температура всередині НКП, то їхнє співвідношення має вигляд

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{q}{k_T}, \quad (9.7)$$

де k_T – коефіцієнт тепловіддачі $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

У практичних розрахунках часто використовують поняття «перепад температури», який визначається формулою $\theta = \theta_2 - \theta_1$, та будують залежності $\theta = f(q)$.

Для підтримання температури всередині НКП в допустимих межах використовуються різні способи охолодження – природні та примусові.

Природне повітряне охолодження є найпростішим і найпоширенішим охолодженням НКП. Проте його можна використовувати лише за умови невеликої щільності теплового потоку всередині НКП. Природне охолодження використовується або у повністю закритих шафах шляхом конвекції та випромінювання із зовнішньої поверхні НКП через металеві стінки, або через спеціальні вентиляційні отвори, розташовані в нижній та у верхній частинах НКП. При цьому тепла енергія, що виділяється в елементах конвекцією, передається потоку повітря і виноситься з шафи. Ефективність роботи НКП з природною вентиляцією можна підвищити, підбираючи кількість і форму вентиляційних отворів, фарбування тепловіддаючих поверхонь тощо.

Примусова вентиляція найефективніша за умови високої щільності теплового потоку всередині НКП. Примусовий рух повітря створюється спеціальними вентиляторами, які розташовані у верхній або нижній частині НКП. При цьому можливі замкнена або розімкнена система охолодження. У замкненій системі охолодження повітря циркулює всередині обсягу НКП, а у розімкненій – повітрообмін здійснюється між навколишнім середовищем та внутрішнім об'ємом НКП. Примусова вентиляція найчастіше застосовується внаслідок високої її ефективності, надійності та простоти.

Розрахунок теплового режиму НКП проводять задля вибору необхідних габаритних розмірів, які забезпечували би нормальний тепловий стан елементів НКП. А оскільки НКП являє собою пристрій, в якому протікають два повітряні потоки з різними температурами, що розділені жорсткою стінкою, через те внутрішній тепловий потік визначається кількістю теплоти, що

виділяється елементами НКП, а зовнішній тепловий потік – тепловідводними властивостями стінок НКП та довокільям.

Можна зазначити два основні види теплових розрахунків:

1) розрахунки для визначення площі тепловіддачі, а отже, для вибору габаритних розмірів НКП, які виконуються на стадії проектування НКП;

2) розрахунки для визначення відповідності обраних габаритних розмірів нормальному тепловому режиму роботи НКП, які виконуються на будь-якому етапі проектування, виготовлення та експлуатації НКП.

Рівняння теплового балансу НКП у тривалому режимі роботи має вигляд:

$$P_{\Pi} = Q, \quad (9.8)$$

де P_{Π} – сумарна кількість теплоти, що виділяється елементами НКП, Вт;

Q – кількість теплоти, що відводиться від НКП до навколишнього середовища, Вт.

$$P_{\Pi} = \sum_{i=1}^m P_{\Pi i}, \quad (9.9)$$

де $P_{\Pi i}$ – кількість теплоти, що виділяється i -м елементом НКП, Вт;
 m – кількість елементів у НКП.

Кількість теплоти, що відводиться від НКП в навколишнє середовище, визначається згідно з (9.6). Розрахунок кількості теплоти, що виділяється всередині НКП, становить певну складність. Спростити завдання можна розраховавши кількість теплоти P_{Π} за номінальними параметрами, проте точність такого розрахунку невелика. Найкращі результати дає розрахунок кількості теплоти P_{Π} [40, 47, 55] з урахуванням коефіцієнта завантаження елементів та особливостей технологічних процесів виробництва. Більш складним є завдання розрахунку кількості теплоти, що відводиться від НКП в навколишнє середовище, та визначення коефіцієнта тепловіддачі, що залежить від температури [2]. Якщо в результаті розрахунку теплового балансу

кількість теплоти P_{Π} перевищує кількість теплоти Q , то необхідно або змінити систему охолодження, або збільшити габаритні розміри НКП, або замінити елементи, які сильно впливають на тепловий стан внутрішньої області НКП. Точний аналітичний розрахунок теплового стану НКП пов'язаний з великими труднощами, тому найбільшого поширення набули спрощені методи розрахунку з урахуванням експериментальних даних (теплових характеристик) та практичного досвіду при проектуванні таких пристроїв.

9.4 Вибір габаритних розмірів низьковольтних комплектних пристроїв та особливості їх монтажу

Для правильного вибору оптимальних габаритних розмірів НКП необхідно попередньо обрати спосіб його охолодження. При цьому необхідно знати:

- кількість теплоти P_{Π} , яку виділяють вбудовані елементи НКП;
- допустиме значення температури θ_2 внутрішньої області НКП;
- допустиме значення температури θ_1 навколишнього НКП середовища;
- попередні габаритні розміри НКП;
- необхідний ступінь захисту шафи НКП.

Наведені вище параметри можуть бути розраховані або задані згідно з вимогами, описаними в п.п. 9.1.

На рис. 9.3 наведено діаграму вибору способу повітряного охолодження НКП. Якщо знати щільність теплового потоку q всередині НКП і допустимий перепад температур θ між внутрішнім і зовнішнім середовищем НКП, можна визначити спосіб охолодження НКП, а до того ж виконати розрахунок теплового режиму НКП з використанням теплових характеристик [24, 47] і визначити площу тепловіддачі та габаритні розміри НКП для цієї схеми охолодження.

Запропонована методика вибору габаритних розмірів НКП [47] є досить ефективною і зручною для інженерних розрахунків, що дозволяє оцінити температурний режим заданого пристрою та того, що проектується.

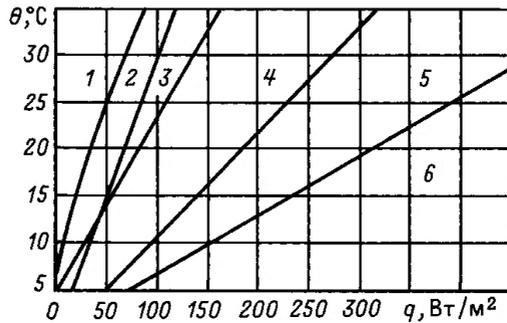


Рисунок 9.3 – Діаграма вибору способу повітряного охолодження НКП

При цьому, тобто під час проектування НКП, зручно користуватися так званими *зонами апаратів*, що входять до його комплекту. *Зона апарату* є прямокутником навколо апарату, розміри її визначаються габаритними розмірами апарату, можливістю підключення до нього зовнішніх дротів, зручністю монтажу та експлуатації, припустимістю виключення впливу апарату на сусідні елементи НКП. Таким чином, зони апаратів у пристрої фактично є початковими габаритними розмірами у вигляді *корисної площі* НКП. Набір зон апаратів, затискачів, приладів дозволяє вибрати із стандартного ряду апаратів (типів, серій тощо) попередні розміри НКП, які згодом уточнюються при тепловому розрахунку. На рис. 9.3. надано діаграму вибору способу повітряного охолодження НКП, на якій позначено:

- 1 – зона використання НКП закритого типу з природним охолодженням;
- 2 – зона використання НКП закритого типу із внутрішньою примусовою вентиляцією;
- 2, 3 – зона використання НКП із природною вентиляцією;
- 3, 4 – зона використання НКП з примусовою внутрішньою та зовнішньою вентиляцією;

– 4, 5 – зона використання НКП з примусовою вентиляцією.

Після всіх розрахункових та проектних робіт монтаж НКП необхідно виконувати з урахуванням наступних вимог:

– апарати в НКП потрібно кріпити на С-подібних рейках безпосередньо або за допомогою перехідних пластин;

– великогабаритні апарати потрібно розміщувати внизу НКП на рейках або на основі, або за межами НКП чи на кришці НКП;

– монтаж потрібно виконувати гнучким дротом або шиною, в коробах чи джгутах;

– вся вимірювальна або регулювальна апаратура має розташовуватися на відстані від 600 до 1800 мм від підлоги;

– зовнішні, внутрішньопанельні, міжблочні, а також інші з'єднання необхідно виконувати за допомогою силових набірних затискачів;

– всередині НКП з'єднувальні дроти маркуються для зручності монтажу та експлуатації.

Комплекти релейного захисту та автоматики серії КРЗА вітчизняного виробництва (рис. 9.4) зазвичай включають до свого складу [66]:

– мікропроцесорний пристрій або струмове реле серії АЛ,

– блок управління або / та блок живлення вимикачем,

– органи управління вимикачем (кнопки або ключі),

– органи індикації (СДІ або / та реле вказівні),

– кола сигналізації, обслуговування (накладка «Режим роботи»),

– кола вимірювань (амперметр, вольтметр вбудованих в МП пристрій або окремо),

– лічильник електроенергії (опційно), кола автоматичного диспетчерського керування.

Також додатково можуть бути пристрої КРЗА для захисту низьковольтних електричних кіл від атмосферних перенапруг, підвищень і знижень напруги мережі живлення (220 В...380 В), тривалих струмових перевантажень, струмів короткого замикання, струмів витоку, що виникають, а також від потенційної можливості розкрадання електричної енергії деякими способами.

Вони забезпечують захист людини від ураження електричним струмом та запобігають пожежам через неякісну електропроводку.

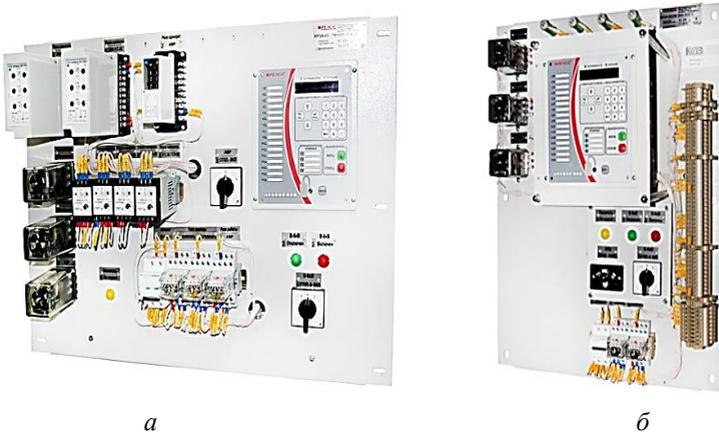


Рисунок 9.4– Панелі КРЗА-05 із втопленим монтажем РЗЛ-05 (а) та КРЗА-05 з виступаючим монтажем РЗЛ-05 (б) виробництва компанії РЕЛСіС [39, 65, 66]

Ця апаратура побудована на базі промислових та побутових реле контролю трифазної або однофазної напруги з (або без) таймером. Різновидом є пристрій КРЗА-26 (АВР) – для автоматичного ввімкнення резервного живлення споживачів в разі зникненні напруги (0,4-10 (6) кВ) основного джерела живлення, а також контролю та захисту електричних кіл та індикації виникнення аварійної ситуації та нормальних параметрів у контрольованій мережі. Основа КРЗА-26 – це промислові реле контролю трифазного напруги.

Зручність та безпека обслуговування означає, що НКП має бути надійно захищеним від випадкового дотику обслуговуючого персоналу до струмопровідних та рухомих частин, а елементи НКП – від впливу зовнішнього середовища та механічних пошкоджень. При цьому, до елементів НКП, які потребують систематичного контролю та спостереження в процесі експлуатації повинен бути зручний доступ (наприклад, до контактних з'єднань).

Зручність спостереження за роботою апаратів означає, що вимірвальні прилади та апарати ручного керування (кнопки, рубильники, вимикачі тощо) повинні розташовуватися на зручному для спостереження рівні (на висоті від 600 до 1800 мм від рівня підлоги).

Зручність підключення зовнішніх з'єднань означає, що зовнішні з'єднання підключаються через затискачі, розташовані всередині НКП.

Зручність ремонту та заміни апаратів, приладів та інших елементів НКП.

Виключення можливого взаємного впливу апаратів одне на одне, при цьому розуміються можливі теплові, електромагнітні та механічні впливи апаратів. Надмірне нагрівання окремих апаратів, перекидання електричної дуги відключення, механічна вібрація апаратів, магнітні поля і взаємної індуктивності можуть викликати помилкові спрацьовування і відключення, розрегулювання апаратів, перегрів і зміна характеристик апаратів та окремих його вузлів та інші несанкціоновані дії.

Тому апарати, що є джерелами зовнішніх впливів, повинні розміщуватися на відстані від інших апаратів, у нижній або верхній частинах НКП, а іноді і за межами НКП. Особливі вимоги пред'являються до вибору площі поверхні охолодження НКП та умов його охолодження. Залежно від характеру, тривалості та умов нагріву розрізняють три основні режими роботи НКП: тривалий, короткочасний та повторно-короткочасний.

9.5 Контрольні питання

9.5.1 Які аварійні режими існують у енергосистемах низької напруги?

9.5.2 Що таке комплекти релейного захисту та автоматики?

9.5.3 Які функції НКП та вимоги, що висуваються до них?

9.5.4 У чому особливості теплового розрахунку НКП?
Перелічіть способи вентиляції.

9.5.5 Як вибрати спосіб охолодження НКП?

9.5.6 Що таке "зона апарату" у НКП? Чим вона визначається?

9.5.7 У чому особливості монтажу НКП?

10 ВИБІР АПАРАТІВ КЕРУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ТА ОБЛАДНАННЯ

10.1 Методика вибору контакторів та магнітних пускачів для керування та захисту електричних двигунів

Правильний і раціональний вибір пускозахисних апаратів для кіл керування приймачів електричної енергії (електропечей, електромагнітних приводів вимикачів високої напруги, електроосвітлювальної апаратури, електричних двигунів тощо) є основоположним при розробці схем керування та захисту. Велика різноманітність схем керування як за потужністю, так і за ступенем відповідальності, надійності, економічності змушує мати справу з такою ж (або більшою) різноманітністю виконавчих елементів, правильний вибір яких зазвичай визначає техніко-економічні показники об'єкта керування загалом. Серед основних показників, що характеризують якість виконавчих елементів, можна відокремити: надійність, економічність, достатній термін служби, що найменші масу та габаритні розміри, невеликі експлуатаційні витрати, низьку вартість, високу технологічність тощо. Вибір тих чи інших показників якості (як правило, суперечливих) залежить від об'єкта керування та вимог, що пред'являються до нього.

Розглянемо контактні виконавчі елементи керування, найбільш поширені як за кількістю, так і за номенклатурою виробів, що випускаються, – контактори і магнітні пускачі, а також зазначимо параметри, згідно з якими проводиться їх вибір. Контактори або пускачі повинні вибиратися відповідно до таких основних технічних параметрів (див. п.п. 1.2):

- призначення та сфери застосування;
- рід струму, кількість та виконання головних та допоміжних контактів;
- номінальна напруга та струм головного кола;
- категорія застосування;
- режим роботи;
- кліматичне виконання та категорія розміщення;
- механічна та комутаційна зносостійкості;

– номінальна напруга і потужність споживання котушок, які включають.

Контактори і пускачі, що випускаються світовою промисловістю, часто розробляються для певного типу об'єкта керування. Наприклад, для включення та відключення приймачів електричної енергії в металургійній, хімічній та інших галузях промисловості використовуються контактори КТ 6600, для включення та відключення асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором рекомендується застосовувати контактори КМ 13, КТ 12Р, пускачі серій ПМЕ, ПМА і ПМЛ тощо. Для гасіння поля синхронних машин і для кіл, де є неприпустимим відключення контактора за відсутності напруги в колі живлення обмотки керування, можна рекомендувати контактори КТ 6000/3, в силових колах генераторів і двигунів постійного струму застосовуються контактори КП 7 і КП 207, в судових електротехнічних пристроях частіше застосовуються контактори КМ 2000, для роботи в силових електричних колах постійного струму тепловозів широко застосовуються контактори серії МК, для дистанційного включення електромагнітних приводів вимикачів високої напруги і в пристроях АПВ використовуються контактори МК 2-20 Б. Деколи контактори та пускачі рекомендуються для включення та відключення приймачів електричної енергії без зазначення їх типів (при цьому обов'язково вказується категорія застосування). Прикладом таких контакторів є контактори КТ 6000, КТ 7000, КТП 6000, КТ 6000/2 та інших. Для об'єктів керування з високим ступенем відповідальності, а також для об'єктів, що працюють у спеціальних умовах (у вибухонебезпечних середовищах, з підвищеною температурою та вологістю, понад 1000 метрів над рівнем моря, з високим рівнем вібрації та тряски тощо), розробляється спеціальна апаратура керування [71, 73, 78, 86].

Відповідно до призначення пускачі випускаються нереверсивними (для керування електродвигунами при незмінному напрямку обертання) та реверсивними (для керування електродвигунами при змінних напрямках обертання), причому в реверсивних пускачах можливе виконання з електричним блокуванням або з електричним і механічним блокуванням. Крім

того, пускачі виконуються із вбудованими в оболонку кнопками керування або без них. Призначення пускача визначає наявність у ньому теплового реле. Пускачі, що виконують функції захисту двигуна від перевантажень, викликаних тривалим протіканням струмів, які є вищими за номінальні, комплектуються тепловими реле. Пускач може випускатися без теплового реле (наприклад, із позисторним захистом) з кнопкою керування в захисній оболонці.

Теплові реле разом із лінійними контакторами (магнітні пускачі) застосовуються для захисту двигунів, які працюють у тривалому режимі (робочий період становить щонайменше 30 хвилин). Застосування теплових реле для захисту двигунів, що мають повторно-короткочасні режими роботи, є недоцільним через недостатню чутливість нагрівального елемента до його теплового стану, обумовленого циклічним характером струмового навантаження, що змінює часові характеристики теплового реле. Використання теплових реле при роботі двигуна в повторно-короткочасному режимі, а також поблизу пристроїв, що випромінюють додаткове тепло, може призвести до помилкових спрацьовувань реле.

Важливими параметрами теплового реле є:

- *номінальна напруга реле* ($U_{\text{ном}}$);
- *номінальний струм реле* ($I_{\text{ном}}$) – це найбільший струм, тривале протікання якого не викликає спрацьовування реле;
- *номінальний струм нагрівача* ($I_{\text{ном. нагрів}}$) – це найбільший струм, при тривалому протіканні якого через реле, у складі якого є цей нагрівач, воно не спрацьовує (якщо реле має змінні нагрівачі, то мінімальний номінальний струм реле дорівнює найбільшому з номінальних струмів нагрівачів, які можуть бути встановлені в даному реле, якщо ж реле виконано з регулятором, то значення струмів $I_{\text{ном}}$ та $I_{\text{ном. нагрів}}$ відповідають середньому положенню регулятора);
- *номінальний струм уставки реле* $I_{\text{ном. уст}}$ – це найбільший тривалий струм, який при певному налаштуванні реле не викликає його спрацьовування.

Окрім того основною характеристикою реле є *залежність часу спрацьовування реле $t_{\text{спр}}$ від кратності струму I , що протікає*

через його нагрівальний елемент по відношенню до номінального струму нагрівання $I_{\text{ном.нагрів}}$.

Час повернення теплових реле в робочий стан (в реле без самоповернення або без кнопки повернення) не перевищує 2-3 хвилин. За наявності самоповернення та кнопки повернення цей час скорочується до 30...60 с.

Теплові реле, що конструктивно вбудовані в магнітні пускачі, вибираються за такими основними параметрами, як:

- типовиконання реле;
- конструктивні особливості;
- номінальний струм нагрівального елемента (нагрівача);
- струм неспрацьовування (уставки за струмом) та діапазон його зміни;
- час спрацьовування (при 20%-ному збільшенні струму по відношенню до номінального значення);
- час спрацьовування при струмах перевантаження (наприклад, при пусковому струмі двигуна).

Відповідно до типовиконання теплові реле випускаються одно-, дво- і триполюсні. Ступінь захисту і кліматичне виконання реле визначаються пускачами, в які вони вбудовуються.

Теплові реле мають (або може бути відсутньою) температурну компенсацію, регулятор уставки струму неспрацьовування, самоповернення (дистанційне або ручне повернення), можливості зміни нагрівального елемента, або прискореного спрацьовування реле при обриві фази. Конструктивні особливості реле визначаються кількістю контактів, що комутують. Вибір типу теплового реле, вбудованого в магнітний пускач, проводиться за умови рівності номінального струму нагрівача та двигуна [51]:

$$I_{\text{ном.нагрів}} = I_{\text{ном.дв}} \cdot \quad (10.1)$$

Пускачі серій ПМА та ПМЕ мають вбудовані теплові реле типу РТТ, а пускачі серії ПМЛ – реле типу РТЛ. Реле РТТ та РТЛ виконані з температурним компенсатором, що дозволяє значно зменшити вплив температури навколишнього середовища на

часові характеристики реле, а також з регулятором струму уставки (струму неспрацьовування реле).

Якщо знати межі регулювання струму неспрацьовування, що змінюються для теплового реле РТТ в межах від 0,85 до 1,15, та для РТЛ – в межах від 0,75 до 1,25 номінального струму нагрівача, то можна визначити діапазон зміни номінального струму нагрівача

$$I_{\text{неспр.мах}} \geq I_{\text{ном.нагрів}} \geq I_{\text{неспр.мін}} , \quad (10.2)$$

де $I_{\text{неспр.мін}} = (0,75 \text{ або } 0,85) I_{\text{ном.нагрів}} ;$

$$I_{\text{неспр.мах}} = (1,15 \text{ або } 1,25) I_{\text{ном.нагрів}} .$$

Якщо температурна компенсація в реле відсутня, необхідно враховувати вплив температури навколишнього середовища на вибір струму $I_{\text{ном.нагрів}}$, значення якого зменшиться:

$$I_{\text{ном.нагрів } \vartheta} = I_{\text{ном.нагрів}} \left[1 - \frac{\delta}{100} \frac{(\vartheta_{\text{оточ}} - \vartheta_{\text{ном.оточ}})}{10} \right] , \quad (10.3)$$

де δ – коефіцієнт зміни номінального струму нагрівача на кожні 10°C різниці $(\vartheta_{\text{оточ}} - \vartheta_{\text{ном.оточ}})$ в $\%$, який обирається з паспорта реле;

$\vartheta_{\text{ном.оточ}}$ – номінальна температура оточуючого середовища в градусах Цельсія, яка зазвичай обирається згідно з ГОСТ рівною 40°C .

З формули (10.3) з урахуванням (10.1) вираховується номінальний струм нагрівача, згідно з яким і обираються безпосередньо сам нагрівач, його тип і виконання теплового реле:

$$I_{\text{ном.нагрів}} = \frac{I_{\text{ном.дв}}}{1 - \frac{\delta}{100} \frac{(\vartheta_{\text{оточ}} - \vartheta_{\text{ном.оточ}})}{10}} . \quad (10.4)$$

Якщо реле знаходиться поза межами кожуха пускача, то $I_{\text{ном.нагрів}}$ приймається на 10-15% більшим за розрахунковий.

За умови включення елемента, який нагріває, у вторинну обмотку трансформатора струму в формулі (6.12) замість $I_{\text{ном.дв}}$ необхідно підставити таке співвідношення $\frac{I_{\text{ном.дв}}}{K_{T.T}}$, де $K_{T.T}$ - це коефіцієнт трансформації струму. А для захисту теплових реле від струмів короткого замикання використовуються максимальні струмові реле, запобіжники або автоматичні вимикачі [51]. Час спрацьовування $t_{\text{спр}}$ вибраного теплового реле при 20%-ному збільшенні струму в обмотці двигуна, тобто при $I_{\text{спр}} = 1,2 I_{\text{ном.нагрів}}$ не повинен перевищувати 20 хвилин. Для визначення $t_{\text{спр}}$ зазвичай використовують захисну характеристику реле $t_{\text{спр}} = f(I / I_{\text{ном.нагрів}})$.

Під час пуску двигуна час спрацьовування $t_{\text{спр}}$ теплового реле має бути більше часу пуску $t_{\text{п}}$ ненавантаженого двигуна, тобто

$$1,5 t_{\text{п}} \geq t_{\text{спр}} > t_{\text{п}}.$$

Якщо ця умова не виконується, необхідно змінити значення $I_{\text{ном.нагрів}}$ в межах регулювання струму неспрацьовування, або змінити тепловий елемент, який нагріває. Після вибору теплового реле для магнітного пускача будуються захисна характеристика реле та характеристика навантаження двигуна, після чого перевіряється правильність їх узгодження.

10.2 Приклад вибору контактора (магнітного пускача) для керування та захисту асинхронного двигуна серії 4А

Для керування та захисту від тривалих струмів перевантаження асинхронного двигуна часто використовуються контактори у поєднанні з тепловими реле або магнітні пускачі, в яких контактор і реле разом з кнопками керування розміщені в

захисному кожусі і є автономними апаратами. Нехай необхідно вибрати контактор (магнітний пускач) для управління та захисту асинхронного двигуна 4AP1324, що працює в тривалому режимі. За типом двигуна згідно [45] визначимо його параметри:

- номінальна потужність двигуна $P_{\text{НОМ}} = 7,5 \text{ кВт}$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta_{\text{НОМ}} = 87,5\%$;
- коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,86 \cos \varphi$;
- номінальна лінійна напруга на обмотці статора $U_{\text{НОМ.Л}} = 380 \text{ В}$;
- коефіцієнт кратності пускового струму $k_I = 6,5$;
- час пуску двигуна $t_{\text{П}} = 5 \text{ с}$.

Основні технічні параметри, згідно з якими проводиться вибір, є наступними:

- *призначення та сфери застосування* (з найбільш відомих основних типів контакторів і магнітних пускачів в даному разі можуть застосовуватися контактори МК1,2; КМ 2000; КТ 6600; КМ13; КТ12Р; МК3 з тепловими реле серії РТТ, РТЛ, РТН або магнітні пускачі серій ПМЕ, ПМА, ПМЛ;

- *рід струму, кількість та виконання головних та допоміжних контактів* (рід струму є змінним, частота дорівнює 50 Гц згідно зі схемою включення двигуна (рис. 10.1, а) апарат повинен мати не менше трьох силових контактів і одного допоміжного контакту, що замикаються);

- *номінальна напруга та струм силового кола* (номінальна напруга дорівнює 380 В, а номінальний струм не повинен бути нижчим за номінальний струм двигуна);

- *категорія застосування* (апарат повинен працювати в одній із категорій застосування: або АС-3, або АС-4);

- *режим роботи* (режим роботи апарату є тривалий з частими прямими пусками двигуна);

- *кліматичне виконання та категорія розміщення* (апарат призначений для експлуатації в середовищі з помірним кліматом (У) в категорії розміщення – 3);

– якість техніко-економічних показників (показники якості) вибираємо комутаційну зносостійкість (цей показник основний та його «вага» – 0,7) та масу апарату (його «вага» – 0,3).

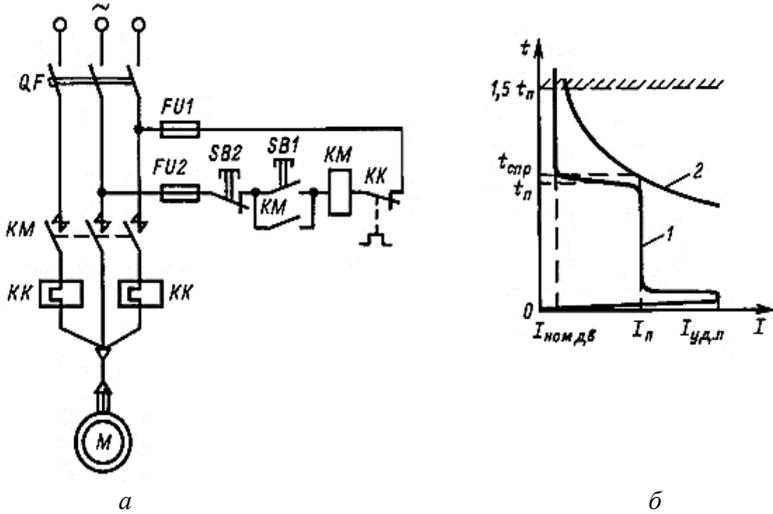


Рисунок 10.1 – Схема прямого пуску та захисту асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (а), (б) – пускова характеристика двигуна (1) та захисна характеристика теплового реле (2) [45]

Послідовність вибору апарату є наступною.

1) Попередній розрахунок.

Перш ніж провести вибір апарату за основними технічними параметрами, необхідно розрахувати номінальний та пусковий струми двигуна [45]:

$$I_{\text{НОМ.ДВ}} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ.Л}} \eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi},$$

після підстановки отримуємо

$$I_{\text{НОМ.ДВ}} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1 \text{ А.}$$

Пусковий струм двигуна (тобто його діюче значення) (див. рис. 10.1, б) розраховується згідно з формулою:

$$I_{\Pi} = k_{\Gamma} \cdot I_{\text{ном.дв}} ,$$

$$I_{\Pi} = 6,5 \cdot 15,1 = 98,2 \text{ А} .$$

Ударний пусковий струм (амплітудне значення) розраховується як

$$I_{\text{уд.}\Pi} = (1,2 \dots 1,4) \sqrt{2} I_{\Pi} .$$

Отже приймаємо

$$I_{\text{уд.}\Pi} = 1,3 \sqrt{2} I_{\Pi} = 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 98,2 = 180,5 \text{ А} .$$

2) Вибір апаратів за основними технічними параметрами.

Спочатку вибираємо магнітний пускач із вбудованим тепловим реле за основними технічними параметрами для заданого схемного рішення (рис. 10.1, а).

У таблиці 10.1 наведено результати вибору магнітних пускачів і деякі їх технічні параметри. Перевіримо можливість роботи вибраних апаратів у категоріях застосування АС-3 та АС-4.

У категорії застосування АС-3 магнітний пускач повинен включати в нормальному режимі комутації струм (див. п.п. 1.2)

$$I_{\text{вм}} = 6 I_{\text{н.р.}} \geq I_{\Pi} ,$$

а в режимі рідких комутацій

$$I_{\text{вм}} = 10 I_{\text{н.р.}} \geq I_{\text{уд.}\Pi} .$$

Обидві умови обраними пускачами виконуються, оскільки

$$I_{\text{вм}} = 6 \cdot 22 = 132 \text{ А} \rangle I_{\Pi} = 98,2 \text{ А} ;$$

$$I_{\text{вм}} = 10 \cdot 22 = 220 \text{ А} \rangle I_{\text{уд.}\Pi} = 180,5 \text{ А} .$$

У категорії застосування АС-4 магнітний пускач повинен відключати у нормальному режимі комутації струм (див. п.п. 1.2)

$$I_{\text{ВМ}} = 6 \cdot 10 = 60 \text{ А} .$$

Цей струм є меншим за пусковий струм двигуна.
У режимі рідкісних комутацій струм дорівнюватиме

$$I_{\text{ВМ}} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ А} ,$$

також менший за ударний пусковий струм двигуна, який виникає в колі.

А отже обрані магнітні пускачі, які призначені для роботи у категорії застосування АС-4, в даних умовах є непридатними.

Теплові реле серії РТЛ, вбудовані в магнітні пускачі мають регульований час спрацьовування $t_{\text{спр}} = 4,5 \dots 9 \text{ с}$, що є прийнятним в заданих умовах пуску двигуна, тобто задовольняє умові ($1,5 t_{II} \geq t_{\text{спр}} > t_{II}$). На рис. 10.1, а наведені пускова характеристика двигуна та захисна характеристика теплового реле.

Крім того, для реалізації схеми пуску двигуна можна використовувати контактор та додаткове теплове реле. Основні технічні параметри контакторів, обраних ті самі вихідні дані, наведено в таблиці 10.2.

Перевірка контакторів на працездатність у категоріях застосування АС-3 та АС-4 показала, що контактори МК 2-30 можуть працювати у категорії застосування АС-4, контактори КМ 2311 – у категорії застосування АС-3.

Тому можна зробити висновок, що у даному випадку для захисту двигуна від перевантаження придатні теплові реле серії ТРН, технічні параметри яких наведені в таблиці 10.2. Час спрацьовування реле регулюється в діапазоні 3...25 с, що є цілком прийнятним.

Таблиця 10.1 – Результати вибору магнітних пускачів [45]

Тип пускача	Номинальний струм, А	Номинальний робочий струм, А	Категорія використання	Ступінь захисту	Час спрацювання теплового реле при $b_{ном}$, с
ПМЛ 221002	25	22	АС-3	IP54	4,5–9
ПМЛ 222002	25	22	АС-3	IP54	4,5–9
ПМЛ 223002	25	22	АС-3	IP54	4,5–9
ПМЛ 272002	25	22	АС-3	IP54	4,5–8
ПМЛ 221002	25	10	АС-4	IP54	4,5-9
ПМЛ 222002	25	10	АС-4	IP54	4,5–9
ПМЛ 223002	25	10	АС-4	IP54	4,5–9
ПМЛ 272002	25	10	АС-4	IP54	4,5–9

Таблиця 10.2 – Результати вибору контакторів [45]

Тип контактора	Номинальний струм, А	Категорія використання	Ступінь захисту	Число допоміжних контактів	Кліматичне виконання
МК1-30У3А	16	АС-4	IP00	2з-2р	УХЛЗ
МК1-30У3Б	16	АС-4	IP00	2з-2р	УХЛЗ
МК2-30У3А	25	АС-4	IP00	2з-2р	УХЛЗ
МК2-30У3Б	25	АС-4	IP00	2з-2р	УХЛЗ
КТ6000/01	16	АС-4	IP00	1з-2з; 3з-3р	УХЛЗ
КМ 2311-7	25	АС-3	IP00	1з-0р	М; ОМ
КМ 2311-8	25	АС-3	IP00	2з-0р	М; ОМ
КМ 2311-9	25	АС-3	IP00	1з-1р	М; ОМ

3) Вибір апаратів за техніко-економічними критеріями.

Згідно з вихідними даними такими, як техніко-економічні критерії задані комутаційна зносостійкість (з «вагою» параметра – 0,7) та маса апарату (з «вагою» – 0,3). З урахуванням цих критеріїв проведено оптимізаційний розрахунок. Кращими (оптимальними) апаратами є: магнітний пускач ПМЛ 221002, контактор МК2-30У3А та теплове реле ТРН-25 [45].

Таблиця 10.3 – Результати вибору теплових реле [45]

Тип теплового реле	Виконання реле	Номінальний струм теплового елемента, А	Тип елемента нагріву	Засіб повертання	Ступінь захисту	Межі регулювання струму відносно номінального, А
ТРН-25	2	16	ЗМІН	РУЧ	ІР00	12–20
ТРН-25	2	20	ЗМІН	РУЧ	ІР00	15–25
ТРН-25	2	25	ЗМІН	РУЧ	ІР00	18,7–25
ТРН-40	2	16	ЗМІН	РУЧ	ІР00	12–20
ТРН-40	2	20	ЗМІН	РУЧ	ІР00	15–25
ТРН-40	2	25	ЗМІН	РУЧ	ІР00	18,7–31,2

10.3 Методика вибору автоматичних вимикачів для захисту електричних кіл та електричного обладнання

Автоматичні вимикачі є найпоширенішими апаратами захисту кіл та споживачів від аварійних режимів (див. п.п. 7.2, 7.3). Вони також призначені для нечастих вмикань та відмикань струмів навантаження (номінальних струмів). Автоматичні вимикачі рекомендується вибирати за такими основними технічними параметрами:

- призначення, області застосування та виконання;
- роду струму та числу основних контактів;
- типу розчіплювача, вбудованого у вимикач;
- номінальному струму розчіплювача;

- кратності уставки струму відсічення до номінального струму розчіплювача (для максимально-струмових розчіплювачів);
- номінальній уставці на струм спрацьовування теплового розчіплювача (для теплових розчіплювачів);
- часу спрацьовування теплового розчіплювача в режимі навантаження;
- граничної комутаційної спроможності вимикача;
- типу приєднання провідників, що підводять;
- виду приводу вимикача;
- способу встановлення вимикача в низьковольтний комплектний пристрій;
- кліматичного виконання, категорії розміщення та ступеня захисту;
- числу загальних циклів комутації та числу комутацій під навантаженням.

Різноманітність технічних параметрів автоматичних вимикачів робить їх вибір досить складним та трудомістким. По виконанню автоматичні вимикачі розрізняються на струмонеобмежувальні, струмообмежувальні та селективні [64, 72, 73, 76, 77, 87, 93].

Струмонеобмежувальні вимикачі відмикають кола, коли коротке замикання досягає очікуваного значення, що встановився.

Струмообмежувальні вимикачі обмежують струм короткого замикання шляхом швидкого введення в ланцюг додаткового опору електричної дуги і подальшого швидкого відключення короткого замикання. При цьому струм короткого замикання не досягає очікуваного максимального значення. Подібні вимикачі мають спеціальну контактну систему і відрізняються підвищеною швидкодією.

Селективні вимикачі дозволяють в процесі експлуатації регулювати струм і час спрацьовування максимального струмового захисту. Це дає можливість здійснити селективний (виборний) захист споживачів та кіл (див. п.п. 7.5).

Струмообмежувальні та селективні вимикачі є більш складнішими і дорогими апаратами, тож їх застосування має бути технічно та економічно обґрунтованим.

Головним елементом вимикача, який контролює стан кола та видає команду на відключення за наявності ненормальних режимів, є вбудований у нього розчіплювач. Він виконує роль вимірювального органу і в залежності від його типу захищає коло від тієї чи іншої аварійної ситуації.

Електромагнітні розчіплювачі виконують функції захисту кіл від великих перевантажень струмом або від КЗ.

Теплові розчіплювачі призначені для захисту в області перевантажень, що в 5...7 разів перевищують номінальний струм.

Напівпровідникові розчіплювачі мають широкий спектр захисних функцій (захист від КЗ, перевантажень по струму) з великими можливостями регулювання.

Мінімальні та нульові розчіплювачі виконують захисні функції від зниження напруги в мережі. Наприклад, мінімальний розчіплювач забезпечує відключення вимикача при напрузі 70...35% номінальної, а нульовий розчіплювач – при 35...10% номінальної. Мінімальні розчіплювачі часто використовуються для дистанційного відключення автомата.

Незалежні розчіплювачі служать для дистанційного керування (відключення) автоматичним вимикачем.

Сучасні автоматичні вимикачі мають вбудовані розчіплювачі, що встановлюються заводом-виробником та розраховані на задані номінальні струми. *Номінальний струм розчіплювача* ($I_{ном,р}$) відрізняється від *номінального струму вимикача (автомату)* ($I_{ном,а}$), але не перевершує його. Автоматичний вимикач АК 63 на номінальний струм 63 А може бути укомплектований розчіплювачами, розрахованими на струми від 0,63 А до 63 А. Тому вибір вимикача проводиться за номінальним струмом його розчіплювача.

Вимикачі з *максимальним струмовим розчіплювачем* забезпечені пристроєм відсічення (відсічка), кратність уставки якої по відношенню до номінального струму розчіплювача налаштовується (настроюється) від значення максимально можливого перевищення струму понад номінального значення в процесі нормальної роботи споживача. Для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором відсікання вимикача налаштовується

від значення ударного пускового струму двигуна, яке на 10...20% перевищує його значення, тобто

$$I_{\text{відс}} = (1,1 \dots 1,2) I_{\text{УД,П}} \quad (10.5)$$

При цьому номінальне значення відсічення автоматичного вимикача $I_{\text{НОМ.ВІДС}}$ має бути не менше $I_{\text{відс}}$, але не повинна перевищувати мінімальне значення струму КЗ в електричному колі. В каталогах на автоматичні вимикачі значення відсічення наводяться в абсолютних або відносних (у кратності до номінального струму розчіплювача) значеннях.

Номінальна уставка на струм спрацьовування теплового розчіплювача вимикача $I_{\text{НОМ.Т}}$ дорівнює середньому значенню між струмом неспрацьовування розчіплювача – тобто $1,1 \cdot I_{\text{НОМ.Р}}$ та нормованим значенням струму спрацьовування – $1,45 \cdot I_{\text{НОМ.Р}}$, тобто

$$I_{\text{НОМ.Т}} = (1,1 I_{\text{НОМ.Р}} + 1,45 I_{\text{НОМ.Р}}) / 2. \quad (10.6)$$

Час спрацьовування теплового розчіплювача автоматичного вимикача знаходиться з його захисної характеристики по струму перевантаження, що тривалий час протікає в електричному колі.

У вимикачах широко використовуються два типи приєднання: переднє та заднє, а самі вимикачі розташовуються у розподільчому пристрої у стаціонарному або висувному виконанні. Вимикачі можуть забезпечуватися ручним або рухомим та електромагнітним приводами залежно від типу вимикача та його номінального струму.

Інші технічні параметри автоматичних вимикачів докладно описані у п.п. 7.2 – 7.5.

10.4 Приклад вибору автоматичних вимикачів з урахуванням селективності їх роботи

Вибрати автоматичні вимикачі з максимальним струмовим розчіплювачем (відсікання) для селективного захисту кола

радіальної схеми живлення електродвигунів з короткозамкненим ротором (див. рис. 9.2) при виникненні короткого замикання на затискачах двигуна живильної, враховуючи, що двигуни в схемі однакові (див. приклад у п.п. 10.2). Параметри схеми наступні:

- потужність трансформатора живлення Т1 $S_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$;
- напруга короткого замикання $U_{\text{КЗ}} = 5,5\%$;
- співвідношення опорів системи живлення та трансформатора $X_{\text{С}} / X_{\text{Т}} = 0,1$;
- довжина з'єднувального кабелю $l_2 = 100 \text{ м}$;
 $l_3 = 20 \text{ м}$;
- матеріал кабелю алюміній.

Послідовність вибору апаратів є наступною.

1) Попередній розрахунок.

Визначаються параметри навантаження (в даному випадку визначені з попереднього прикладу) номінальний та пусковий струми двигуна М2:

$$I_{\text{ном.дв}} = 15,1 \text{ А}; I_{\text{П}} = 98,2 \text{ А}; I_{\text{уд.П}} = 180,5 \text{ А}.$$

Визначається очікуваний струм у колі при трифазному короткому замиканні на затискачах двигуна в точці 1, на в точці з'єднання 2 і на затискачі КТП в точці 3 (див. рис. 9.2). Для цього необхідно вибрати переріз з'єднувальних кабелів l_2 та l_3 . Відповідно до [64] вибираємо алюмінієві трижильні кабелі з гумовою ізоляцією, прокладені в одній трубі. Їх перетини для ділянки $l_2 = 2,5 \text{ мм}^2$, для $l_3 = 8 \text{ мм}^2$. При цьому питомий електричний опір кабелів із алюмінієвими жилами при температурі провідника $65 \text{ }^\circ\text{C}$ становить:

$$r_{\text{удз}} = \frac{9,61 \text{ мОм}}{\text{м}}; \quad x_{\text{удз}} = \frac{0,092 \text{ мОм}}{\text{м}};$$

$$r_{yД2} = \frac{1,1 \text{ МОм}}{\text{м}}; \quad x_{yД2} = 0,061 \text{ МОм/м}.$$

Активне та індуктивне електричне опір кабелів:

$$r_{к3} = r_{yД3} \cdot l_3 = 9,61 \cdot 20 = 192,2 \text{ МОм/м};$$

$$x_{к3} = x_{yД3} \cdot l_3 = 0,092 \cdot 20 = 1,84 \text{ МОм/м};$$

$$r_{к2} = r_{yД3} \cdot l_2 = 1,1 \cdot 100 = 110 \text{ МОм/м};$$

$$x_{к2} = x_{yД3} \cdot l_2 = 0,061 \cdot 100 = 6,1 \text{ МОм/м}.$$

Активний та індуктивний опір трансформатора з напругами 6(10)/0,4 кВ, потужністю 630 кВ·А та напругою КЗ – 5,5% при з'єднанні обмоток трикутник-зірка з нейтраллю [64]:

$$r_T = 2 \text{ МОм}; \quad X_T = 8,6 \text{ МОм}.$$

Якщо перехідний опір контактів $R_{ПК}$ дорівнює 15 МОм (з попередніх міркувань) можна знайти сумарні активні та індуктивні опори від трансформатора $T1$ до місця $K3$ (точці 1):

$$r_{K3} = r_T + r_{к3} + r_{к2} + r_{ПК} = 2 + 192,2 + 110 + 15 = 319,2 \text{ МОм/м};$$

$$x_{K3} = x_C + x_T + r_{к3} + x_{к2} = 0,1 \cdot 8,6 + 8,6 + 1,84 + 6,1 = 17,4 \text{ МОм/м}.$$

Модуль повного опору до місця короткого замикання складатиме:

$$Z_{K3} = \sqrt{x_{K3}^2 + r_{K3}^2} = \sqrt{17,4^2 + 319,2^2} = 319,7 \text{ МОм}.$$

Струм трифазного короткого замикання в точці 1 дорівнює:

$$I_{K31}^{(3)} = \frac{U_{ном.л}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 319,7 \cdot 10^{-3}} = 686 \text{ А}.$$

Струм двофазного короткого замикання в колах з ізольованою нейтраллю дорівнює:

$$I_{K31}^{(2)} = \frac{U_{ном.л}}{\sqrt{2} \cdot Z_{K3}} = \frac{380}{\sqrt{2} \cdot 319,7 \cdot 10^{-3}} = 594 \text{ А.}$$

Ударний струм короткого замикання дорівнюватиме:

$$I_{уд1} = k_{y\partial} \sqrt{2} \cdot I_{K31}^{(3)} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 686 = 970 \text{ А,}$$

де $k_{y\partial} = 1$ при значенні $x_{K3} / x_{K3} = 0,05$.

Аналогічно визначаємо струм трифазного короткого замикання у точці 2 (див. рис. 9.2):

$$\begin{aligned} r_{K3} &= r_T + r_{k2} + r_{ПК} = 2 + 110 + 15 = 127 \text{ мОм/м;} \\ x_{K3} &= x_C + x_T + r_{k2} = 0,1 \cdot 8,6 + 8,6 + 6,1 = 15,56 \text{ мОм/м;} \\ Z_{K3} &= \sqrt{x_{K3}^2 + r_{K3}^2} = \sqrt{15,56^2 + 127^2} = 128 \text{ мОм;} \\ I_{K32}^{(3)} &= \frac{U_{ном.л}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 128 \cdot 10^{-3}} = 1714 \text{ А;} \\ I_{уд2} &= k_{y\partial} \sqrt{2} \cdot I_{K32}^{(3)} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 1714 = 2424 \text{ А.} \end{aligned}$$

Якщо відомі потужність трансформатора і співвідношення X_C / X_T , можна визначити струм трифазного короткого замикання на затискачах КТП у точці 3. Для цього використовуємо відомі залежності [45] та отримуємо:

$$I_{K33}^{(3)} = 12000 \text{ А.}$$

При цьому звісно було враховано $r_{ПК}$.

2) Вибір автоматичного вимикача Q4 (див. рис. 9.2).

Автоматичний вимикач, який є найближчим до об'єкта, що захищається (асинхронному двигуну $M2$) вибирається за такими параметрами:

а) за номінальним струмом розчіплювача

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{ном.дв}} = 15,1 \text{ А};$$

б) за умови неспрацьовування відсічення під час пуску двигуна. Номінальна відсікання розчіплювача вимикача $Q4$

$$I_{\text{ном.відс 4}} \geq I_{\text{відс}} = (1,1 \dots 1,2) I_{\text{уд.п}} ;$$
$$I_{\text{відс}} = 1,1 \cdot 180,5 = 198,6 \text{ А.}$$

Вибирається автоматичний вимикач, номінальне значення відсікання якого перевищує 198,6 А, або кратність уставки струму відсічення до номінального струму розчіплювача перевищує $198,6 / I_{\text{ном.р}}$. Таким вимогам задовольняє вимикач ВА14-26-34 (таблиця 10.4) з номінальним струмом розчіплювача, що дорівнює 20 А, та номінальним значенням відсічення на 200 А (кратність значення уставки струму відсічення до номінального його значення дорівнює 10);

в) за граничною комутаційною здатністю вимикача, значення якого має бути не менше струму короткого замикання в точці I , тобто $I_{K31}^{(3)} = 686 \text{ А}$. Вибраний вимикач має граничну комутаційну здатність, що дорівнює 4,5 кА;

г) за умови нормального пуску (самозапуску) асинхронного двигуна

$$I_{K3}^{(3)} / I_{\text{п}} \geq 2 \text{ – при легкому пуску двигуна } (t_{\text{п}} \leq 5 \text{ с});$$

$$I_{K3}^{(3)} / I_{\text{п}} \geq 3,5 \text{ – при важкому пуску двигуна } (t_{\text{п}} > 5 \text{ с}).$$

В даному випадку $I_{K31}^{(3)} / I_{\text{п}} = 686 / 98,2 = 7$, а отже умова самозапуску двигуна виконується.

Вибраний таким чином автоматичний вимикач відноситься до класу струмонеобмежувальних вимикачів, триполюсного виконання, з електромагнітним розчіплювачем та ручним приводом, стаціонарного виконання. У таблиці 10.4 наведено технічні параметри вибраного апарату.

3) Вибір автоматичного вимикача Q3 (див. рис. 9.2).

Вибір автоматичного вимикача, що захищає розподільчий пристрій РП1, проводиться в наступній послідовності:

а) по номінальному струму розчіплювача

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{ном}},$$

де $I_{\text{ном}}$ – номінальний струм лінії l_2 , а саме $I_{\text{ном}} = 30,2 \text{ А}$.

Тому вибирається вимикач з найближчим до отриманого значення номінальним струмом розчіплювача $I_{\text{ном}} = 32 \text{ А}$.

Таблиця 10.4 – Основні технічні параметри вибраних вимикачів [45]

Автоматичний вимикач	Тип вимикача	Номінальний струм розчіплювача, А	Кратність уставки струму відсікання до номінального	Граничне значення комутаційної спроможності, кА
Q4	ВА14-26-34	20	10	4,5
Q3	ВА14-26-34	32	10	3
Q1	A3716Ф	160	3,9	15

б) по номінальному значенню відсікання розчіплювача автоматичного вимикача Q3

$$I_{\text{ном.відс 3}} \geq k_{\text{н.в}} I_{\text{ном.відс 4}},$$

де $k_{н.в}$ – коефіцієнт надійності узгодження, приймається рівним 1,3...1,5, або розраховується з урахуванням розбігання значень спрацьовування відсічення [45].

Розрахуємо струм номінального відсічення розчіплювача вимикача Q3 визначається

$$I_{\text{ном.відс 3}} = 1,3 \cdot 200 = 260 \text{ А.}$$

При цьому кратність уставки струму відсічення до номінального струму розчіплювача вибирається рівною 10;

в) перевіряється вимикач Q3 на здатність комутувати струм короткого замикання у точці 2

$$I_{K32}^{(3)} = 1714 \text{ А.}$$

Струм граничної комутаційної здатності обраного вимикача має значення 3 кА, що вище струму $I_{K32}^{(3)}$. Для виконання такої самої функції, яку виконує вимикач Q3, вибирається аналогічний Q4 тип апарату, технічні параметри якого наведені в таблиці 10.4.

4) Вибір автоматичного вимикача Q1 (див. рис. 9.2).

Вимикач, розміщений у комплектній трансформаторній підстанції, захищає силовий трансформатор та енергосистему і має відрізнятися високою надійністю роботи. Як правило, це мають бути селективні вимикачі. Вони вибираються за наступними умовами:

а) по номінальному струму розчіплювача

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\Sigma \text{ном}},$$

де $I_{\Sigma \text{ном}}$ – сумарний струм, що протікає в колі вимикача Q1, за умови одночасної роботи всіх двигунів.

В даному випадку $I_{\Sigma \text{ном}} \approx 136 \text{ А}$. Отже, вибирається вимикач А3716Ф з номінальним струмом розчіплювача $I_{\text{ном.р}} = 160 \text{ А}$;

б) по номінальному відсіканню розчіплювача автомата Q1:

$$I_{\text{ном.відс 1}} \geq k_{н.в} I_{\text{ном.відс 3}},$$

де $I_{\text{ном.відс 3}}$ – найбільший зі струмів спрацьовування відсічок розташованих нижче вимикачів, тобто приймається:

$$I_{\text{ном.відс 1}} \geq 1,3 \cdot 260 = 338 \text{ А}.$$

Кратність уставки струму відсічення до номінального струму розчіплювача вибираємо рівною 3,9;

в) за умови відключення струму трифазного короткого замикання в точці 3 – $I_{K33}^{(3)} = 12000 \text{ А}$. Струм граничної комутаційної здатності обраного вимикача досягає 15 кА. Якщо узгодження значення відсічення всіх вимикачів у колі не можна досягти, то вимикач для КТП вибирається селективним за часом. При цьому струм миттєвого спрацьовування третього ступеня захисту (вимикача Q1) $I_{с.мгн}$ повинен перевершувати $I_{K33}^{(3)}$ у точці 3 [45]. Технічні параметри вибраного вимикача наведено у таблиці 10.4.

10.5 Приклад вибору автоматичного вимикача для захисту кола від короткого замикання та перевантаження в асинхронному двигуні

Вибрати автоматичний вимикач з максимальним струмовим та тепловим розчіплювачами в колі живлення асинхронного двигуна 4 А. Параметри двигуна, електричного кола, а також результати їх попереднього розрахунку наведено у прикладах п.п. 10.2 та 10.4. Необхідно вибрати автоматичний вимикач з електромагнітним і тепловим розчіплювачами (або з комбінованим розчіплювачем), що відповідає основним технічним

параметрам і має найбільшу зносостійкість (число циклів комутації під навантаженням) з ваговим коефіцієнтом показника 0,8 та найменший об'єм з ваговим коефіцієнтом 0,2.

Послідовність вибору апаратів є наступною.

1) Вибираємо струмонеобмежувальний установчий вимикач з ручним приводом, стаціонарного виконання і переднім приєднанням проводів.

2) Номінальна напруга вимикача 380 В з трьома головними контактами.

3) Номінальний струм комбінованого розчіплювача вибирається з умови

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{ном.дв}} = 15,1 \text{ А.}$$

Вибираємо вимикач серії АЕ 2026 з електромагнітним та тепловим розчіплювачами зі струмом $I_{\text{ном.р}} = 16 \text{ А}$.

4) Кратність уставки струму відсічення відносно номінального струму розчіплювача повинна бути в межах

$$\frac{198,6}{I_{\text{ном.р}}} \approx 12 \leq \frac{I_{\text{ном.відс}}}{I_{\text{ном.р}}} \leq \frac{686}{I_{\text{ном.р}}} \approx 43.$$

Вибраний вимикач має відсічення, що дорівнює 12 та задовольняє заданим умовам.

5) Гранична комутаційна здатність вимикача повинна перевищувати струм короткого замикання на затискачі двигуна $I_{K3}^{(3)} = 686 \text{ А}$. Гранична комутаційна здатність вибраного вимикача досягає 2 кА, що більше значення струму короткого замикання.

6) Тепловий елемент комбінованого розчіплювача перевіряється за номінальною уставкою на струм спрацьовування теплового розчіплювача. Попередньо визначається струм спрацьовування теплового розчіплювача згідно з (10.6):

$$I_{\text{спр.т}} = (1,1 \cdot 16 + 1,45 \cdot 16) / 2 = 20,4 \text{ А.}$$

Після цього вибирається найближче нормоване значення $I_{\text{ном.т}}$. Визначаються межі його регулювання (вони мають межі 0,9...1,15). За захисною характеристикою автоматичного вимикача визначається час спрацювання $t_{\text{спр}}$ теплового розчіплювача при перевантаженні, також перевіряється умова узгодження навантажувальної характеристики асинхронного двигуна та захисної характеристики вимикача:

$$1,5t_{II} \geq t_{\text{спр}} > t_{II};$$
$$7,5 \geq 6 > 5.$$

В таблиці 10.5 наведено результати вибору вимикачів згідно з основними технічними параметрами.

1) Визначимо найкращий з урахуванням заданих техніко-економічних показників та їхньої «ваги», апарат, який використовує результати вибору за основними технічними параметрами.

В таблиці 10.5 вимикачі розміщені за рейтингом погіршення їх техніко-економічних показників. Найбільшу перевагу варто віднести до автоматичного вимикача серії АЕ 2026, що задовольняє всім заданим техніко-економічним умовам, і має найбільшу кількість циклів комутації під навантаженням при найменшому обсязі вимикача.

10.6 Контрольні запитання

- 10.6.1 Що таке аварійний режим електрообладнання?
- 10.6.2 Що таке аварійний режим енергосистеми?
- 10.6.3 Які режими роботи підстанції?
- 10.6.4 Які причини пожеж та загорянь від електроустановок?
- 10.6.5 Які бувають режими електричних мереж?
- 10.6.6 Які бувають види коротких замикань?
- 10.6.7 Які основні причини виникнення коротких замикань?
- 10.6.8 Які режими роботи електрообладнання електричних станцій та підстанцій?

10.6.9 Як параметри з'єднувального кабелю та захисної апаратури впливають на умови прямого пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором?

Таблиця 10.5 – Результати вибору вимикача відповідно до технічних параметрів [45]

Тип вимикача	Номинальний струм розчіплювача, А	Кратність уставки струму відсічки відносно номінального	Гранична комутаційна здатність, кА	Номинальний струм вимикача, А
AE2026	16	12	2	16
AE2046M	16	12	4,5	63
AE2046	16	12	3	63
AE2053M	16	12	3,5	100
AE2056M	16	12	3,5	100
AE2063	16	12	3,5	160
AE2066	16	12	3,5	160

11 АПАРАТИ РУЧНОГО КЕРУВАННЯ

До апаратів ручного керування відносяться рубильники, різноманітні вимикачі, перемикачі, кнопкові станції та інші пристрої.

Рубильник – це комутаційний апарат з контактами типу, що рубає (клинові контакти) і ручним приводом на два положення («включено», «відключено»).

Рубильники випускають одно-, дво- та триполюсні. Вони мають один, два, три нерухомі контакти і певну кількість рухомих контактів (ножів), скріплених траверсою з ізолюючого матеріалу і встановлених на шарнірах. На траверсі є ручка для включення. Контактна система рубильників може бути виконана з розривними (дугогасними) контактами або без них. Триполюсні рубильники (рис. 11.1, *а*) можуть бути з центральною або бічною рукояткою, з боковим або центральним приводом важеля.



а

б

Рисунок 11.1 – Триполюсний рубильник (*а*) та реверсивний рубильник виробництва АВВ (*б*) [72, 76, 77, 82]

Струмopрoвідні частини рубильника монтуєть на підставі, виготовленій з ізоляційного матеріалу: мармуру, шиферу, пластмаси, азбоцементу або іншого ізоляційного матеріалу. Для захисту обслуговуючого персоналу від можливого дотику до струмопpовідних частин та від дії електричної дуги рубильники закривають захисними кожухами або розміщають у закриті ящики. Рубильники застосовують у сухих приміщеннях. На відкритому повітрі, а також у сирих та запорошених приміщеннях рекомендується використовувати розподільчі ящики, що

випускаються в металевих корпусах бризко- та пилозахищеного виконання з вбудованим у них триполюсним рубильником та трьома запобіжниками. Щоб при увімкненому рубильнику ящик не можна було відкрити, на його кришці змонтовано блокувальний пристрій.

Рубильники-роз'єднувачі (Р) та перемикачі-роз'єднувачі (П) з центральною рукояткою випускаються без дугогасних пристроїв. Вони призначені для відключення ненавантажених електричних кіл та створення видимого розриву, наприклад при ремонтах та оглядах електроприводів з автоматичним керуванням. Рубильники з бічним приводом важеля (РПБ) і з центральним важелевим приводом (РПЦ), а також відповідні перемикачі (ППБ і ППЦ) виготовляються з дугогасними камерами і можуть комутувати струми в межах 50...100% номінальної напруги (залежно від роду та значення). Вибір рубильників і перемикачів проводиться за номінальним струмом, напругою та конструктивним виконанням.

Реверсивний рубильник або перемикач у побутових електромережах зазвичай служить для підключення резервного живлення (рис. 11.1, б). Це можуть бути бензинові та дизельні генератори, а також, наприклад, підключення другого джерела електрики від іншої ЛЕП для надійності електропостачання приватного будинку. Перемикання здійснюється автоматично в ручному режимі (не треба плутати з автоматичним включенням резерву – АВР).

Встановлювати в електрощити саме реверсивний рубильник, а не просто автомат для генератора, задля того, щоб не видавати в загальну мережу напругу, тобто щоб генератор не став джерелом електрики для всієї загальної ЛЕП. В цей час люди, що працюють на лінії можуть потрапити під напругу. Перекидний вимикач навантаження унеможливорює зустрічне включення двох джерел живлення основної електромережі від ЛЕП і резервного від генератора. Реверсивний перемикач виключає можливість видачі напруги у загальну мережу.

Реверсивний рубильник має три положення (рис. 11.2):

– I ON – увімкнено лівий полюс рубильника, при цьому правий вимкнено.

– O OFF – відключено все (обидва вводи).

– II ON – увімкнений правий полюс рубильника, при цьому лівий вимкнений. реверсивний рубильник.



Рисунок 11.2 – Положення перемикачів реверсивних рубильників [77]

Схема підключення резервного генератора до перекидного рубильника має кілька варіантів залежно на скільки фаз розрахований генератор. Також має значення скільки фаз в електрощиті будинку для підключення на резервний ввід.

Схема підключення резервного генератора до перекидного рубильника має кілька варіантів залежно на скільки фаз розрахований генератор. Також має значення скільки фаз в електрощиті будинку ви хочете підключити на резервне введення.

Нерідко у побуті застосовують однофазні генератори, тому що вони дешевші. Однофазний генератор також можна підключити в електрощиті при трифазному ввіді. При цьому одну фазу від генератора можна роздати на три фази в будинку і все буде працювати. Така схема підключення однофазного генератора дозволяє не перейматися про те, де і яке освітлення можна включати, які розетки працюватимуть. Через те, що зараз світло практично на енергозберігаючих лампах, а до розеток підключаються телевізори, зарядки для телефонів, планшетів, які теж споживають дуже мало електроенергії, то можна включати по черзі чайник, мікрохвильову піч для підігріву води та їжі. При

цьому, звісно, треба розуміти, що при включеному генераторі не потрібно включати електроплиту, духовку, гладити, прати, тобто вмикати потужні прилади.

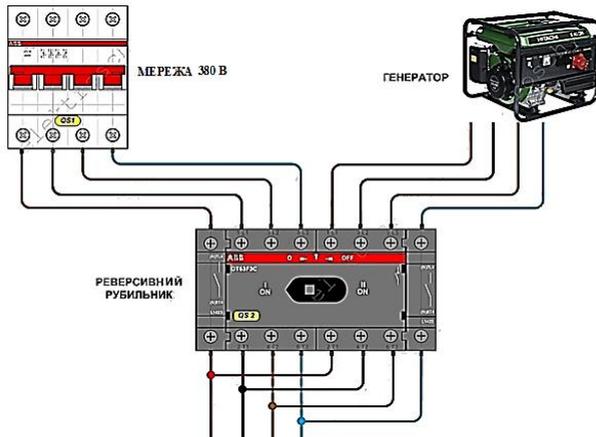


Рисунок 11.3 – Реверсивний рубильник із трифазним генератором

Вимикачі-роз'єднувачі (ВР) із запобіжниками – ця комбінація використовується як комутаційний апарат і пристрій захисту.

Рубильники ВР (ВР32-31, ВР32-35, ВР32-37, ВР32-39) – апарати, що виконують функції вмикання, відмикання, пропускання змінного струму з напругою до 660 В та при номінальній частоті 50...60 Гц, а також постійного струму з напругою до 440 В (всередині пристроїв розподілу електроенергії) (рис. 11.4, а). Принципи класифікації вимикачів-роз'єднувачів ВР:

- ступінь захисту ручки (IP00, IP32);
- наявність/відсутність допоміжних контактів;
- вид рукоятки ручного приводу (без рукоятки, збоку, спереду зміщена, збоку зміщена);
- розташування площини приєднання зовнішніх затискачів контактних висновків:

- а) паралельно площині монтажу – 1;
- б) перпендикулярно – 2;

в) комбінування (введення паралельне, виведення перпендикулярне) – 3;

г) комбіноване (введення перпендикулярне, виведення паралельне) – 4).

– кількість полюсів та напрямків:

а) однополюсний ВР на один напрямок;

б) двополюсний ВР на один напрямок;

в) триполюсний ВР на один напрямок;

г) однополюсний ВР на два напрями;

д) двополюсний ВР на два напрямки;

е) триполюсний ВР на два напрямки

Дані комбінації також представлені серією OS на струми від 32 А до 1250 А виробництва АВВ (рис. 11.4, б) в апаратах застосовуються запобіжники для захисту від короткого замикання та перевантаження. Вони задовольняють усім вимогам безпеки, характеризуються простотою монтажу та функціональністю та компактними розмірами.



а



б

Рисунок 11.4 – Вимикачі-роз'єднувачі [63]

Пакетні вимикачі (рис. 11.5), що призначені для нечастого вмикання та вимкнення електродвигунів, освітлювальних приладів та інших споживачів, встановлюють у сухих, непильних та вибухобезпечних приміщеннях.

Пакетні вимикачі компактні; при напрузі 220 В і активному навантаженні струми, що відключаються, можуть бути 6...100 А, а при 380 В – 6...60 А. Вимикачі мають спеціальну пружину, що дозволяє швидко замикати і розмикати коло. При повороті їх

рукоятки натягується пружина, під дією якої контакти замикаються або розмикаються з великою швидкістю.

Пакетні вимикачі мають іскрогасну фіброву шайбу. Під дією електричної дуги, що виникає при розриві контакту, фібра виділяє газ (вуглекислий, водень та водяна пара), які сприяють швидкому гасінню дуги. У сирих приміщеннях та на відкритому повітрі встановлюють герметичні пакетні вимикачі.

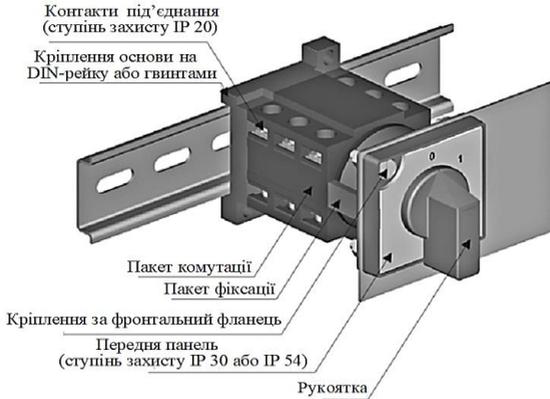


Рисунок 11.5 – Конструкція пакетного вимикача [77]

Крім пакетних вимикачів, широко застосовують *пакетні перемикачі*. У таких перемикачах тільки одне положення відповідає відключеному стану приймача, а решта два або три положення – включеному.

Кнопкові вимикачі та кнопкові станції застосовуються для включення в роботу трифазних та однофазних електродвигунів та інших споживачів енергії. У таких пристроях при натисканні на кнопку «Пуск» замикаються всі контакти і після припинення натискання залишаються замкнутими або розмикаються. При натисканні на кнопку «Стоп» контакти вимикачів розмикаються.

Для дистанційного керування різноманітними електричними приладами та машинами застосовують кнопки керування та кнопкові пости.



Рисунок 11.6 – Пакетні вимикачі та перемикачі [77]

Найчастіше за допомогою цих засобів керують тим обладнанням, де використовуються електродвигуни як приводи. Так, оператору не потрібно забиратися на кран-балку, щоб підвести гачок у потрібне місце на території цеху, натомість йому достатньо натиснути відповідну кнопку на пульті управління, і кран сам під'їде, куди вкажіть оператор. Аналогічним чином здійснюється керування живленням та режимами роботи верстатів, вентиляторів, насосів тощо.

Кнопки та кнопкові пости можуть розташовуватись на робочому місці оператора, формуючи спеціалізований пульт для вирішення конкретних завдань, пов'язаних з керуванням обладнанням на даному підприємстві.

Кнопка – це електричний командний апарат, що складається з кнопкового (контактного) та приводного елементів та призначений в основному для ручного дистанційного керування електромагнітними апаратами. Кнопки застосовуються в колах змінного струму з напругою не більше 660 В і постійного струму – не більше 440 В бувають двох типів: моноблочні, у яких контактний елемент та привід змонтовані в єдиному блоці, та двоблочні, у яких привід (штовхач, рукоятка, замок з ключем) встановлюється на окремій плиті, а кнопковий елемент монтується на основі під приводним елементом. Кнопки можуть мати від 2 до

8 контактів, причому кількість нормально відкритих контактів зазвичай дорівнює кількості нормально закритих.

Особливістю роботи є те, що після того, як натискання на приводний елемент припиняється, він разом з контактами під дією зворотних пружин повертається у початкове положення. Існують кнопки без самоповернення – з механічною або електромагнітною керованою клямкою. У сучасних конструкціях кнопок використовуються рухомі контакти місткового типу з подвійним розривом ланцюга. Матеріалом контактів є срібло або металокерамічні композиції. Струм тривалого режиму і змінний струм, що комутується, не перевищують 10 А. Зусилля натискання на привод кнопки – 0,5...2 кг. З метою безпеки роботи штовхачі кнопок, що виконують команду «Стоп», виступають на 3...5 мм над рівнем кришки пульта, де вони встановлені, а кнопки, що виконують команду «Пуск», утоплені на ту ж відстань. За ступенем захисту від впливу навколишнього середовища розрізняють кнопки відкритого, захищеного та пило-водозахищеного виконання. Декілька кнопок, вбудованих в одну оболонку або встановлених на одній кришці, утворюють пост кнопки (станцію).

Кнопкові пости призначені для включення та відключення електричних пристроїв, для зміни напрямку обертання приводів у пристроях, для екстреного ручного відключення обладнання в аварійних ситуаціях і т. ін. – залежно від призначення того чи іншого електротехнічного обладнання. В цілому можна відзначити, що для різних завдань кнопкові пости виконуються в різних корпусах і з різною кількістю кнопок, проте одна особливість принципово важлива – кнопкові пости не використовуються у високовольтних колах, вони, звичайно, можуть керувати високовольтним обладнанням, але самі працюють у колах напругою до 600 В змінного або до 400 В постійного.

Найчастіше і струм через пост кнопки – це не робочий струм установки. Комутацію силових кіл здійснює пускач, а ось пускачем керує пост кнопки. Наприклад підключенням до мережі асинхронного двигуна безпосередньо або реверс керує магнітний пускач, а пускачем управляє оператор за допомогою

трикнопового посту: «Пуск вперед», «Пуск назад», «Стоп». Після натискання на кнопку «Пуск» нормально розімкнені контакти пускача замикаються за схемою прямого пуску двигуна, а при натисканні на кнопку «Пуск назад» – контакти змінюють конфігурацію на реверс. «Стоп» – пускач розмикає ланцюг живлення. Головний елемент посту кнопки – кнопка-штовхач. Кнопки-штовхачі бувають двох типів: самоповоротні та з фіксацією. Самоповоротні виштовхуються у вихідний стан пружиною – натиснув оператор на кнопку «Стоп» – кнопка «Пуск» повернулася у вихідний стан, а ті, що з фіксацією - тільки після повторного натискання - поки знову не натиснеш - контакти не розімкнуться. Прикладом кнопового посту з фіксацією може бути популярний двокноповий пост: натиснута кнопка «Стоп» – контакти розімкнуті, кнопка «Пуск» у вільному стані. Натиснута кнопка «Пуск» – контакти замкнуті, а кнопка "Стоп" у вільному стані. Такі пости служать у величезній кількості застосувань, і часто управляють магнітними пускачами, а не подають струм безпосередньо. Залежно від умов експлуатації та ступеня електробезпеки, матеріал корпусу посту кнопки може бути пластиком або металом, а іноді кнопки просто встановлюються без корпусу зовні на прилад. Що стосується безпосередньо кнопок, то вони відрізняються формою та кольором. За формою поділяються на: утоплювальні, грибоподібні та циліндричні, а за кольором: для кнопок «Стоп» характерні червоний або жовтий кольори, а для кнопок «Пуск» – синій, білий, зелений та чорний.



Рисунок 11.7 – Кнопові пости ПKE та ПКУ [64, 95]

Асортимент кнопочних постів, представлених сьогодні на ринку, дуже широкий, але в принципі всі вони працюють за одним і тим самим принципом. Пости серії «ПКЕ» (єдиний) відрізняються особливою популярністю. Їх можна зустріти на деревообробних верстатах, на простих фрезерних верстатах і т. ін. Ці кнопки здатні безпосередньо комутувати струми до 10 А при змінній напрузі 660 В. Позначаються кнопочні посади серії ПКЕ цифрами, які можна розшифрувати.

Перша цифра позначає ряд у серії, друга – спосіб монтажу (накладний/вбудований), третя – ступінь захисту, четверта – матеріал корпусу (пластик/метал), п'ята – число керованих контактів, шоста – ступінь модернізації, сьома – кліматичне виконання відповідно до категорії розміщення.

Пости серії «ПКУ» – спеціальні пости для експлуатації у вибухобезпечному середовищі, з невеликою концентрацією газу та пилю. Дані пости в принципі аналогічні серії «ПКЕ», хоча й мають власну систему позначення: перша цифра – ряд у серії, друга – номер модифікації, третя – номінальний струм для кнопки, четверта – кількість кнопок у горизонтальних рядах, п'ята – кількість кнопок у вертикальних рядах, шоста – спосіб установки (накладний/внутрішній/на підвісі), сьома – ступінь електричного захисту, восьма – кліматичне виконання відповідно до категорії розміщення.



Рисунок 11.8 – Кнопки та перемикачі Schneider Electric [93]

Рубильники-роз'єднувачі (Р) та перемикачі-роз'єднувачі (П) з центральною рукояткою випускаються без дугогасних пристроїв. Вони призначені для відключення ненавантажених електричних кіл та створення видимого розриву, наприклад при ремонтах та оглядах електроприводів з автоматичним керуванням. Рубильники з бічним приводом важеля (РПБ) і з центральним важелевим приводом (РПЦ), а також відповідні перемикачі (ППБ і ППЦ) виготовляються з дугогасними камерами і можуть комутувати струми в межах 50...100% номінального (залежно від роду). Вибір рубильників і перемикачів проводиться за номінальним струмом, напругою та конструктивним виконанням.

Командоапарати – це апарати, на які впливає оператор або робоча машина і призначені для здійснення перемикання в ланцюгах керування електромагнітними контакторами та реле, регуляторами, підсилювачами, перетворювачами тощо.

Командоконтролери – це апарати, призначені для дистанційних перемикань у кількох колах порівняно малої потужності (максимальний комутований змінний струм – 10 А, постійний при напрузі 220 В та індуктивному навантаженні – 1,5 А). Застосовують два види командоконтролерів: контактні та безконтактні. Контактний командоконтролер є багатопозиційним апаратом із заданою програмою замикання і розмикання контактів при повороті приводного валу вручну або через механічний привід.

Контролер – це багатоступінчастий комутаційний апарат для безпосередніх перемикань в головних ланцюгах і ланцюгах збудження двигунів напругою до 500 В, а також для зміни опорів резисторів, включених в ці ланцюги. Кулачкові контролери набули широкого поширення в кранових електроприводах змінного струму потужністю до 30 кВт та постійного струму потужністю до 20 кВт. У контролері змінного струму природна комутація, без дугогасних пристроїв. Комутаційні елементи контролера постійного струму аналогічні конструкції, але кожен з них має дугогасний пристрій з магнітним дуттям.

Контролери серії ККТ використовуються для керування процесом роботи електродвигуна, тобто включення електродвигуна, регулювання його швидкості, а також зупинки та

реверсування. Як контролери, які застосовують на баштових і мостових кранах, служать кулачкові контролери серії ККТ-62. Силкові кулачкові контролери серії ККТ належать до категорії апаратів ручного безпосереднього керування. Власне, конструкції контролерів серії ККТ однотипні.

У їхньому корпусі розміщений кулачковий барабан, що представляє собою вал на 2-х кулькових підшипниках з набором з 6-ти пластмасових кулачкових шайб, що мають певний профіль, який відповідає заявленій діаграмі замикань/розмикань контактів. З 2-х сторін барабана розміщуються контактні елементи по 6 штук з кожної сторони. Контролери кулачкові серії ККТ 62 містять два ряди, тобто кожна кулачкова шайба барабана керує одночасно двома контактними елементами.

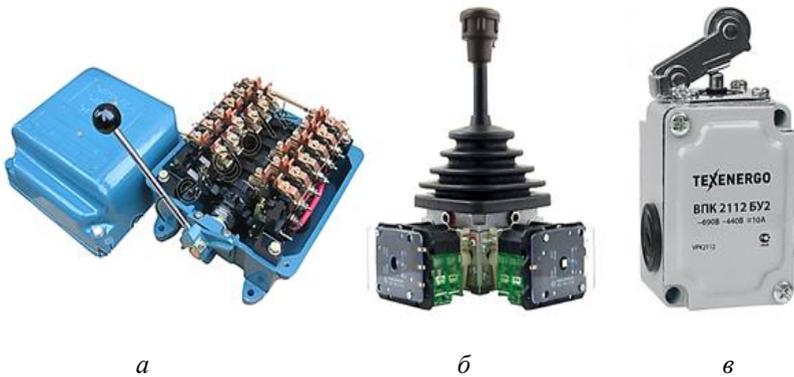


Рисунок 11.9 – Контролери серії ККТ (а), промислові командоконтролери (джойстики) Sprohn+Burkhardt (б) та дорожній вимикач (в) [87, 95, 96]

Коли ролик важеля контактуючого елемента розміщується у впадині кулачкової шайби, контакт є замкнутим під зусиллям пружини. Якщо вал повертається в таке положення, щоб ролик знаходився на гребні кулачка, важіль повернеться і розімкнуться контакти. Використовуючи шайби з різним профілем, в результаті одержують потрібну послідовність розмикання та замикання контактів. Контролери ККТ 62 також оснащені фіксуєчим механізмом, завдяки якому зупинка валу барабана здійснюється в

положенні, яке відповідає повному розмиканню або повному замиканню контактів.

Промислові командоконтролери (джойстики) Spohn+Burkhardt – універсальне обладнання, що використовуються в буровій промисловості, а також у крановому устаткуванні, сільському господарстві та транспортній техніці. Вони мають міцну конструкцію, забезпечують безпечну та надійну роботу, допомагають вирішувати завдання, де потрібна висока точність, виробляються з високим ступенем IP-захисту. Одні мають кілька перемикаючих контактів, інші – оснащені потенціометрами, енкодерами або системою датчика Холла 3D. Для більшості джойстиків пропонується великий вибір форм рукояток та функцій.

Дорожні вимикачі – це командоапарати, кінематично пов'язані з робочою машиною і спрацьовують у певних точках шляху її частин, що рухаються. Вимикачі служать для автоматичного замикання та розмикання кола у функції шляху та для аварійного обмеження ходу рухомих частин (кінцеві вимикачі).

Основні різновиди їх такі: натискні (кнопкові), важільні та обертові. Перші два види застосовують переважно як кінцеві вимикачі. У натискному вимикачі привод у вигляді штовхача із напівкруглою головкою перемикає рухомий контакт із контактами. У важільному вимикачі контакти перемикаються через натискання на важіль з роликком. Дорожній вимикач, що обертається, виконаний подібно до кулачкового командоконтролера. Його вал безпосередньо чи через редуктор з'єднаний із валом механізму. Істотним недоліком контактних механічних вимикачів є можливість їх розрегулювання при частих перемиканнях і недостатня надійність, особливо при великих швидкостях руху механізму, а також значний шум і радіоперешкоди. У зв'язку з цим нині широко застосовуються апарати з безконтактними елементами, індуктивними та ємнісними датчиками.

Вибір контролера для певних потреб проводиться виходячи з типу та потужності керованого ним двигуна. Основним параметром контролера є номінальний струм головного ланцюга

при ПВ = 40% загальної тривалості циклу трохи більше 4 хвилин. Номінальною потужністю контролера вважається потужність керованого ним двигуна при номінальній напрузі та струмі. Гранична потужність кулачкового контролера залежить від режиму роботи механізму і визначається в основному зносостійкістю комутуючих контактних елементів (зменшується зі збільшенням числа включень за годину). Для розширення верхньої межі потужності керованих двигунів кулачкові контролери застосовують разом із контакторами, комутаційні властивості яких набагато вищі, ніж контактів контролера.

Штепсельні роз'єми застосовують для підключення до мережі переносних та пересувних трифазних та однофазних споживачів. Для підключення трифазних споживачів застосовують штепсельні роз'єми, що мають у розетці чотири гнізда, а у вилці – чотири штирьові контакти: три для з'єднання фаз, четвертий, більш довгий, заземлюючий. Розетку встановлюють на будь-якій підставі (плиті, стіні) та підключають до мережі. Виделку з'єднують із споживачем. При замиканні контактів вилки з контактами розетки передусім замикаються заземлюючі контакти, завдяки чому корпус споживача заземлюється раніше, ніж на нього буде подано напругу мережі.

12 ДАТЧИКИ КОНТРОЛЮ І РЕГУЛЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Датчик – це електричний апарат, який перетворює величину, що контролюється, одного виду у величину іншого виду, більш зручну для впливу на оперативний орган системи автоматичного регулювання (САР) [1, 5, 11, 15, 25, 30]. Датчик – це перший елемент вимірювального каналу, зазвичай, аналоговий пристрій, що видає інформацію про параметри системи та процеси, які в ній протікають. Переважно датчики перетворюють неелектричні величини в електричні, тобто замість фізичної змінної (швидкості, тиску, температури, тощо) видається еквівалентний електричний сигнал (I , U , тощо), які є функцією цих змінних. Тобто $y = f(x)$, де x – це є вхідна змінна фізичного процесу, що контролюється або регулюється, і функція y – це є вихідна змінна датчика (див. рис. 12.1 і 12.2).

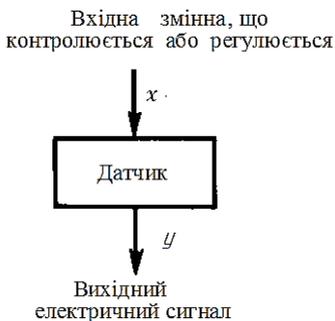


Рисунок 12.1 – Характеристики вхідних та вихідних сигналів датчиків [51, 97]

Розрізняють дві основні форми сигналів:

- безперервну, яка відбиває певний фізичний процес, інформація про який визначається певними інформативними параметрами: струму, частоти, фази та іншими (рис 12.2, *a*) [51, 97];
- дискретну (кодовану), при якій носіями інформації є кількість елементів кода, їх розподіл в часі, або в просторі (рис. 12.2, *б*).

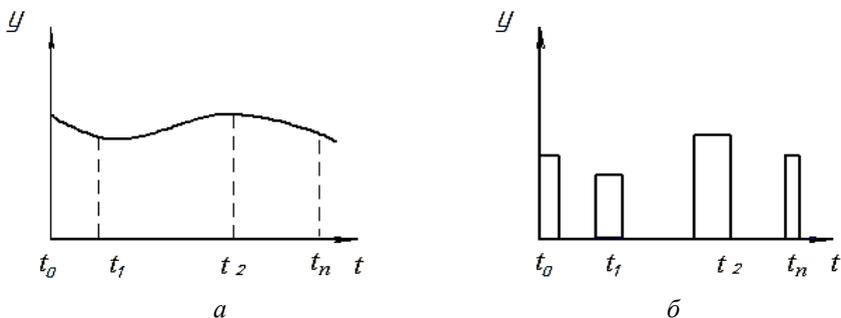


Рисунок 12.2 – Характеристики датчиків при безперервному (а) та дискретному (б) вихідних сигналах [51]

Датчики доповнюють і розширюють можливості відчуттів і почуттів людини. Між будь-якою технічною системою (автоматом, роботом) і біологічною системою (людина) існує аналогія (рис. 12.3). За умови відсутності датчиків контроль якості продукції, виробництво і вживання електроенергії, розпізнавання образів (форми, габаритних розмірів, хімічного складу, швидкості переміщення, тощо), а також створення маніпуляторів та роботів не можливе. В сучасному виробництві датчики застосовують як елемент моніторингу технологічних процесів, що дозволяє підвищувати якість, а також кількість кінцевої продукції за рахунок можливості одночасного регулювання та коректування процесу виробництва. У складі датчиків можуть бути чутливий елемент, що безпосередньо сприймає змінення сигналу, який контролюється, а також перетворювач та підсилювач для узгодження вихідних і вхідних сигналів.

Для надійної роботи всієї системи в цілому до датчиків висуваються такі вимоги, як:

- висока надійність;
- довгий термін безвідмовної роботи;
- висока точність $\delta \% = (Y/Y_{ном}) \cdot 100\%$ (відносне відхилення вихідного сигналу Y до його номінального значення $Y_{ном}$, що надається у процентах);
- здатність реагувати на незначні відхилення значення сигналу, що вимірюється;



Рисунок 12.3 – Аналогія функціонального зв'язку між процесами отримання, обробки і перетворення сигналів в біологічних (людина) і технічних (автоматичних) системах [51]

- висока чутливість , яка не має залежати від значення та закону змінення контрольованої величини;
- стабільність і однозначність характеристик і незалежність від зовнішніх впливів (старіння елементів схем, нестабільність напруги живлення та опору на виході вимірювального органу, вплив оточуючого середовища, тощо);

– висока ефективність, тобто максимальний вихідний сигнал при мінімальній вхідній енергії і т.ін.

Класифікація датчиків проводиться за декількома ознаками та критеріями:

– за фізичними явищами, на базі яких відбувається робота датчиків (наприклад, закон електромагнітної індукції, ефект Хола, магнітострикція і т.ін.);

– наявності рухомих елементів (електромеханічні), або їх відсутності (статичні);

– за принципом дії;

– за конструкцією;

– за призначенням;

– за величиною, що контролюється (наприклад, тиск, вологість, прискорення, кут повороту тощо);

– за об'єктом регулювання (наприклад, температура печі, частота обертання двигуна, тощо);

– за видом передавальної функції (наприклад, безінерційні, інерційні, із запізненням, тощо).

Всі датчики розрізняються на пасивні або параметричні, та активні, або генераторні.

До параметричних належать датчики, в яких зміна контрольованої величини викликає відповідну зміну параметра в електричному ланцюзі. Вони не можуть самостійно утворювати на виході електричний сигнал, для їх роботи необхідне джерело живлення (наприклад, резистивні, індуктивні та ємнісні датчики).

До генераторних належать датчики, які самі є джерелами електричної енергії, тобто не потребують додаткового джерела живлення, а самі генерують електричний сигнал, зазвичай у виді ЕРС, причому енергія, що виникає на виході, пропорційна величині, яку контролюють. Прикладом можуть бути індукційні, термоелектричні, фотоелектричні, п'єзоелектричні датчики, сельсини, тощо. Основна (головна) характеристика датчика $y = f(x)$ може бути лінійною, або нелінійною. Частіше необхідна лінійна характеристика, тобто пропорційна зміна вихідної величини від вхідної. Чутливість датчика визначається за формулою:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (12.1)$$

Відносна чутливість – за такою формулою:

$$S_{ВД} = \frac{\Delta y \cdot x}{\Delta x \cdot y}, \quad (12.2)$$

де x і y – повні змінення вхідної та вихідної величин.

Якщо $S = \text{const}$, тоді датчик є «лінійним», якщо ж $S = \text{var}$, датчик є «нелінійним». Тривалість перехідного процесу визначається швидкодією.

Повна похибка $\Delta\Pi$ датчика визначається як:

$$\Delta\Pi = \pm(\Delta X_A + \gamma_S), \quad (12.3)$$

де ΔX_A – адитивна похибка, яка не залежить від вхідної величини, джерелом її служать зовнішні наведення, втрати в схемах, шуми схемних елементів і таке інше;

γ_S – мультиплікативна похибка, яка залежить від вхідної величини, джерелом її є нестабільність і невідповідність номінальним значенням коефіцієнтів передач окремих функціональних вузлів і т. і.

12.1 Контактні датчики

Контактні датчики по суті є датчиками параметричного типу, в яких електричний опір змінюється при зміні певної механічної величини. Коли величина, яка вимірюється, досягає певного значення, електричні контакти 1 і 2, що включені в ті або інші ланцюги, замикаються або розмикаються. Це є сигналом того, що відбувається переміщення більше, або менше певної нормованої величини (рис. 12.4). Статична характеристика має релейний характер тому, що його вихідна величина є опором електричного ланцюга і, відповідно, змінюється стрибком. Наприклад, у сортувальних апаратах ці датчики дозволяють розділяти вироби до

40 груп з продуктивністю у декілька сотень за хвилину. Для контролю розміру l деталей та відбраковки непридатних виробів $l + \Delta l$ (1...3) в схемах на рис.2.4 включена лампа. Якщо розмір відрізняється від нормативного, вона загоряється і дозволяє реагувати контролеру на виробництві.

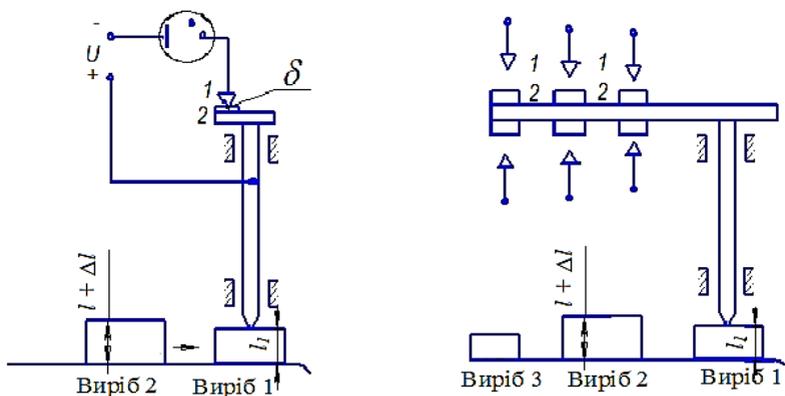


Рисунок 12.4 – Схема принципова дії контактних датчиків для контролю розмірів деталей:

a – одномежевий контактний датчик; *б* – багатомежевий контактний датчик [51].

Велике значення для роботи датчиків має вибір матеріалу контактів. Позитивні результати отримані з контактами, виготовленими зі сплавів паладію та ірідія, або вольфраму та ренію. При проектуванні датчиків орієнтуються на малу розривну потужність, аби менше підгорали контакти (1) і (2). Матеріали для контактів залежать від контактного тиску P_K , який у свою чергу залежить від чутливості. Якщо P_K знаходиться в межах до 0,2 Н, то контакти виготовляються із золота; якщо P_K знаходиться в межах до 1,0 Н – зі срібла; якщо P_K знаходиться в межах до 3,5 Н – зі сплаву з вольфраму та молібдену.

Контактні датчики мають переваги такі, як високу точність і чутливість, можливість застосування в змінних і постійних колах

та відносно невелику вартість, але ж і недоліки такі, як підігрівання контактів та великі погрішності при вібраціях і струсах.

12.2 Потенціометричні датчики

Потенціометричний датчик являє собою змінний резистор з лінійним або кутовим переміщенням повзунка, яке перетворюється на відповідну зміну опору, струму або напруги.

За способом виконання опору потенціометричні датчики поділяються на:

- ламельні з постійними опорами;
- дротяні з безперервним намотуванням;
- із резистивним шаром.

Ламельні потенціометричні датчики використовувалися для відносно грубих вимірів через певні конструктивні недоліки. У таких датчиках постійні резистори, підібрані за номіналом спеціальним чином, припаюються до ламелей. Ламель являє собою конструкцію з провідними і непровідними елементами, що чергуються, по якій ковзає струмознімальний контакт (див. рис. 12.5). При русі струмознімача від одного провідного елемента до іншого сумарний опір підключених до нього резисторів змінюється на величину, що відповідає номінального значення одного опоры. Зміна опорів може відбуватися у широких межах. Похибка вимірів визначається розмірами контактних площадок.

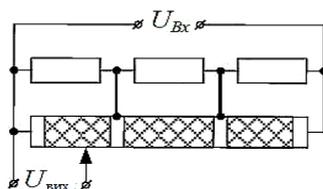


Рисунок 12.5 – Ламельний потенціометричний датчик

Широке застосування в автоматичних системах отримали дровоті потенціометричні датчики, які призначені для більш

точних вимірів. Як правило, їх конструкції є каркасом з гетинаксу, текстоліту або кераміки, на який в один шар, виток до витка намотаний тонкий дріт, по зачищеній поверхні якої ковзає струмознімальний контакт (повзунок) (рис. 12.6). Каркас виготовляється з ізоляційного матеріалу чи металу, покритого шаром ізоляції. За формою каркаси бувають плоскими, циліндричними та кільцевими. Обмотку виконують високоомним дротом з манганіну, константану, ніхрому та ін. Діаметр обмотувального дроту в залежності від необхідної точності становить 0,03 для датчиків низького класу. Обмотковий провід покривають емаллю або шаром окислів.

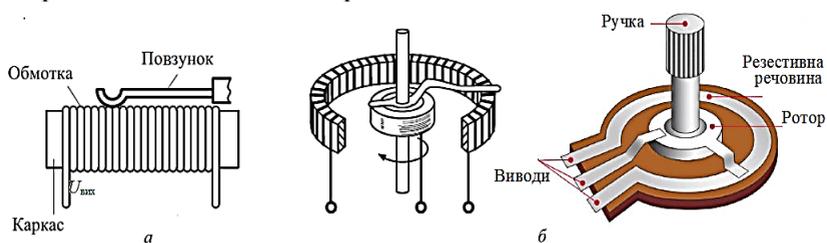


Рисунок 12.6 – Принцип дії потенціометричного датчика

Ці датчики належать до розповсюджених датчиків зсуву (переміщення), які можуть вимірювати як лінійне зсув (при поступальному переміщенні), так і кут повороту (при обертанні). Вони належать до датчиків параметричного типу і перетворюють механічні переміщення в змінювання активного опору електричного кола, а також мають назву резистивних датчиків зі змінним опором. Виготовляються потенціометричні датчики з матеріалів, які характеризуються такими питомими опором:

- константан (Cu + Ni) з опором $\rho = 0,49 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$;
- ніхром (Mn + Ni + Fe + Cr) $\rho = 1,08 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$;
- манганін (Sn + Ni + Mn) $\rho = 0,42 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$;
- сплав платини та іридія (Pt + Ir) $\rho = 0,23 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$;
- вольфрам (W) $\rho = 0,056 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

Провід намотується на плоский, циліндровий кільцевий каркас із діелектрика (текстоліт, електричний ебоніт, гетинакс та ін.), а для особливо точних датчиків – на металевий каркас,

напилений ізоляційними окислами (наприклад, Al_2O_3), які добре відводять тепло. Повзунки зазвичай виготовляють зі сплавів паладія з ірідієм, сріблом, або кобальта ($Pd + Ir$, $Pd + Ag$, $Pd + Ag + Co$) та інші. Задля забезпечення контакту у момент переміщення з витка на виток, повзунок має торкатися одночасно попереднього витка і наступного (рис. 12.6).

З різноманітних існуючих схем комутації найбільшого поширення набула проста схема (рис. 12.7).

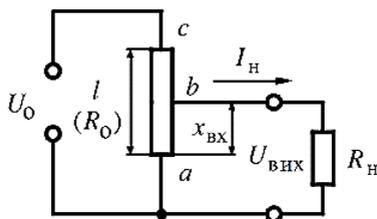


Рисунок 12.7 – Схема електрична однопотенціометричного датчика переміщення

Якщо переріз каркаса, на який намотаний дріт, однаковий по всій довжині, то опір датчика змінюється пропорційно куту повороту α , або переміщення x . Якщо вхідний опір у схемі, параметри якої вимірюються, має велике значення, то вихідна напруга $U_{вих}$ залежатиме лише від куту повороту α , або лінійного переміщення x , і не залежатиме від опору R_0 .

$$U_{вих} = \frac{U_0}{\alpha_{\max}} \cdot \alpha \qquad U_{вих} = \frac{U_0}{x_{\max}} \cdot x \qquad (12.4)$$

де α_{\max} – максимальний кут повороту;

x_{\max} – максимальне переміщення повзунка.

Чутливість датчика з лінійним переміщенням рухомого контакту визначається як

$$S_D = \frac{dU_{вих}}{dx} = \frac{U_0}{x_{\max}} \qquad (12.5)$$

Для підвищення чутливості датчиків зазвичай збільшують напругу живлення U_0 , проте, при цьому підвищується потужність, що розсіюється датчиком. Максимальна чутливість S_{\max} дорівнює:

$$S_{\max} = \frac{\sqrt{P_{\max} \cdot R_0}}{x_{\max}}, \quad (12.6)$$

де P_{\max} – найбільша допустима потужність потенціометричного датчика з R_0 .

Похибка датчика залежить від стабільності напруги живлення U_0 , точності виготовлення конструктивних деталей, температурної стабільності і матеріалу. Важливим показником якості потенціометра є плавність зміни вихідної напруги. Ця характеристика визначає, на який найменший кута повороту, або величину переміщення повзуна датчик здатний реагувати. Як видно з графіка (рис. 12.8) напруга дрових датчиків змінюється не безперервно, а сходами (нелінійно). Фізично це можна пояснити тим, що елемент повзунка, який знімає струм, не контактує з поверхнею дроту по всій довжині, а лише «перескоком» ($a - b - e - z$). Тоді відхилення вихідної напруги від розрахункової через перестрибування по сходинках дорівнюватиме $\Delta U_{CX} < U_0 / 2n$ (тут n – є загальним числом витків, та U_0 – є напругою живлення).

Для оцінювання чисельного значення похибки, обумовленої перестрибуванням сходинками, було впроваджено розуміння електричної здатності розрізювання потенціометром δ_p , (%). Це є величина приросту опору або напруги при переміщенні повзунка потенціометра на один виток. Вона визначає максимально можливу точність (безпомилковість) роботи потенціометричного датчика.

Для покращення здатності розрізювання потенціометра збільшують число витків n . Цього можна досягти або шляхом подовження обмотки, або зменшення перетину безпосередньо дроту. Проте, перший варіант приводить до збільшення розмірів потенціометра, а другий – до зменшення механічної міцності

провідника, а також технологічним труднощам виготовлення потенціометра тощо.

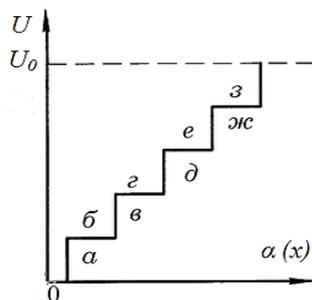


Рисунок 12.8 – Характеристика провідникових датчиків при зміні довжини переміщення або кута повороту

Однообертові потенціометри мають значення $\delta_p = (0,02 \dots 0,4)\%$. Для зміни δ_p можна застосовувати складні багатообертові потенціометри. Незмінну здатність розрізнювання мають лише лінійні потенціометри. Проте, крім переваг (можливість отримання лінійної характеристики, проста конструкція і невелика вартість) вони мають і певні недоліки (відносно великі зусилля на переміщення, підгоряння контактів, механічне зношення і хімічна корозія). Наслідком цього може бути зміна передаточної характеристики впродовж всього терміну експлуатації. Резистивні датчики можуть бути каркасними та безкаркасними (рідинними або електролітичними) (рис. 12.10). Основою каркасних датчиків [25] (рис. 12.9, а – г) є високоомний дріт, який виконує функцію опору. На перших двох схемах (рис. 12.9, а, б) показані двотактні датчики з одним повзунком, на двох наступних (рис. 2.9, в, г) – датчики з двома повзунками, які зазвичай механічно пов'язані таким чином, що переміщуються від середини потенціометра у протилежні сторони.

При $x_{вх}$ повзунки всіх датчиків, наведених на рисунку, знаходяться на лінії нейтралі, що проходить через середину потенціометрів і ділить опір обмотки навпіл. При цьому вихідна напруга ($U_{вих}$ датчика дорівнює нулю. Переміщення $x_{вх}$ повзунка відраховується від нейтралі, при цьому умовно приймається

позитивним переміщення в одну сторону (наприклад, вгору), негативним – в іншу сторону (вниз). При зміні знака $x_{\text{ВХ}}$, тобто при проходженні повзунка через нейтраль, змінюється також полярність вихідної напруги $U_{\text{ВНХ}}$. Якщо ж потенціометр живиться змінною напругою, то зазначеному переходу повзунка через нейтраль відповідає зміна фази вихідної напруги $U_{\text{ВНХ}}$ на 180° .

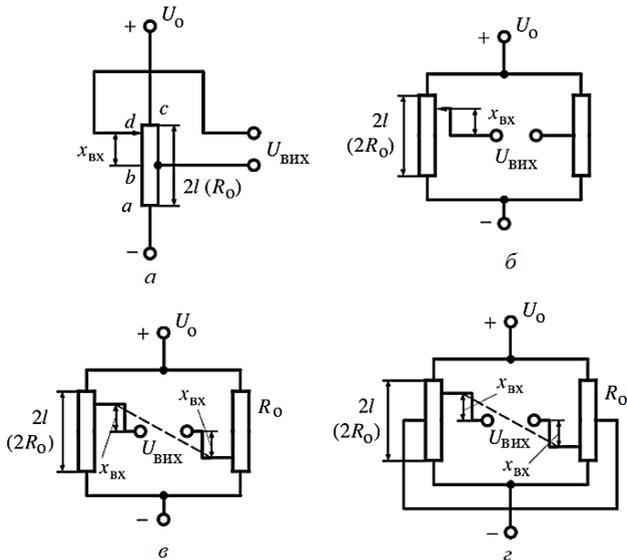


Рисунок 12.9 – Схеми електричні двотактних потенціометричних датчиків положення з одним повзунком (а, б) та з двома повзунками (в, з)

Електролітичні датчики (рис. 12.10) можуть використовуватися тільки в ланцюгах змінного струму через розкладання електроліту та поляризації електродів при постійному струмі; їхній опір сильно залежить від температури.

Для приблизного визначення зчпної ваги застосовуються датчики зі змінними довжиною та перетином каналу (рис. 2.11). Опір електролітичного датчика $R_{\text{Д}}$ довжиною L може бути визначений як $R=1/\Lambda$, де Λ – ϵ провідність електроліту (в загальному випадку визначається шляхом побудови картини

електричного поля і підсумовуванням провідності окремих ділянок).

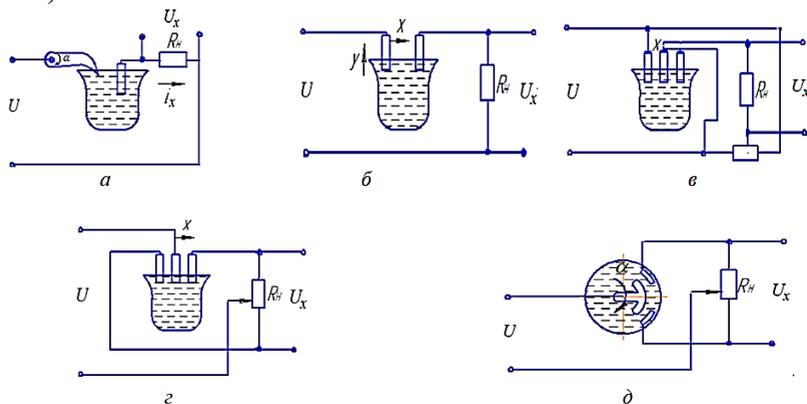


Рисунок 12.10 – Схеми пасивних резистивних електролітичних датчиків [51]

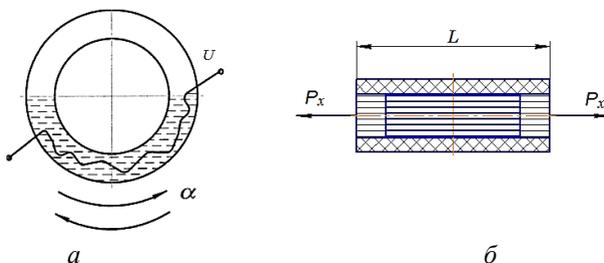


Рисунок 12.11 – Принцип роботи безступеневого датчика (а) та зі змінними довжиною і перетином каналу (б)

12.3 Омичні тензодатчики

Дія цих датчиків заснована на змінюванні активного опору провідникових та напівпровідникових матеріалів при дії на них зовнішніх механічних пружних сил. Ці датчики параметричного виду використовуються для перетворення малих деформацій (порядку 10^{-3} мм) в електричний сигнал (рис. 12.12) [1, 7, 18, 45].

Зазвичай деформація в напрямку дії сили в зоні пружних деформацій відбувається відповідно до закону Гука [1, 19, 29]

$$\delta_t = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E},$$

де δ_t – відносна продовжна деформація;
 σ – механічне напруження в провіднику;
 l – довжина провідника;
 Δl – зміна довжини в результаті деформації,
 E – модуль пружності (модуль Юнга);
Зміна опору характеризується тензочутливістю:

$$S_d = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = E \frac{\Delta R / R}{\sigma}, \quad (12.8)$$

де R і ΔR – відповідно опір і приріст опору в результаті деформації.

Якщо позначити відносне подовження як $\xi = \Delta l / l$, тоді модуль пружності буде рівний:

$$E = \sigma / \xi. \quad (12.9)$$

Принцип роботи тензодатчиків базується на тому, що опір металу змінюється через зміну геометричних розмірів і питомого опору матеріалу. Під дією деформації тензочутливого елемента - деталі змінюються його геометричні розміри і питомий опір, що впливає на загальну зміну опору:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (12.10)$$

де ρ – питомий опір матеріалу тензочутливого елемента;
 l та S – відповідно довжина і перетин елемента.

Провідникові тензодатчики бувають дротові та фольгові. Чутливі елементи датчиків виконуються з металевого дроту, або фольги – стрічки, а також напівпровідників круглого або

прямокутного перетину. Тензорезистор – це є тонкий тензочутливий елемент – дріт (рис. 12.12) або фольга (рис. 12.13), який укладений зигзагом на тонкій еластичній ізоляційній пластині (1) з паперу або плівки. До виводів елементу припаюються або приварюються вивідні пелюстки (3). Для захисту від вологи їх герметизують за допомогою металевих кожухів, фольги, або гуми.

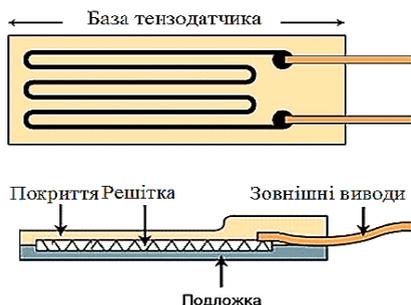


Рисунок 12.12 – Схема тензодатчиків дротової конструкції

Дротові елементи (рис. 12.12) зазвичай мають діаметр дроту від 0,015 мм до 0,030 мм, виготовляються, наприклад, з константана (склад 60% Cu + 40% Ni), який має питомий опір ρ , рівний 0,44...0,52 Ом·мм²/м, температурний коефіцієнт лінійного розширення K_m , що дорівнює 12,5 при нагріванні елемента датчика до 100 °С. Допустима робоча температура датчика $\theta_{раб} \leq 400^\circ\text{C}$. Інший матеріал може бути виконаний зі сплаву 479 (92% Pt + 8% W), який має питомий опір ρ , приблизно рівний 0,1 Ом·мм²/м, коефіцієнт $K_m = 9$ та допустиму робочу температуру $\theta_{раб} \leq 1300^\circ\text{C}$.

Фольгові тензорезистори (рис. 12.13) аналогічні дротовим, і їх елементи виготовляються з тонкої фольги прямокутного перетину товщиною від 0,004 мм до 0,012 мм, яка наноситься на лакову основу. Виготовляються вони фотохімічним способом, тобто зображення контуру тензодатчика переноситься фотографічним способом на поверхню фольги, покритої світлочутливим шаром. Потім контур проявляють, що робить його кислотостійким.

Фольгові елементи виготовляються із сплавів «золото-срібло» (Au+Ag) (кращі фольгові датчики), «мідь-нікель» (Cu+Ni), або «титана-алюміній» (Ti+Al). Останні забезпечують вимір відносної деформації до 12% і можуть працювати в агресивних середовищах. Зі зворотного боку фольги наносять шерлак, а незахищені кислотостійким шаром ділянки фольги протравлюють.

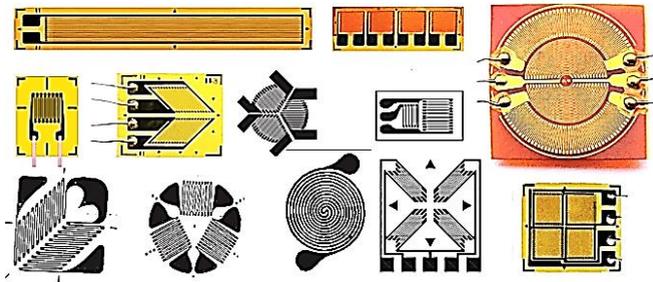


Рисунок 12.13 – Схеми тензодатчиків фольгової конструкції [62, 97]

Фольгові тензоелементи в порівнянні з дрововими мають такі переваги:

- високу тепловіддачу, яка здійснюється через більш велику площу фольги і, відповідно, кращого контактування смужок фольги з деталлю;

- технологічно застосовувати фольгу великого площі і забезпечувати добре приклеювання;

- збільшується значення струму через датчик, що підвищує тензочутливість приблизно на 40%;

- краще сприймається деформація об'єкту, що досліджується, через велике значення відношення периметру перетину пласкої смужки до площі її перетину, тому точність вимірювання деформації збільшується;

- з'являється можливість збільшити перетин терморезистора, що дозволяє здійснити надійніше кріплення виводів.

Всі омичні тензодатчики мають переваги такі, як:

- безінерційність, що надає можливість вимірювати швидкозмінні навантаження;

- стабільність;
- малий гістерезис;
- можливість розміщувати у важкодоступних місцях;
- невеликі габарити і вагу, а також відносно малу вартість.

Недоліки таких датчиків в тому, що вони мають температурну похибку та малу відносну зміну опору. До того ж до недоліків фольгових тензодатчиків можна віднести малу механічну міцність та сильний вплив навколишньої температури.

Мала відносна зміна опору призводить до необхідності застосовувати вимірювальні схеми значної чутливості (наприклад, мостові), а температурну похибку можна компенсувати спеціальною схемою включення [1, 22, 58, 62]. Наклеювання тензорезисторів призводить до того, що вони мають стабільні характеристики лише в одній партії при їх виробництві, та відповідно, тільки разове використання.

Конструктивно існують ненаклеювані тензодатчики. Їх можна використовувати для визначення значних зусиль. Наприклад, у важких транспортних конвеєрах, зчепленнях вагонів і вантажівок з метою орієнтовної оцінки зусилля (з погрішністю до $\pm 10\%$) можна використовувати датчик, виконаний з константанового дроту, намотаного на ізолятори (рис. 12.14), які кріпляться на деталях, що взаємно переміщуються. Зусилля, яке можна отримати при розтягуванні пучка дротів кількістю N , можна визначити формулою

$$P = N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot E \cdot \frac{\Delta l}{l} .$$

Напівпровідникові тензодатчики мають малі габарити та високу чутливість ($Y \approx 20..200$ і більше). Для таких датчиків визначальним є зміна геометричних розмірів, а зміна питомого опору ρ матеріалу (тобто коефіцієнт m).

У процесі деформації напівпровідникового тензорезистору змінюється відстань між атомами кристалічної решітки матеріалу, або між атомом домішки та навколишніми атомами кристалічної решітки, а значить, і сили взаємодії між атомами. Тому концентрація вільних носіїв залежить від деформації.

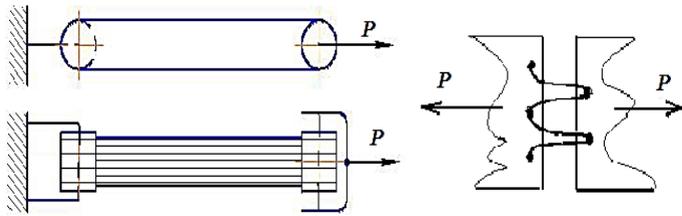


Рисунок 12.14 – Ненаклеюваний датчик для визначення великих зусиль [51]

Основними напівпровідниковими матеріалами, що використовуються для виготовлення тензорезисторів, в даний час є кремній (монокристал) Si і сульфід самарію (монокристал). Крім того, використовуються антимонід індію InSb, фосфід індію InP, арсенід галію GaAs, антимонід галію GaSb. Монокристал таких матеріалів має довжину 5...10 мм, ширину 0,2...0,8 мм і приклеюється на підложку. Поки що найчастіше використовується кремній (кварц), що має коефіцієнт тензочутливості $Y \approx 150$. Однак його крихкість і нелінійність характеристики, і навіть температурна нестабільність обмежують застосування. Тому кремній у тензодатчиках поступово поступається місцем сульфиду самарію (SmS) з коефіцієнтом тензочутливості $Y \approx 30...100$ (у металевих тензорезисторів $Y = 2...4$). Такі тензорезистори мають високий рівень вихідного сигналу датчика, широкий діапазон вихідних опорів (200 Ом...20 кОм; для порівняння: кварцові датчики – до 10 кОм, металеві – 0,12...1 кОм), вони можуть працювати в температурному діапазоні від -120° до $+400^\circ \text{C}$ (кварцові – від -50°C до $+150^\circ \text{C}$; металеві - від -200°C до $+200^\circ \text{C}$), забезпечують (на відміну від кварцових датчиків) можливість монтажу датчика на вигнуту поверхню з радіусом кривизни не менше 10 мм здатні працювати при рівномірному тиску до 100 МПа. Вихідні характеристики тензорезисторів практично лінійні за деформацією, тиском, температурою у всіх робочих діапазонах. SmS-тензорезистори можуть бути як монокристалічними (подібно кварцовим), так і

полікристалічними, у вигляді плівки, напиленої на підкладку та з контактними майданчиками (рис. 12.15). Полікристалічні датчики менш крихкі, ніж монокристалічні, тому їх застосовують і для вимірювання на криволінійних поверхнях.

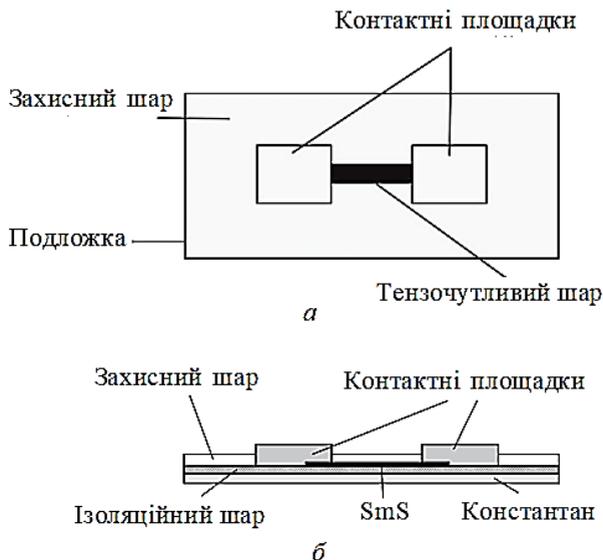


Рисунок 12.15 – Напівпровідниковий тензорезистор:

a – вид зверху; *б* – вид збоку [93, 97]

Конструкція датчика практично не відрізняється від стандартної і має підложку з ізолюючого матеріалу, контактні площадки для знімання сигналу та тензочутливий шар (монокристал германію або кремнію, або напилений шар SmS). З боку тензочутливого елемента на датчик наноситься захисний шар. На рис. 12.16 наведено схеми реальних SmS-тензодатчиків з полікристалічним шаром розміром 0,4 мм × 0,6 мм. Контактні нікелеві майданчики для висновків мають розміри 0,8 мм × 0,8 мм. Для забезпечення ізоляції датчика від підложки між ними нанесений шар монооксиду кремнію завтовшки 3 мкм. Тензодатчик приклеюється до підложки константанової фольги товщиною 10 мкм. Датчики на основі тензорезисторів можуть бути розміщені

(наклеєні) безпосередньо на об'єкті, що досліджуються або експлуатуються, а також на пружних елементах вимірювальних перетворювачів (наприклад, мембран, трубчастих пружин і тощо). Для виготовлення тензодатчиків широко використовується метод вакуумної сублімації тензочутливого матеріалу і подальшої конденсації його на підложку. Такі тензодатчики називають плівковими. Для виготовлення використовують як металеві, так і напівпровідникові матеріали.

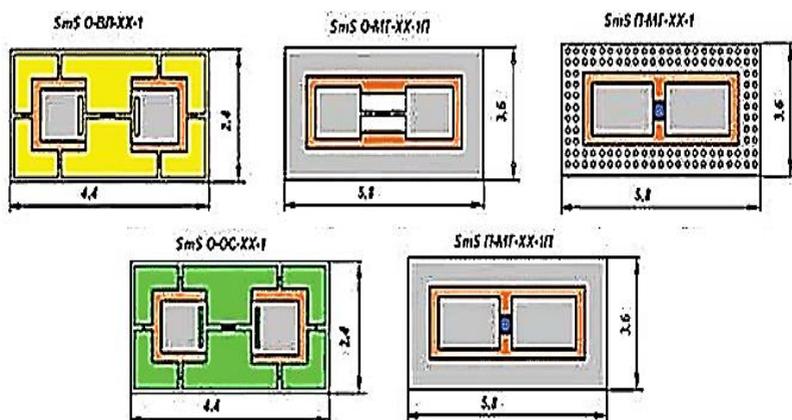


Рисунок 12.16 – Розміщення тензорезисторів з полікристалічним шаром SmS

Для вашого уявлення можна подивитися відео за посиланням <https://www.youtube.com/watch?v=KdqXECSEI-EU>.

12.4 Термоелектричні перетворювачі (термопари)

Принцип роботи термопар ґрунтується на ефекті Зеебека (Т. Seebeck) – виникненні електрорушійної сили в ланцюзі, що складається з різнорідних провідників, контакти між якими мають різну температуру., коли два різнорідних за матеріалом провідника (або напівпровідника) контактують один з другим на атомному рівні, виникає різниця електричних потенціалів [1, 37, 45, 51, 97].

З точки зору електронної побудови металів фізична сутність термо-ЕРС пояснюється тим, що в різних металах вільні електрони володіють різними енергіями і швидкістю руху. Через це явище при їх з'єднанні вільні електрони одного проникають в інший, причому метал з більшою активністю вільних електронів здобуває позитивний потенціал (завдяки втраті деякої частини електронів), а з меншою активністю – негативний потенціал. Термо-ЕРС є мірою різниці температур. Більш точніше вихідну напругу термопари можна записати як ступеневий ряд від різниці температур $(\theta - \theta_0)$, де θ_0 – певна задана температура калібрування:

$$E = \alpha_1 \cdot (\theta - \theta_0) + \alpha_2 \cdot (\theta - \theta_0)^2 + \dots + \alpha_n \cdot (\theta - \theta_0)^n. \quad (12.19)$$

Кожна комбінація двох металів в термопарі характеризується власним рядом температурно незалежних коефіцієнтів α_i ($i = 1 \dots n$) [1, 15, 25]. Якщо температури спаїв однакові, то ЕРС термопари дорівнює нулю, якщо температури спаїв різні, то ЕРС термопари є відмінною від нуля (рис. 12.17). Провідники А і Б називаються термоелектродами, а місця їх стику 1 і 2 – спаями. Вільним або холодним називається спай, температура якого підтримується відносно постійною. Гарячим називається спай, що знаходиться у середовищі, температуру якого вимірюється. А – позитивний термоелектрод, В – негативний термоелектрод, а спай з температурою θ_1 – гарячий спай (робочий кінець), з температурою θ_2 – холодний спай (вільний кінець). Стрілки показують напрям струму.

Для виміру термо-ЕРС до термопар підключаються мілівольтметри або між електродами А та Б, як показано на рис. 12.17, з, крім того точкою 1 позначений гарячий спай; а точками 2, 3 – холодні спаї. На рис. 12.17, д мілівольтметр включений в розрив електрода Б. Тут точкою 1 позначений – гарячий спай, точкою 2 – холодний спай, а точками 3 – нейтральні спаї, 4 – це з'єднувальні дроти (провідники).

Диференційна пара, що наведена на рис. 12.17, б, використовується для вимірювання різниці температур в двох точках 1 і 2, які є гарячими спаями. При цьому, якщо $\theta_1 \neq \theta_2$, то в

колі з'являтиметься термо-ЕРС, полярність якої покаже, де температура буде вища, а де нижча.

Для отримання значно більшої термо-ЕРС застосовують термобатареї. Через те, що термо-ЕРС, яка утворюється одною термопарою невелика і складає для різних термопар від 0,01 мВ до 0,07 мВ на 1°C, необхідно підсумовувати всі ЕРС. Вважається, що при використанні термобатареї з термопар в кількості n підвищуватиметься точність виміру температури відповідно в n раз.

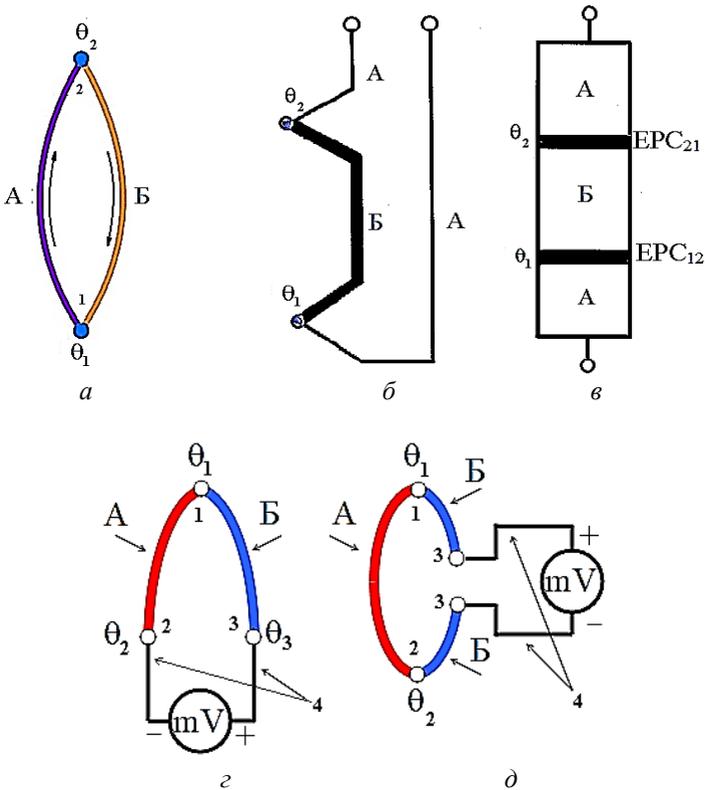


Рисунок 12.17 – Схема найпростішої термопары $\theta_1 > \theta_2$ (а), диференційна термопара (б) та її еквівалентна електрична схема (в). Широкими темними смугами показаний подвійний електричний шар.

Слід зазначити, що величина термо-ЕРС залежить лише від матеріалу термоелектродів і температури кожного спаю, і не залежить від розподілу температури вздовж термоелектронів (якщо при цьому температура спаїв залишається незмінною), крім того включення вимірювального прибору в термоелектричне коло не впливає на значення термо-ЕРС. Матеріали, з яких виготовляються термоелектроди, мають задовольняти вимогам зберігати свої механічні та хімічні властивості впродовж довгого терміну, мати порівняно високу термо-ЕРС та гарну електропровідність.

Термопари з благородних металів, зазвичай, застосовуються, як зразкові, або для виміру високих температур. Наприклад, платіно-родієва термопара (один електрод вироблений зі сплаву 90% Pt + 10% Rn, а другий – з чистої платини) при $\theta = 1600^\circ\text{K}$ має термо-ЕРС 16,76 мВ. Застосовується в тривалому режимі для виміру температур до $\theta = 1600^\circ\text{K}$ і короткочасному – до $\theta = 1900^\circ\text{K}$. Або інша платіно-родієва термопара (один електрод виконаний зі сплаву 70% Pt + 30% Rn, а другий – зі сплаву 94% Pt + 6% Rn) при $\theta = 1800^\circ\text{K}$ має 10,82 мВ термо-ЕРС. Застосовується для короткочасних режимів до $\theta = 2100^\circ\text{K}$.

Окрім переваги (хімічної стійкості) ці термопари мають і недолік. При температурі вище 1000°K в тривалому режимі термоелектроди можуть взаємодіяти із навколишніми елементами, в наслідок чого їх характеристики змінюватимуться.

Термопари з неблагородних металів, найбільш поширені через невисоку вартість. Наприклад, хромель-алюмелева термопара (один електрод виготовлений з хромелю 89% Ni + 9,8% Cr + 1% Fe + 0,2% Mn, а другий – з алюмелю 94% Ni + 2% Al + 2,5% Mn + 1% Si + 0,5% Fe). Або хромель-копелева термопара (один електрод виготовлений з хромелю, а другий – з копелю 55% Cu + 45% Ni). Термопари з напівпровідникових матеріалів (термогенератори), володіють чутливістю до 1 мВ на 1°C використовуються для перетворення теплової енергії в електричну в межах до 700°K . Наприклад, один електрод виготовлений з вісмуту (Bi) + сурми (Sb) + цинка (Zn), а другий – з (Bi + Sb), або (Sb + Zn). На основі напівпровідникових термопар розробляють перетворювачі сонячної енергії в електричну.

Зазвичай градування реєструючих приладів здійснюють при температурі холодного спаю $\theta_2 = 0^\circ\text{C}$, але на практиці задовольнити таким вимогам важко, оскільки треба помістити холодний спай у ванну з танучим льодом, або розмістити в спеціальному термостаті. Тому простіше уточнювати реальну температуру відповідно до градувальної кривої (рис. 12.18).

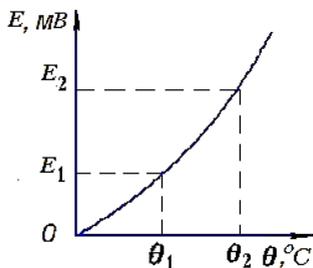


Рисунок 12.18 – Залежність ЕРС термопары від температури.
Градувальна крива термопары

Крім того, також застосовується автоматична корекція температурних похибок (рис. 2.19), що здійснюється за рахунок компенсації температури еталонного контакту, температура якого вимірюється резистивним датчиком $R(\theta)$, який включений в мостову схему.

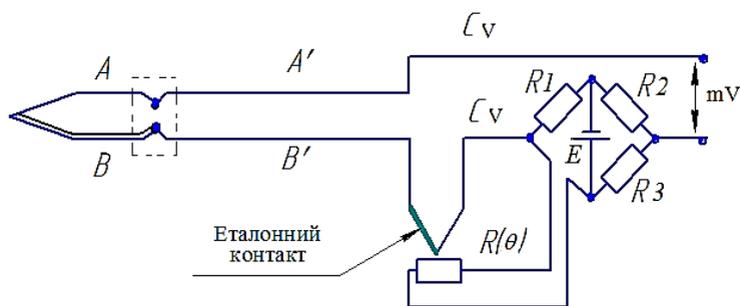


Рисунок 12.19 – Принципова електрична схема для компенсації температури за рахунок еталонного контакту

Схема підключена таким чином, що вхідна напруга моста і ЕРС термопари компенсують одна одну, і відбувається компенсація температури еталонного контакту. Температурна чутливість еталонного контакту має бути протилежна тій, яку має мостова схема. Об'єкт, температура котрого вимірюється активним контактом АВ, частіше за все розташована на певній відстані від решти елементів схеми.

Матеріал у складі термопари занадто дорогий для того, щоби використовувати його, як довгий поєднувальний провід, тому використовують більш дешеві два дроти А' та В'. До того ж не буде виникати додаткова помилка, якщо ці дроти мають термоелектричні характеристики, подібні до А та В. Поєднувальний кабель між двома контактами термопари має ті самі термоелектричні характеристики і називається компенсаційним кабелем.

Для вираховування температури за допомогою термопари наведемо один з наступних наближених методів. Визначається величина термо-ЕРС формулою:

$$E_{ТП} = U_M \cdot (R_M + R_{ПД} + R_{ТП}) / R_M, \quad (12.20)$$

де U_M – напруга на затисках мілівольметра;

R_M – опір мілівольметра;

$R_{ПД}$ – опір подовжувальних дротів;

$R_{ТП}$ – опір термопари.

Визначається перепад температури $\theta_{пер}$, який є різницею температури гарячого і холодного кінців термопари $(\theta_1 - \theta_2)^\circ\text{К}$

$$\theta_{пер} = E_{ТП} \cdot 100 / E_{ТАБ}, \quad (12.21)$$

де $E_{ТАБ}$ – величина термо-ЕРС при температурах $\theta_1 = 373^\circ\text{К}$ та $\theta_2 = 273^\circ\text{К}$.

Значення $E_{ТАБ}$ для різних термопар наводяться в таблицях довідкових літературних джерел [1, 15, 25]. Реальна температура визначається:

$$\theta_1 = \theta_{пер} + \theta_2, \quad (12.22)$$

де θ_2 – температура холодного кінця термопари (зазвичай температура навколишнього середовища).

Ці значення температури є приблизним через те, що воно розраховано на припущенні лінійної функції між термо-ЕРС та температурою вимірювання. Для більш точного визначення температури необхідно звертатися до таблиць градування [1, 7, 55, 80, 97]. Розроблені цифрові пристрої для вимірювання температури термопарами в межах від 0 до 1800°C з інтервалом 0,1°C (рис. 12.20). Температура вимірюється за допомогою термопари ТП, виконану з двох електродів А і В, і далі перетворюється в сигнал, що придатний для обробки та аналізу. Функціональний блок - перетворювач забезпечує лінеаризацію загальної функції перетворення [1, 15].

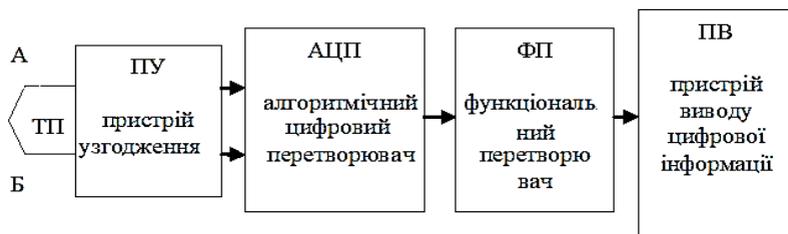


Рисунок 12.20 – Функціональна схема цифрового приладу для вимірювання температури [51]

12.5 Індуктивні та трансформаторні датчики

Індуктивні і трансформаторні датчики призначені для вимірювання значень переміщень та зусилля. Принцип їх роботи, відповідно, базується на зміні індуктивності через пересування рухомого елемента, або магнітного зв'язку між первинною та вторинною обмотками. Отже, ці датчики розрізняють за вихідними параметрами: з коефіцієнтом самоіндукції, що змінюється (індуктивні датчики) та з коефіцієнтом взаєміндукції, що змінюється (трансформаторні датчики) [1, 7, 51, 97].

12.5.1 Індуктивні датчики

Як було зазначено, принцип їх дії заснований на зміні індуктивності системи датчика через зміну магнітного потоку вхідної величини рухомої частини. Індуктивність електромагнітної системи визначається за формулою:

$$L = \frac{1}{I} \cdot \sum \Phi \cdot W, \quad (12.23)$$

де L – індуктивність електромагнітної системи датчика;
 I – струм котушки;
 Φ – магнітний потік;
 W – число витків обмотки.

Якщо знехтувати розсіюванням магнітного потоку в магнітній системі, що містять обмотку і феромагнітне осердя з незначним повітряним зазором, тоді $\sum \Phi_i \cdot W_i = \Phi \cdot W$. Якщо врахувати що, $\Phi = I \cdot W / Z_\mu$, можна отримати

$$L = \frac{W^2}{Z_\mu}, \quad (12.24)$$

де Z_μ – повний магнітний опір магнітопроводу, який можна визначити за формулою

$$Z_\mu = \sqrt{(R_m + R_\delta)^2 + X_\mu^2}. \quad (12.25)$$

Складові якого наступні:

$$R_m = \frac{l}{\mu_a \cdot S}; \quad R_\delta = \frac{1}{\mu_0 \cdot \Lambda}; \quad X_\mu = \frac{P_{CT}}{\omega \cdot \Phi^2}, \quad (12.26)$$

де R_m – активний опір магнітопроводу;
 l – довжина середньої силової лінії магнітопроводу;
 μ_a – абсолютна магнітна проникність;
 μ_0 – магнітна постійна повітря;

S – перетин магнітопроводу;
 R_δ – магнітний опір повітряного зазору;
 Λ – провідність повітряного зазору;
 X_μ – реактивний опір магнітопроводу;
 P_{cm} – втрати в осерді і в провідних елементах конструкції;
 ω – кутова частота.

Співвідношення (12.24) та (12.26) дозволяють пояснити наступні ідеї побудови конструкцій індуктивних датчиків, наприклад, зі змінним числом витків (12.24), або з μ_a , котра змінюється при підмагнічуванні осердя чи при дії механічних зусиль на осердя, або зі змінним повітряним зазором, чи зі змінним реактивним магнітним опором X_μ , який змінюється при переміщенні витка в повітряному зазорі, або переміщенні екрана (12.26). Розглянемо принцип роботи індуктивного датчика зі змінним повітряним зазором і його площею (рис. 2.21).

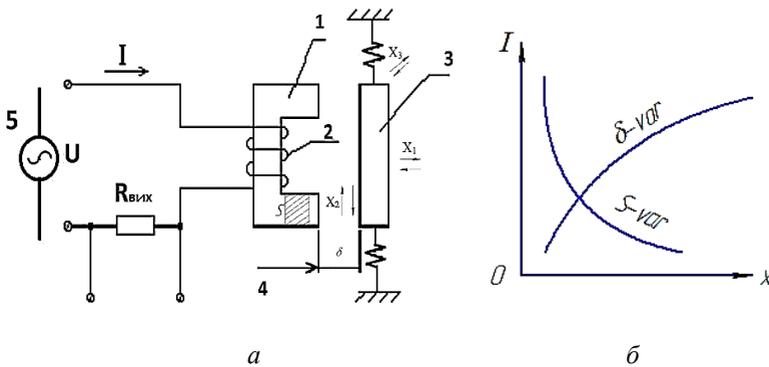


Рисунок 12.21 – Індуктивний датчик та його характеристики [51]

Як видно на рисунку, до його складу входять: магнітопровід або ярмо (1) – призначений для передачі електромагнітного поля від генератора в зону чутливості; котушка індуктивності (2) – створює змінне електромагнітне поле під час протікання електричного струму витками; об'єкт вимірювання (3) – металевий ярір, що вводиться або переміщується в області чутливості, неметалеві предмети не здатні впливати на стан електромагнітного

поля, тому вони не використовуються як детектор; зазор між об'єктом вимірювання і основним магнітопроводом (4) – забезпечує міру взаємодії як магнітного діелектрика, залежно від моделі датчика і способу переміщення може залишатися незмінним або коливатися в заданому діапазоні; генератор (5) – призначений для генерації електричної напруги заданої частоти, яка створюватиме змінне магнітне поле в заданій області.

При оцінюванні характеристик датчика можна знехтувати магнітним опором сталевих частин магнітопроводу. Також треба зауважити, що при переміщенні по якоря в напрямку X_1 змінюватиметься повітряний зазор δ , при переміщенні в напрямку X_2 змінюватиметься площа зазору S , а також при переміщенні в напрямку X_3 змінюватимуться обидва δ і S . Для отримання більш задовільної лінійності такого датчика зміна робочого зазору δ обмежується значенням 10% від номінального значення. До того ж вихідний сигнал не набуває нульового значення ні при яких значеннях X . На якір датчика діє однібічне зусилля тяжіння:

$$F = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{dx},$$

де I – струм в обмотці.

Також на рис. 12.21, б наведені характеристики такого датчика, які відображають їх нелінійність, а для усунення цих недоліків застосовуються диференційні та мостові схеми включення, які мають кращі характеристики і, відповідно, здобули більш широкого розповсюдження.

Відстань спрацьовування та об'єкт впливу залежить від конструкції та принципу дії індуктивного датчика, а об'єкт впливу може мати вертикальне або горизонтальне переміщення щодо самого вимірювача. Однак реакція сенсора на початок руху контрольованого об'єкта може починатися не відразу, що зумовлюється номінальною відстанню, при якому забезпечується зона чутливості датчика і технічними параметрами об'єкта. Як видно на рис. 12.22, у першому положенні контрольований об'єкт знаходиться на такому віддаленні, де електромагнітні лінії не досягають його поверхні. У такому разі з індуктивного датчика

сигнал не зніматиметься, оскільки він не фіксує переміщення в зоні чутливості. У другому положенні контрольований об'єкт вже перетнув відстань спрацьовування та увійшов у чутливу зону. Внаслідок взаємодії з об'єктом на виході датчика з'явиться відповідний сигнал.

Також відстань спрацьовування залежатиме від геометричних розмірів, форми та матеріалу. Слід зауважити, що як об'єкт спрацьовування індуктивного датчика застосовуються тільки металеві предмети, але від конкретного типу відрізнятиметься і момент переходу датчика в протилежний стан, що зображено на діаграмі:

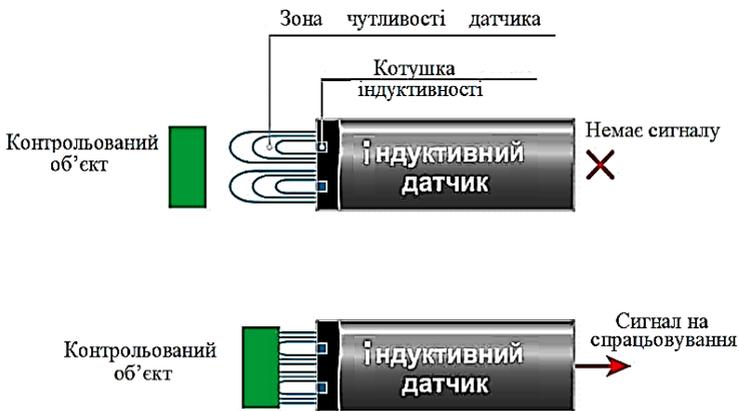


Рисунок 12.22 – Область та об'єкт спрацьовування індуктивного датчика [62, 97]

На практиці існує величезна різноманітність індуктивних датчиків, всіх їх можна розділити на дві великі категорії, залежно від роду струму живлення – змінного та постійного. Залежно від стану контактів індуктивні датчики бувають:

- замикаючі – при переміщенні контрольованого об'єкта відбувається переведення у включений стан;
- розмикаючі – у разі дії індуктивний датчик переводить контакти у відключене положення;

– перемикаючі – одночасно поєднує обидва попередні варіанти, за одну комутацію переводить один висновок у включене, другий, у відключене положення.

За кількістю вимірювальних кіл індуктивні датчики поділяються на одинарні та диференційні. Перший з них має одну котушку і одне коло вимірювання. Другий тип – наявність двох сенсорів, вимірювальні ланцюги яких включаються в протифазу для порівняння показань.

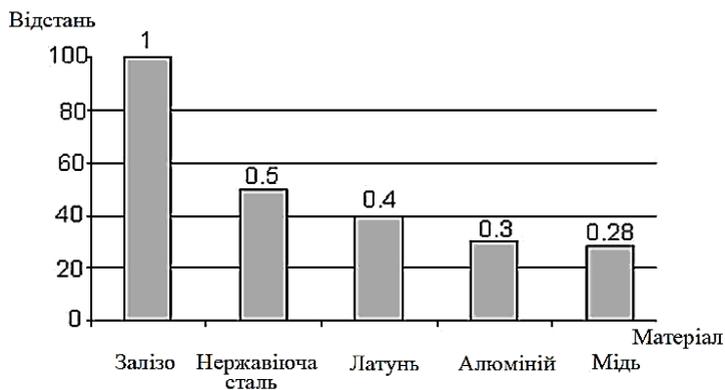


Рисунок 12.23 – Рис. 5. Залежність відстані спрацьовування від матеріалу [97]

При виборі індуктивного датчика на вирішення конкретної завдання керуються параметрами кола, у яких функціонуватиме і основний логікою схеми. Тому обов'язково перевіряється відповідність їх параметрів:

– напруга живлення – визначає допустимий мінімум та максимум різниці потенціалів, при якому індуктивний датчик нормально працює;

– мінімальний струм спрацьовування – найменше значення навантаження, при якому відбудеться перемикання;

– відстань спрацьовування – допустимий проміжок видалення, при якому відбуватиметься комутація;

- індуктивний та магнітний опори – визначає провідність електричного струму та ліній магнітної індукції для конкретної моделі;
- поправочний коефіцієнт – застосовується для внесення поправки, залежно від додаткових факторів;
- частота перемикачів – максимально можлива кількість комутацій протягом секунди;
- габаритні розміри та спосіб монтування.

12.5.2 Трансформаторні датчики

На рис. 12.24 наведений найпростіший трансформаторний датчик. У цих датчиках вхідне переміщення (δ , x або α) змінює величину індуктивного зв'язку між двома системами обмоток, одна з яких (первинна – 1) має живлення змінним струмом, а з другої (вторинної – 3) знімається вихідний сигнал. Якір 2 притягується до осердя 4.

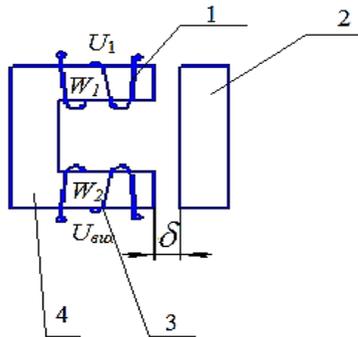


Рисунок 12.24 – Односторонній трансформаторний датчик [51, 97]

Перехідна характеристика такого датчика дорівнює:

$$U_{вих} = \frac{W_2}{W_1} \cdot U_1 = k \cdot U_1, \quad (12.27)$$

де W_1 і W_2 – витки вхідної і вихідної обмоток;
 δ – зазор між ярмом і якорем датчика;

k – коефіцієнт трансформації;

$U_1, U_{вих}$ – відповідно вхідна та вихідна напруги.

На рис. 12.25 показано більш чутливі – диференційні трансформаторні датчики, а їх вихідна напруга, відповідно, дорівнює

$$U_{вих} = k \cdot U_1 \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_2 + \delta_1}, \quad (12.28)$$

де δ_1 і δ_2 – зазори датчика;

k – коефіцієнт трансформації.

З формули 12.28 випливає, що вихідна напруга ($U_{вих}$) є прямо пропорційною до різниці довжини зазорів ($\delta_2 - \delta_1$).

На рис. 12.25, б наведений датчик зі змінною площею зазорів, в якому при переміщенні якоря буде змінюватися розподіл магнітного потоку вторинних обмотках.

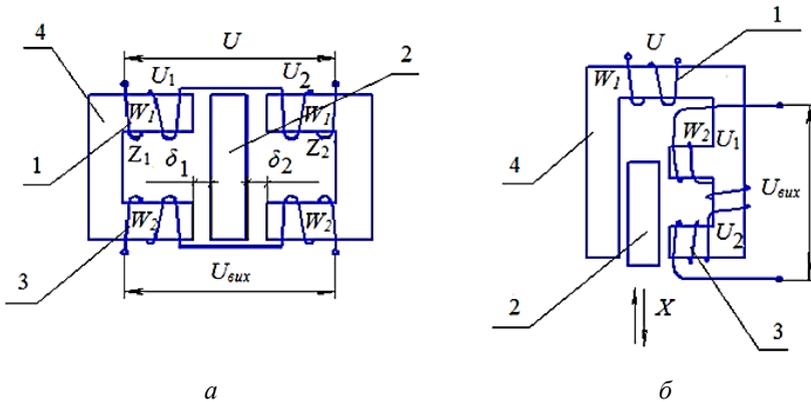


Рисунок 12.25 – Диференційні трансформаторні датчики (а) та зі змінною площею зазорів (б)

За способом передачі даних індуктивні датчики поділяються на аналогові, електронні та цифрові. У першому випадку застосовуються котушки та феромагнітні сердечники, а електронні – використовують тригер Шмідта замість феромагнетиків для отримання гістерезисної складової. Цифрові виконуються у

форматі друкованих плат мікросхемах. Крім цього види поділяються за кількістю висновків датчика: два, три, чотири чи п'ять.

12.6 Ємнісні датчики

Ємнісні датчики (точніша назва – ємнісні датчики зсуву) призначені для вимірювання значень переміщення, розмірів деталей, рівня рідини, тощо. Принцип дії базується на зміні ємності конденсатора датчика через вплив певного вхідного параметра, який вимірюється (рис. 12.26).

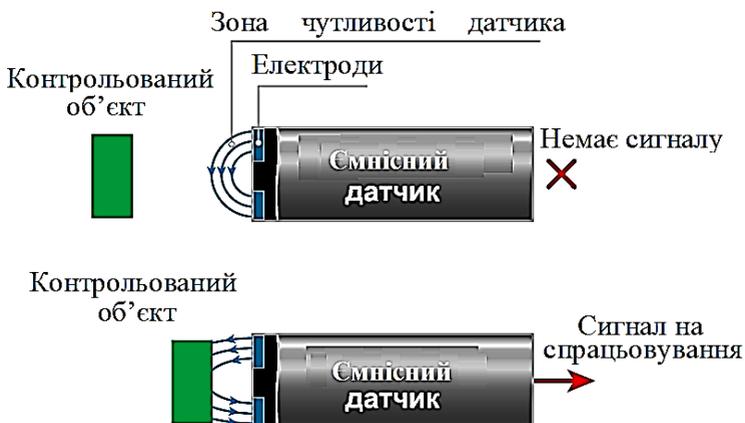


Рисунок 12.26 – Область та об'єкт спрацьовування ємнісного датчика

Ємність C є функцією відстані d між електродами датчика (або обкладинками конденсатора), площі електродів S і діелектричної проникності ϵ діелектрика між електродами $C = f(d, S, \epsilon)$. Вочевидь, змінюючи d , S і ϵ , можна реалізувати три види ємнісних датчиків. Наприклад, деякі конструкції і графіки зміни їх ємностей наведені на наступних рисунках: при зміні повітряного зазора між пластинами конденсатора (рис. 12.27, *a*), при зміні площі перекриття пластин, коли одна пластина конденсатора зміщується

відносно другої (рис. 12.27, б), при зміні діелектричної проникності середовища (рис. 12.27, в).

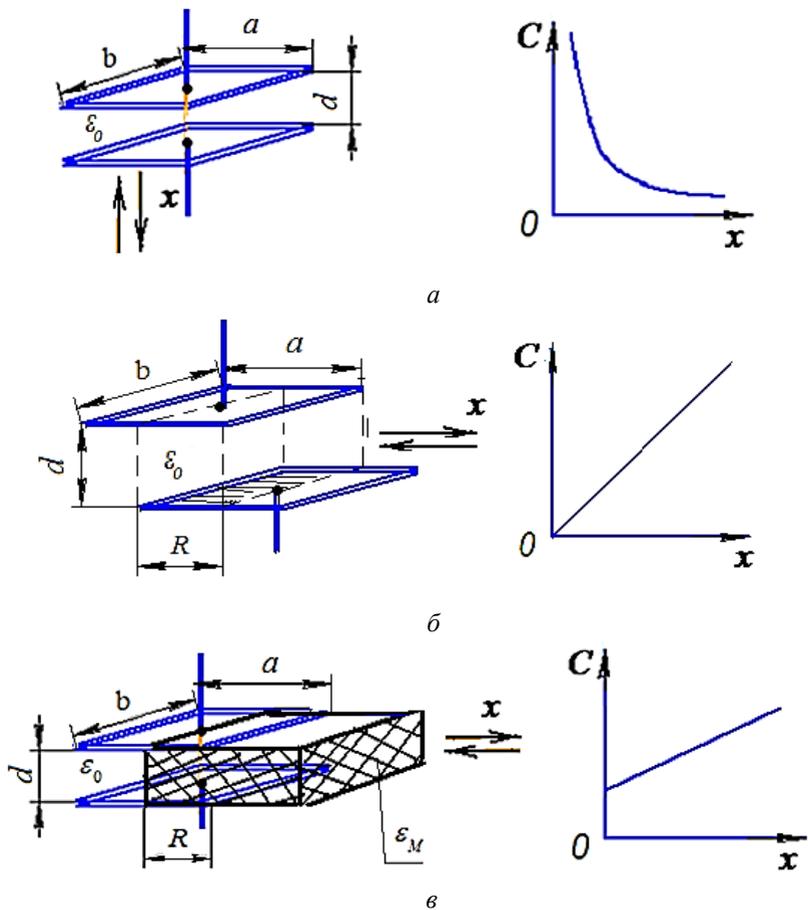


Рисунок 12.27 – Ємнісні датчики переміщення [51]

Перший варіант конструкції має характеристику, що близька до гіперболічної, решта два варіанта конструкцій мають майже лінійні характеристики. Якщо знехтувати всіма крайовими ефектами, тоді ємність датчика, зображеного на рис. 12.27, а, дорівнюватиме

$$C(x) = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (12.29)$$

де x – вхідна величина;

ε_0 – електрична константа, що дорівнює $8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м ;

ε – відносна діелектрична проникність середовища між обкладинками;

S – площа, що перекривається обкладинками конденсатора ($S = a \cdot b$);

d – відстань між обкладинками конденсатора.

Характеристика, яка спадає при збільшенні відстані між обкладинками, означає, що при збільшенні магнітного потоку напрям індукованого струму протилежний до визначеного правилом буравчика. Проте датчик нелінійний і має гіперболічну передавальну характеристику. Такий датчик застосовують для виміру малих переміщень без контакту з вимірюваним об'єктом. Характеристику датчика можна лінеаризувати шляхом використання диференційних схем включення.

Датчик, що зображений на рис. 2.27, б, має передавальну характеристику при змінненні площі перекриття електродів

$$C(x) = \frac{\varepsilon_0 \cdot (b \cdot R)}{d}, \quad (12.30)$$

де b – ширина датчика;

R – довжина перекриття обкладинок конденсатора.

Такий датчик має лінійну залежність від x . Зазвичай він реалізується у виді поворотного конденсатора для виміру кутових зсувів. Конструкція з поворотним конденсатором застосовується також і як вихідний перетворювач для виміру електричної напруги (ємнісний вольтметр). Датчик, зображений на рис. 12.27, в, також є лінійним, і використовується у випадку, коли змінюється положення діелектрика, що має відносно електричну проникність

ϵ_M матеріалу. Якщо прийняти, що $C_0 = C_0 \frac{a \cdot b}{d}$, тоді ємність конденсатора буде дорівнювати

$$C(x) = C_0 \cdot \left\{ 1 + \frac{R}{a} \cdot (\epsilon_M - 1) \right\}, \quad (12.31)$$

Частіше за все він може бути реалізований у формі двох концентричних циліндрів та використаний для виміру рівня рідини в резервуарі. Причому непровідна рідина грає роль діелектрика.

Вимірюваний об'єкт повинен прикласти силу $F(x)$ до ємнісного датчика аби перемістити електроди на величину x , що дорівнює:

$$F(x) = \frac{1}{2} \cdot U^2 \frac{dC(x)}{dx}, \quad (12.32)$$

де U – напруга живлення датчика.

Якщо за позитивне прийняти збільшення x , то для датчика (а) – сила буде позитивною, а для (б) і (в) – буде негативною. Загалом ємнісні датчики на практиці є достатньо надійними і дешевими.

12.7 Активні датчики

Загальний принцип їх дії полягає в створенні вихідного сигналу струму, заряду або ЕРС, які є еквівалентними впливу механічного зусилля, магнітного чи світлового потоку, тощо.

Дія активного датчика може бути представлена співвідношенням:

$$U = -B \cdot l \cdot V, \quad (12.33)$$

де U – напруга, що є індукційованою в провіднику, який рухається;

B – магнітна індукція;

l – довжина провідника;

V – швидкість рівномірного руху провідника в напрямку, який є перпендикулярним до силових ліній.

Активні датчики можуть бути постійного, або змінного струму, однофазні чи багатофазні, і, зазвичай, використовуються для контролю частоти обертання, кутового прискорення, кута повороту, швидкості чи прискорення лінійного переміщення. Датчики можуть формувати значні вихідні сигнали по напрузі потужності в широкому діапазоні зміни контрольованої величини, мають практично лінійну характеристику, добре протистоять короткочасним механічним і електричним перевантаженням, прості у використанні.

12.7.1 Датчик частоти обертання – тахогенератор

На виході датчика частоти обертання формується напруга, пропорційна частоті обертання ротора. На рис. 2.28 зображені конструкції постійного (а) та змінного (б) струмів. Магнітний потік збудження утворюється постійним магнітом 1. При обертанні ротора 3 (рис. 12.28, а), або магніту 1 (рис. 12.28, б) з кутовою швидкістю ω у сигнальних обмотках N_c індукуються змінна ЕРС. Для випрямлення напруги, що генерується, в схемі а використовується колектор і щітки.

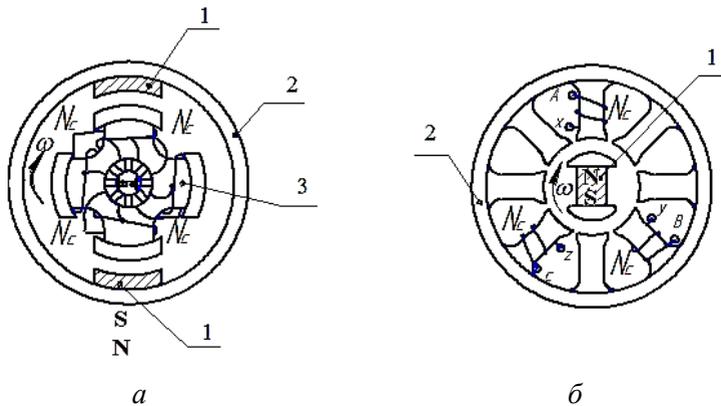


Рисунок 12.28 – Тахогенератори постійного та змінного струму

Для зменшення напруги між сусідніми ламелями колектору, з середини кожної обмотки зроблено відпаювання, поєднане

відповідною колекторною пластиною. Тахогенератори можуть контролювати не лише частоту обертання, але і кут повороту φ робочого механізму. Для цього датчик потрібно обертати з постійною частотою, а на вихід підключати інтегруючий пристрій.

Датчик постійного струму не потребує такого пристрою, якщо одну з щіток механічно поєднати до робочого механізму, а ротор обертати з постійною частотою. Тоді по мірі обертання робочого механізму змінюватиметься положення щіток і напруга між ними, причому напруга буде змінюватися пропорційно куту повороту робочого механізму.

12.7.2 Датчик кутового прискорення

Такий датчик наведений на рис. 12.29. Магнітний потік збудження Φ_B утворюється постійним магнітом 3. В роторі 4 (з міді або алюмінію) наводиться ЕРС за умови його обертання. Струми розподілятимуться, як в звичайній котушці [1, 51].

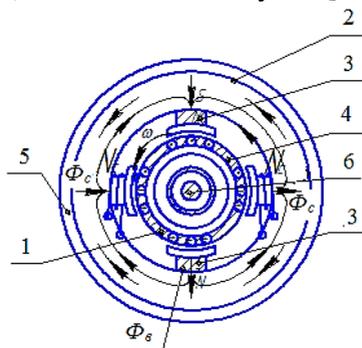


Рисунок 12.29 – Датчик кутового прискорення:

- 1 і 2 – внутрішній і зовнішній магнітопроводи; 3 – постійні магніти;
4 – ротор, 5 – корпус з підшипниковими вузлами; 6 – вал.

Отже, продукovanі струми ротора утворюють сигнальний магнітний потік Φ_c . Його напрямок буде співпадати з напрямом потоку, який продукується котушкою з при протіканні струмів в її верхній і нижній частинах. Потік Φ_c є ортогональним по відношенню до потоку Φ_B , і направлений вздовж магнітної осі

сигнальних обмоток N_c . Якщо ротор обертається з постійною кутовою швидкістю ω , то ЕРС в сигнальних обмотках дорівнюватиме нулю, оскільки згідно з законом електромагнітної індукції ЕРС завжди дорівнює нулю за умови незмінного потоку.

Будь-які зміни частоти обертання ротора (прискорення або уповільнення) призведуть до зміни ЕРС і струмів в роторі, еквівалентному зростанню або зниженню потоку Φ_c , і в кінцевому рахунку – до наведення ЕРС в сигнальних обмотках. Результуюча вихідна ЕРС буде дорівнювати сумі ЕРС кожної сигнальної обмотки, і пропорційна кутовому прискоренню ξ . Якщо постійні магніти замінити електромагнітами, підключити їх до джерела змінного струму, тоді при роботі датчика вихідна ЕРС буде пропорційна кутовій швидкості ω обертання ротора.

Датчик ABS спочатку був розроблений для антиблокувальної гальмівної системи (ABS). З плином років ці системи безпеки вдосконалювалися, і важливість датчика ABS безперервно зростала. Дані про швидкість обертання коліс надходять з датчика до різних систем автомобіля, включаючи коробку передач, систему управління шасі, навігаційну систему і противідкатну систему. Поміж видів датчиків ABS вони різняться за типом роботи:

- пасивні датчики ABS – для зубчастих коліс;
- активні датчики ABS – для зубчастих коліс і коліс з магнітним пристроєм, що кодує.

Активні датчики ABS називаються так, тому що їм потрібне зовнішнє живлення, щоб почати функціонувати. Існують активні датчики ABS із різним принципом дії. Прийнято розрізняти датчики Холла та магніторезистивні датчики.

Датчики Холла відрізняються високою точністю, вимагають точного вибору місця розміщення, а також є чутливими до забруднення. Для магніторезистивних датчиків місце розташування не має значення. Вони забезпечують надійну передачу сигналу навіть у разі встановлення на досить великій відстані від диску.

Принцип вимірювання ґрунтується на так званому ефекті Холла. Безконтактне виявлення магнітних полів. Чутливий

елемент датчика називається ІС Холла. Цей елемент вбудований у датчик. Постійний магніт формує магнітне поле поза ІС Холла.

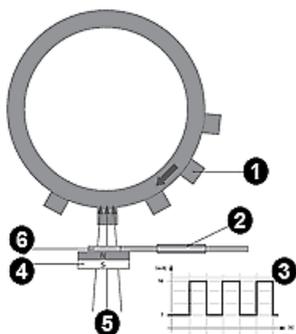


Рисунок 12.30 – Датчик Холла:

1 – зубчасте колесо; 2 – з'єднувач; 3 – вихідний сигнал; 4 – постійний магніт; 5 – магнітне поле; 6 – ІС Холла [97].

Магнітне поле проходить через ІС Холла та зубчасте колесо. Коли зубчасте колесо обертається, магнітне поле змінюється. ІС вимірює зміну поля та бере до уваги зміну прямокутного сигналу. Сигнал залежить від швидкості. Завдяки цьому забезпечується високонадійне виявлення сигналу на швидкостях до 0 км/год.

12.7.3 Датчик Віганда

Датчик Віганда (рис. 12.31) використовується для визначення частоти обертання робочого механізму [1, 7, 18, 29, 58, 80]. Принцип дії датчика заснований на ефекті Віганда, відкритому американським дослідником Д.Р. Вігандом у 1975 р. Цей ефект проявляється в наступному: якщо феромагнітний дріт, що має спеціальний хімічний склад і фізичну структуру, внести в магнітне поле, то при перевищенні певного значення магнітної індукції B напрямок намагнічування дроту спонтанно зміниться. Цей поріг називається *порогом запалювання*. Зміну стану дроту можна реєструвати за допомогою обмотки, намотаної навколо дроту або розміщеної поряд з ним (рис. 2.31).

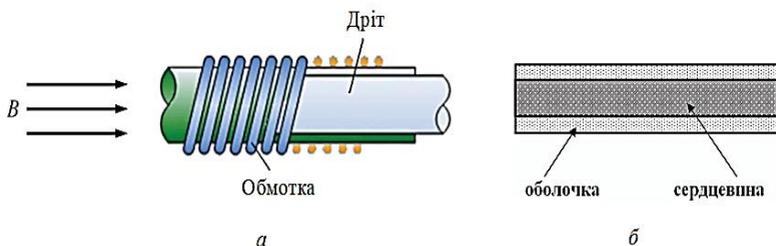


Рисунок 12.31 – Датчик Віганда (чутливий елемент) (а) та структура самого дроту Віганда (б)

Дріт Віганда є феромагнітним тілом, що складається з магнітом'якої серцевини і магнітотвердої зовнішньої оболонки, що оточує цю серцевину. Отримання такої структури досягається за рахунок використання спеціальної технології виготовлення. Нагадаємо, що магнітом'які матеріали – це матеріали з великою магнітною проникністю і малою коерцитивною силою, що швидко намагнічуються і швидко втрачають магнітні властивості при знятті магнітного поля. Основний магнітом'який матеріал – чисте залізо та його сплави з нікелем та кобальтом. Нагадаємо, що коерцитивною силою називають значення напруженості магнітного поля, необхідне повного розмагнічування феромагнітного речовини, а магнітотверді матеріали (постійні магніти) – матеріали з малою магнітною проникністю та великою коерцитивною силою. Після намагнічування магнітотверді матеріали залишаються постійними магнітами через високі значення коерцитивної сили та магнітної індукції. Такі магнітні властивості мають магніти зі сплавів рідкоземельних металів (церій, самарій, празеодим, неодим, ніобій) з кобальтом, барієві та стронцієві магнітотверді ферити тощо. Діаметр дроту Віганда становить близько 0,2...0,3 мм, довжина - від 5 мм до 40 мм. Обмотка датчика зазвичай має 1000...1500 витків мідного дроту діаметром 0,05...0,1 мм та розміщується на котушці довжиною приблизно 15 мм.

Магнітотверда частина дроту, що застосовується в датчику Віганда, що виготовлена з феромагнітного сплаву сплав вікалой – Fe-Co-V (52...54% кобальту, до 14% ванадію, решта – залізо).

Зазначимо, що зазвичай цей сплав використовується головним чином для виготовлення постійних магнітів, що застосовуються у вимірювальних приладах, електричних мікродвигунах тощо). Точний склад матеріалу дроту фірмою не розголошується. Повна схема найпростішого датчика Віганда наведена на рис. 12.32, *а*. Рисунок ілюструє зміну магнітної індукції B при наближенні магніту до дроту (висхідна гілка графіка) та віддаленні від неї (низхідна гілка). Ефект Віганда спостерігається як при підвищенні індукції ($+B_3$), так само і при зниженні ($-B_3$), що викликає появу в котушці позитивного та негативного імпульсів $U_{\text{вих}}$ відповідно (рис. 12.32, *б*). При переміщенні магніту ЕРС, що виникає в результаті досягнення магнітною індукцією B порогових значень, становить кілька (2...5) В і має тривалість порядку 20 мкс.

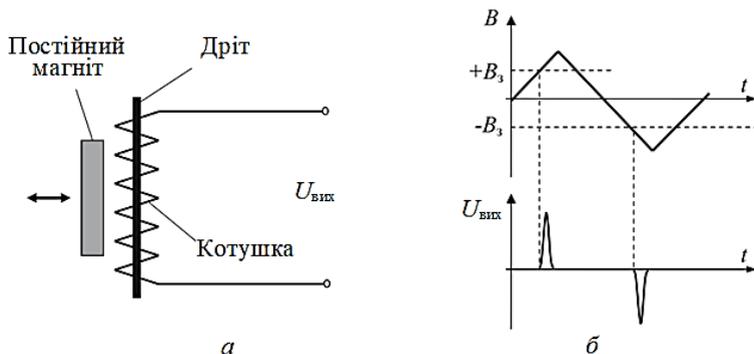


Рисунок 12.32 – Повна схема датчика Віганда (*а*) та ілюстрація його роботи (*б*)

Датчики Віганда мають низку цінних якостей, які відсутні в інших датчиках магнітного типу: вони не вимагають зовнішнього джерела живлення, можуть бути використані в широкому діапазоні робочих температур (від -196°C до $+175^{\circ}\text{C}$), їх вихідний сигнал практично не залежить від частоти зміни поля. Вони конструктивно дуже прості, мають відносно велику амплітуду вихідного сигналу, значення якої не залежить від швидкості зміни магнітної індукції (переміщення магніту), а отже можуть

застосовуватися навіть при швидкостях, близьких до нульового значення.

При обертанні робочого механізму (на рис. 12.33, *a* не показаний) пов'язаний з ним магнітний комутатор 4 змінює своє положення. Через те магнітні потоки від постійних магнітів 1, або 2 замикаються крізь сигнальну обмотку та магнітопровід 3. В результаті в сигнальній обмотці N_c індукується знакозмінний сигнал e_c . По кількості імпульсів e_c (позитивних), або по середньому значенню вихідної ЕРС можна судити про частоту обертання робочого механізму.

Такі датчики мають певні переваги, тобто вони не потребують стороннє джерело живлення, мають достатньо великий вихідний сигнал (до 5 В, тривалістю від 15 мкс до 50 мкс), іскробезпеку, крім того амплітуда і тривалість імпульсів не залежать від швидкості зміни магнітного поля, що дозволяє використовувати датчики при швидкостях, близьких до нуля.

Монтування вздовж вимірюваної поверхні великої кількості дротів Віганда (наприклад, по колу контрольованої циліндричної поверхні; рис. 12.34, *б*) дозволяє вимірювати частоту обертання об'єкта (деталі) з досить високою роздільною здатністю (до 1...2 мм), що визначається діаметром дротів .

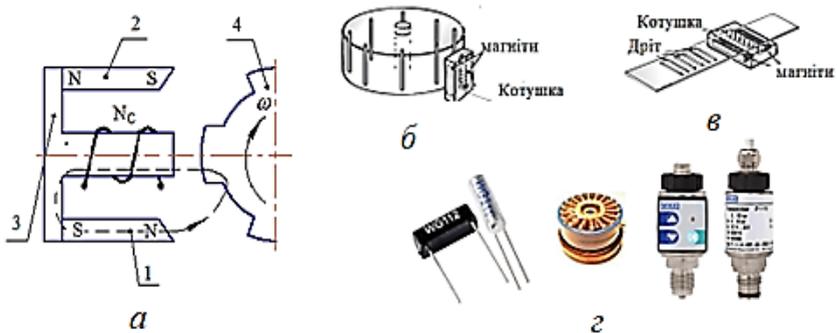


Рисунок 12.33 –Конструкції промислових датчиків Віганда [51, 97]

Отже, датчики Віганда використовуються, як індикатори наявності або відсутності магнітного поля.

12.8 Особливості конструктивно-технологічних характеристик електромагнітних датчиків

При розробці електромагнітних датчиків важливе значення набувають питання вибору матеріалів і комплектуючих деталей. У розглянутих системах датчиків основними елементами є магнітопроводи, дроти намотування і підшипники. Тому рекомендується впроваджувати такі технічні та технологічні рішення.

1) Магнітопроводи рекомендується виготовляти з високонікелевих матеріалів (пермалої та сендасти), які мають найбільші значення магнітної проникності в слабких полях і стійкість до корозії. Крім того, з технологічної точки зору, їх легко обробляти на верстатах металорізання (таблиця 12.1). Недолік пермалою – це чутливість його магнітних властивостей до механічних напружень під час механічної обробки. Але ж її можна знизити високотемпературним обпалюванням у вакуумі, або водні. Зі всіх груп пермалою найбільш придатні для використання в електромагнітних датчиках групи 1, 2 і 6.

Таблиця 12.1 – Якісні порівняльні характеристики пермалою [51]

Група	Марка сплаву	Основні властивості
1	79 НМ, 8 НСХ, 81 НМА, 83 НФ	Найвища магнітна проникність в слабких полях
2	50 НХС	Висока магнітна проникність і питомий електричний опір
3	50 НП, 68 НМП, 34 НКМП	Прямокутна петля гістерезису
4	27 КХ, 47 ХФ, 49 К2Ф, 49 К2ФА	Висока магнітна індукція технічного насичення
5	47 НК, 47 НКХ, 64 Н, 40 НКМ	Низька залишкова магнітна індукція і постійність магнітної проникності
6	16 Х, 36 КНМ	Висока корозійна стійкість

2) Використовувати обмотувальні дроти (крім спеціальних і дрогох зі срібла та золота) з міді, що мають невеликий опір і

велику еластичність (відносне подовження до розриву – 15%) у порівнянні з алюмінієм (відносне подовження до розриву – 5%), та діапазон робочих температур від – 60 °С до +150 °С. Наприклад, дроти марки ПЕВ-1 і ПНЕТ-ІМІд.

3) Оскільки на підшипники діють як радіальні так і осьові навантаження, а прогин валу під дією цих навантажень малий, і не викликає кутового зсуву осі валу відносно осі посадочного отвору, тому треба обирати радіальні однорядні шарикопідшипники, або на електромагнітні підвіси. Вони мають найменші втрати через тертя, і забезпечують найбільшу точність та частоту обертання. Підшипники повинні мати внутрішній діаметр в межах 3...5 мм, радіальне биття – в межах 5...7 мкм; довготривалість роботи – не менше, ніж 10⁷ обертів; діапазон температури експлуатації від – 60 °С до +150 °С, а також вологостійкість. Магнітні, або електромагнітні підвіси використовуються для розвантаження вузлів тертя, в тому числі підшипників.

12.9 Контрольні питання та задачі

12.9.1. Датчики контролю та регулювання. Призначення. Класифікація.

12.9.2. Контактні датчики. Переваги та недоліки.

12.9.3. Потенціометричні датчики. Чутливість. Електрична розрізнявальна здатність потенціометра. Спеціальні види потенціометрів.

12.9.4. Омичні тензодатчики. Переваги фольгових перед дротяними. Тензочутливість. Компенсація температурної похибки. Ненаклеювані тензодатчики.

12.9.5. Принцип роботи п'єзореzonансних датчиків тиску.

12.9.6. Принцип роботи датчиків тиску.

12.9.7. Термоелектричні датчики.

12.9.8. Термопари. Основні схеми вмикання. Термопари з благородних і не благородних металів. Термогенератори. Автоматична корекція температурних похибок.

12.9.9. Індуктивні датчики. Принцип дії. Математичні співвідношення, з яких витікають ідеї побудови цих датчиків.

12.9.10. Індуктивні датчики зі змінними зазором та площею.
Схеми вмикання.

12.9.11. Трансформаторні датчики. Принцип дії.

12.9.12. Ємнісні датчики. Три їх види.

12.9.13. Активні датчики. Принцип дії. Тахогенератори постійного та змінного струму.

12.9.14. Датчик кутового прискорення.

12.9.15. Датчик Віганда.

12.9.16. Особливості конструктивно-технологічних характеристик електромагнітних датчиків.

12.9.17. Призначення, функції, склад приладів для контролю силових установок.

12.9.18. **Задача 1.** Розрахувати реостатний датчик переміщення і накреслити його ескіз при таких вихідних даних: довжина намотки по каркасі $L = 40$ мм, нижня межа температури корпусу $\Theta = -20$ °С, максимальна температура навколишнього середовища $\Theta_{\max} = 40$ °С, опір обмотки $R = 800$ Ом, струм обмотки $I = 0,01$ А, матеріал обмотки - ніхром Х15Н60.

12.9.19. **Задача 2.** За допомогою термопар визначити температуру вимірювального середовища, якщо відомі: напруга на клеммах мілівольметра U_M , опір мілівольметра R_M , подовжувальний провід R_{Π} і термопар $R_{ТП}$, $E_{ТАБЛ}$ – величина термо-е.р.с. для визначеної термопар (приводиться в довідкових таблицях).

13 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І МАГНІТНІ МУФТИ

Електромагнітні і магнітні муфти – це вузли механізмів обертання, в яких безпосередньо сам обертальний момент передається за допомогою електромагнітних або магнітних сил [7, 16, 34, 36, 38, 56, 57, 76, 93]. Ці пристрої призначені для дистанційного зчеплення, розчіплювання, перемикавання, реверсування кінематичних кіл, а також як гальма, або обмежувача передавального моменту сили. Крім того, індукційні електромагнітні муфти (ІЕММ) зі змінним ковзанням дозволяють регулювати частоту обертання валу, який ведеться за головним (ведучим), згладжувати поштовхи і високочастотні крутильні коливання.

Електромагнітні та магнітні муфти розрізняють за:

- 1) принципом виконання:
 - електромеханічні (порошкові);
 - магнітні (фрикційні, індукційні, гістерезисні тощо).
- 2) функціями, що виконуються:
 - запобіжні;
 - демпферні (нім. Dampfer – глушитель, зокрема механічних коливань);
 - спеціальні;
- 3) передачею руху:
 - зчеплення;
 - розчіплювання;
 - перемикавання;
 - гальмування;
- 4) режимом роботи:
 - релейний (без прослизання ведучого і того, який ведеться, елементів);
 - ковзання;
- 5) зв'язком ведучого і того, який ведеться, елементів:
 - жорсткий;
 - м'який;
- 6) родом збудження:
 - електромагнітні уніполярні (однополярні, в яких осі електромагнітної муфти і обмотки збудження збігаються);

– багатополосні (осі електромагнітної муфти і обмотки є паралельними, перпендикулярними, або тангенціальні).

13.1 Фрикційні електромагнітні муфти

У фрикційних електромагнітних муфтах (ФЕММ) дві, або декілька поверхонь тертя дотикаються одне одну, і стискаються силою, яка створюється електромагнітом (рис. 13.1).

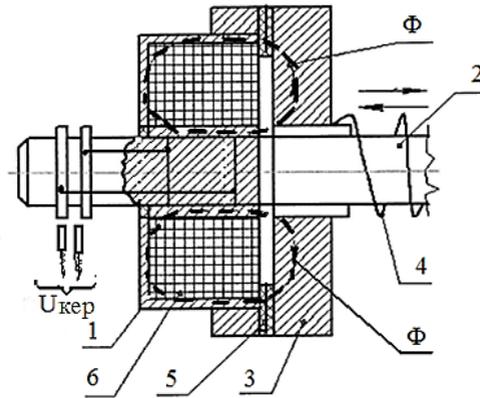


Рисунок 13.1 – Конструкція фрикційної електромагнітної муфти [36, 51]

При необхідності включення муфти на її провідну частину (1) – обмотку збудження (6) подається напруга керування $U_{кер}$, через що створюється магнітний потік Φ , який замикається крізь фрикційне кільце (5). В результаті між головною частиною і частиною магнітопроводу (3), яка є рухомою відносно ведомого вала (2), виникає електромагнітне зусилля. Як видно на рис. 13.1 муфта діє за рахунок моменту тертя $M_{ТР}$. На рис. 13.2 зображені елемент тертя з позначеннями: $R_{ВТ}$ – внутрішній та $R_{ЗШ}$ – зовнішній радіуси кільцевого елемента тертя.

Візьмемо елементарний кільцевий елемент тертя з середнім радіусом R і шириною dR . Тоді збільшення зусилля тертя:

$$dF_{ТР} = K_{ТР} \cdot P_{ПТ} \cdot dS_T, \quad (13.1)$$

де K_{TP} – коефіцієнт тертя між робочими поверхнями;
 $P_{ПТ}$ – питомий тиск між ними:

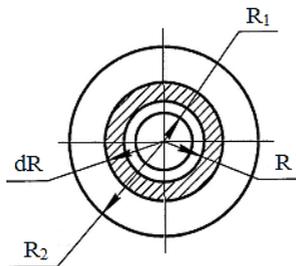


Рисунок 13.2 – Елемент тертя кільцевий. Схема принципова [51]

$$P_{ПТ} = \frac{P_K}{S_T}, \quad (13.2)$$

де P_K – кінцеве зусилля, коли струм в обмотці керування досягає номінального;

dS_T – площа елементарного кільцевого елемента тертя:

$$dS_T = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot dR, \quad (13.3)$$

тоді:

$$dF_{TP} = 2 \pi \cdot K_{TP} \cdot P_{ПТ} \cdot R \cdot dR. \quad (13.4)$$

Приріст моменту тертя визначатиметься як співвідношення:

$$dM_{TP} = dF_{TP} \cdot R = 2 \pi \cdot K_{TP} \cdot P_{ПТ} \cdot R^2 \cdot dR. \quad (13.5)$$

Звідси момент тертя визначатиметься формулою:

$$M_{TP} = \int_{R_{BT}}^{R_{ЗШ}} dM_{TP} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot K_{TP} \cdot P_{ПТ} \cdot R_{ЗШ}^3 \cdot (1 - \beta^3) \quad (3.6)$$

$$\text{де } \beta = \frac{R_{BT}}{R_{ЗШ}}.$$

Для нормальної роботи момент M_{Tr} має бути більше моменту навантаження M_B веденої осі (який узгоджений із віссю муфти), тобто, більше протидіючого моменту. Поверхні тертя виконуються як дві, або декілька дисків, або конічними. Так звані конусні муфти, у порівнянні з дисковими, відрізняються меншими габаритами при передаванні однакових моментів, меншою силою стискування, більшою надійністю зчеплення при меншому зношуванні поверхонь, які труться, але мають значні вимоги до точності виготовлення.

Диски тертя виготовляються зі сталі, чавуну, або бронзи з питомою силою стискування $P_{ПТ} = 0,4 \dots 0,6$ МПа, або металокераміки (найбільш досконалі) – з $P_{ПТ} = 0,8 \dots 1,0$ МПа, та робочою температурою – до 200°C . Час включення $t_{вкл}$ лежить в межах від 0,07 с до 0,3 с, залежить від габаритів муфти, постійної часу електромагніту, ходу якоря, або кількості дисків.

Електромагнітні фрикційні багатодискові муфти найчастіше встановлюється на верстатах із блоком числового програмного керування. До переваг віднесено наступні моменти:

- компактність, за рахунок чого можна проводити встановлення електромагнітної муфти в сучасні пристрої, розміри яких з кожним роком суттєво зменшуються, за рахунок чого також розширюється сфера застосування;

- надійність, якої можна досягти завдяки застосуванню спеціальних матеріалів та контролю якості на всіх етапах виробництва, що дозволяє досягти найвищого показника надійності;

- малогабаритність визначає легкість у транспортуванні та багато інших позитивних параметрів.

Цей варіант виконання муфт характеризується досить високими експлуатаційними характеристиками, за рахунок чого він набув широкого поширення. Основними частинами конструкції можна назвати:

- корпус, який в більшості випадків виготовляється при застосуванні сталі, що характеризується підвищеною стійкістю до

довкілля (призначення корпусу полягає у захисті внутрішніх елементів);

- котушка, призначена для безпосереднього створення електромагнітного поля, за рахунок якого відбувається зміщення основних елементів (розрахована на вплив певного електричного струму, занадто висока напруга має негативний вплив);

- група дисків фрикційного типу при виготовленні пакету яких застосовується спеціальний сплав, що характеризується певними магнітними властивостями;

- поводок та натискний диск;

- на корпусі є насаджене кільце, яке виготовляється з ізоляційного матеріалу;

- струм подається за допомогою контактної щітки, саме вона в більшості випадків виходить з ладу на момент експлуатації механізму.

Виключити можливість виникнення короткого замикання можна за допомогою вирізаних отворів у дисках. На момент подачі електричного струму створюється електромагнітне поле, яке замикається за дією фрикційного диску. Саме через це створюється сила, що притягує, за якою відбувається зміщення основної частини. Зустрічається кілька варіантів виконання таких конструкцій. Прикладом можна назвати пристрій з винесеним та магнітопровідним диском.



Рисунок 13.3 – Електромагнітні фрикційні багатодискові муфти [43]

13.2 Індукційні муфти

Індукційні електромагнітні муфти (ІЕММ), або муфти ковзання – являють собою індуктор з обмоткою збудження (3) постійного струму та якір (2), не пов’язані між собою механічно (рис. 13.4). Принцип їх роботи нагадує роботу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, та відрізняється тим, що магнітне поле, яке в них обертається, утворюється індуктором на головному валу (6) після подачі напруги керування $U_{кер}$ на струмоз’ємний механізм (5). Обмотки збудження (3) з полюсами (4) знаходяться всередині магнітопроводу індуктора (1).

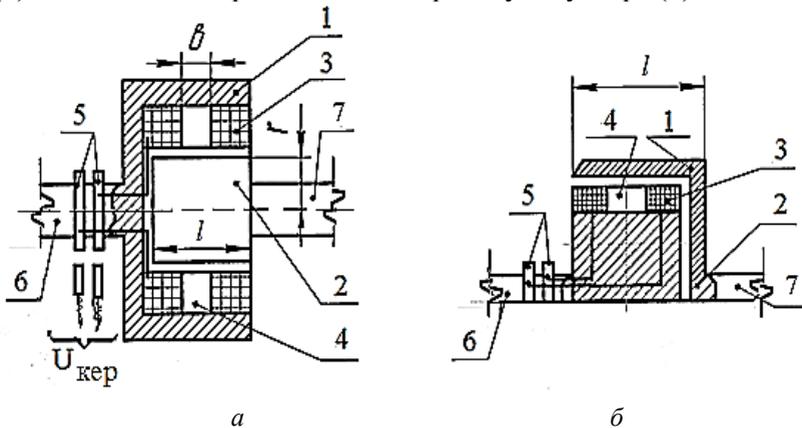


Рисунок 13.4 – Конструкції індукційних муфт з внутрішнім (а) та зовнішнім (б) якорями [51]

Якір (2) виконується або короткозамкненим (так звана «біляча клітка»), або у формі масивного феромагнітного ротора. Якщо якір є масивним, то момент обертання муфти утворюється за рахунок вихрових струмів якоря. Момент передається на вал, що ведеться (7). На рис. 13.5 наведено механічну характеристику ІЕММ з масивним ротором. Якщо регулювати струм збудження $I_{зб}$ ($I_{зб1} \dots I_{зб4}$) і, відповідно, магнітний потік Φ , можна плавно і в широкому діапазоні регулювати частоту обертання ω_2 відомого валу, а також момент M , який передається муфтою. Чим більше $I_{зб}$, тим більше магнітний потік Φ , і тим крутіше, механічна характеристика, як

видно на рис. 13.5, за умови $I_{ЗБ4} > I_{ЗБ3} > I_{ЗБ2} > I_{ЗБ1}$ і роботи муфти в сталому режимі.

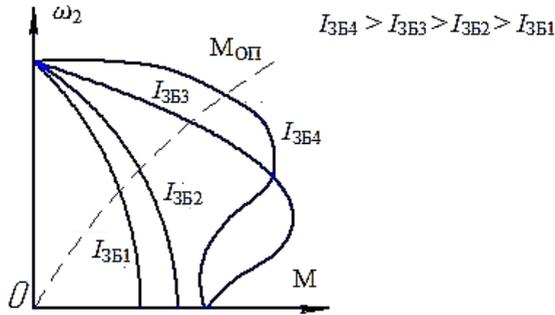


Рисунок 13.5 – Механічна характеристика ІЕММ [51]

Якщо під час роботи муфти змінюються частота обертання ω_2 та момент опору $M_{оп}$ головного валу (тобто протидіючий момент змінюється), частота обертання відомої частині муфти і момент опору також можуть бути нестабільними. Для стабілізації частоти, зазвичай, вводять спеціальні пристрої регулювання.

Якщо індуктор рухається відносно провідної поверхні масивного ротора, в ній буде наводитися ЕРС:

$$e = - \cdot B \cdot l \cdot V ,$$

де l – геометричний розмір (див. рис. 13.4, а);

B – індукція матеріалу муфти;

V – швидкість ковзання.

Ця ЕРС наводить струм значенням $i = e / R$, де R – опір контуру протікання струму, який визначається геометричними розмірами (товщиною полюсів), глибиною проникнення магнітного потоку в тіло масивного ротора та коефіцієнтом збільшення опору за рахунок часті поверхні.

Електромагнітне зусилля F_{EM} , що впливає на ведену поверхню якоря:

$$F_{EM} = B \cdot l . \quad (13.7)$$

Тоді електромагнітний момент визначатиметься як:

$$M_{EM} = F_{EM} \cdot r , \quad (13.8)$$

де r – середній радіус муфти.

Потужність, що передається муфтою дорівнює:

$$P_2 = M_{EM} \cdot \omega_2 . \quad (13.9)$$

де ω_2 – частота обертання частини муфти, що ведеться.

Якщо $M_{EM} \approx M_{ОП}$, тоді $P_2 = M_{EM} \cdot \omega_2 \approx M_c \cdot \omega_2$, і, відповідно, потужність втрат визначатиметься $\Delta P = M_{ОП} \cdot \omega$, ($\omega = \omega_1 - \omega_2$ – частота ковзання однієї частини муфти відносно іншої).

Електромагнітні процеси з якорем типу «біляча клітка» протікають таким самим чином (або подібно), як і в асинхронних двигунах. Коефіцієнт ковзання ПЕММ складає 1...3%. Коефіцієнт корисної дії (ККД) муфт з масивним якорем досягає до 0,94, муфт з короткозамкненим якорем досягає до 0,96...0,98.

Індукційні електромагнітні муфти у порівнянні з фрикційними не мають зношенню поверхонь, мають гнучкий зв'язок, і через відсутність механічного контакту допускають значні перевантаження. Для вашого уявлення принципу роботи електромагнітних муфт можна відео подивитись за посиланням <https://www.youtube.com/watch?v=6weEOoCYyQw>.

13.3 Електростатичні (порошкові) муфти

Порошкові електростатичні муфти з магнітним зв'язком (ПЕММ) по своїй сутності є конденсаторами з рухомими обкладинками, які виконують функцію силового елемента (рис. 13.6). Одна обкладинка є головною (ведучою), друга – веденою (такою, що ведеться). Простір між обкладинками наповнюється напіврідким суміщу, що складається з твердої

основи (окис магнію, гіпс, желатин, тощо) і рідкого компоненту (трансформаторне чи кремнійорганічне масло, керосин, тощо) [34, 35, 36]. Якщо до пластин такого конденсатора прикласти напругу U , то між ними утворюється ланцюжки із зерен твердого компоненту (так званий «нежорсткий механічний зв'язок»). Між пластинами виникає електростатичне зусилля:

$$F_{EC1} = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{dC}{d\delta}, \quad (13.10)$$

де F_{EC1} – електростатичне зусилля;

U – напруга між пластинами;

C – ємність муфти;

δ – відстань між обкладинками (пластинами).

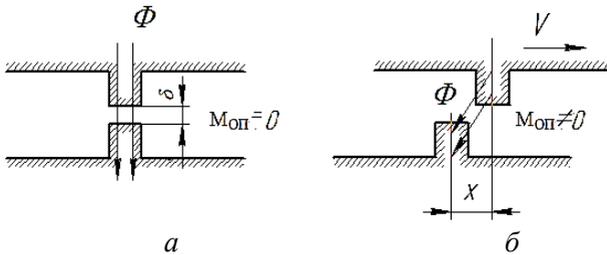


Рисунок 13.6 – Принцип дії електростатичної муфти при $M_{OT} = 0$ (а) та при $M_{OT} \neq 0$ (б) [51]

Електростатичне зусилля F_{E3} , що передається, рівне:

$$F_{EC} = \mu_x \cdot F_{EC1}, \quad (13.11)$$

де μ_x – коефіцієнт в'язкості наповнювача, залежний від складу і концентрації компоненту.

Тоді електростатичний момент M_{CT} , що передається, дорівнює:

$$M_{CT} = F_{EC} \cdot r, \quad (13.12)$$

де r – середній еквівалентний радіус муфти.

На рис. 13.7 показана механічна характеристика електростатичної муфти, з якої видно, що $M_{СТ}$ не залежить від частоти обертання, але змінюється зі зміною струму ($I_{ЗБ3} > I_{ЗБ2} > I_{ЗБ1}$) збудження. Можна сказати, що вона має жорстку механічну характеристику, тобто момент, що передається, не змінюється від тертя ковзання при незмінному струмі керування. На порошокві муфти в порівнянні з фрикційними та індукційними витрачається менша потужність (при однакових моментах, що передаються). Вони мають значну швидкодією, безшумні, прості в керуванні, а також майже відсутнє зношення поверхонь.

Але ж електростатичної муфти мають і певні недоліки, до яких можна віднести таке: пусковий момент муфти дорівнює нулю, а тому для запуску - її необхідно розганяти до швидкості, близькою до синхронної; ущільнення наповнювача під дією центробіжних сил, або за рахунок його осідання (злежування) в непрацюючій муфті, а тому – це є незворотні зміни його фізико-хімічних властивостей, тобто старіння.

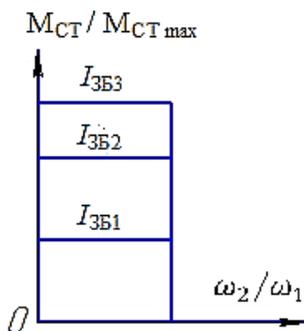


Рисунок 13.7 – Механічна характеристика [51]

Ці муфти використовують при автоматичному керуванні задля: плавного регулювання моменту, що передається, або частоти обертання (наприклад, у стрічко протяжних механізмах); плавного зчеплення або розчеплювання; обмеження моменту, що

передається; реверсу веденого валу, при незмінному напрямі обертання приводного електродвигуна при здійсненні безударного регульованого в часі пуску; а також для виконання функції електромагнітного підсилювача потужності (при двотактному включенні муфти коефіцієнт посилення потужності може досягти 3500), або електромагнітного гальма.

13.4 Контрольні питання

13.4.1. Електромагнітні муфти. Призначення. Класифікація.

13.4.2. Фрикційні електромагнітні муфти. Визначення моменту тертя.

13.4.3. Індукційні муфти (муфти ковзання). Конструкція. Характеристика. Потужність, що передається муфтою.

13.4.4. Електростатичні муфти (порошкові). Конструкція. Визначення електростатичного моменту. Характеристика. Приклад застосування.

14 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І МАГНІТНІ ПІДВІСИ ТА ОПОРИ

В апаратобудуванні через збільшення швидкості обертання та підвищення вимог до точності пристроїв виникає актуальна задача щодо зменшення тертя опорних вузлів та підвісів, яке за умови малих зусиль (близько $0,1 \dots 0,5$ Н) сприяє виникненню великих похибок і впливає на якість роботи датчиків, реле, тощо. Крім того, також задля зменшення тертя, зношення і т. і. електромагнітні та магнітні підвіси застосовуються в інших областях техніки, наприклад, на залізничному транспорті [7, 38, 41, 51, 56, 80].

У підвісах вага тіла, яке є підвішеним, а також сили, які діють на нього, врівноважуються силами магнітного, або електричного поля, які в електротехніці називаються *пондеромоторними*. Тут використовується явище *левітації*, тобто «вільне ширяння» тіла в нейтральній рівновазі відносно інших тіл. Цей принцип використовується при розробці приладів для виміру сили, тиску, витрат, щільності, тощо. Головною проблемою при цьому є забезпечення їх стійкості.

Відомо, що метали підрозділяються на феромагнетики, що володіють сильно вираженими магнітними властивостями; парамагнетики, в яких магнітні властивості виражені слабо; діамагнетики, в яких виникає намагніченість, що направлена назустріч полю, яке намагнічує, а це в свою чергу – до відштовхування виключно діамагнітних тіл від полюсів магніту. Треба зауважити, що діамагнетизм притаманний всім без виключення речовинам, але він може перекиватися феромагнетизмом і парамагнетизмом. Стійкими підвісами можуть бути лише з діамагнетиками. Найкращими з них є вісмут (Ві) і піролітичний графіт, а також надпровідники, в яких $\mu = 0$, тобто в надпровідниках магнітне поле зменшується до нуля, і таким чином утворює на своїй поверхні нібито екран, через який не проникає магнітне поле. Проте, стійкі підвіси можна створити і при $\mu > 1$ в змінних магнітних полях, якщо керувати силою тяжіння (відштовхування) електромагніту залежно від положення тіла, тобто з використанням систем автоматичного регулювання та датчиків.

14.1 Коротка класифікація існуючих підвісів

Простішими магнітними підвісами є підвіси на постійних магнітах. Вони підрозділяються на системи «магніт-магніт» і «магніт-ферромагнетик». Для забезпечення стійкості їх застосовують разом з опорами регульованого типу, або з частковим розвантаженням. На рис. 14.1 наведена коротка класифікація підвісів.

Електромагнітні підвіси з нерегульованими магнітами мають велику перевантажувальну здатність у порівнянні з постійними магнітами. Діамагнітні підвіси мають малу піднімальну силу, навіть при використанні кращого діамагнетика – піролітичного графіту. Надпровідні (криогенні) підвіси працюють з надпровідниками з використанням низьких температур. Індукційні опори мають невелику вантажопідйомність і значні збуджуючі моменти, які і створюють нестійкість. Кондукційні підвіси – стійкі магнітні підвіси, які використовують електродинамічну взаємодію (магнітні поля і провідники зі струмом, або два провідника зі струмом). Мають доволі прості конструкції. Проте, необхідність збудження струмів безпосередньо на зваженому тілі є певним недоліком.

У регульованих електромагнітних підвісах використовується явище ферорезонансу напруги чи струмів в послідовному, або паралельному $L-C$ контурі. Застосування мікроелектронної техніки для зворотного зв'язку в цих системах дозволяє розробити електромагнітні підвіси з кращими характеристиками. Активними є такі підвіси, які використовуються при авторегулюванні (зовнішня САР та датчики). Якщо, регулювання струму в підвісах є функцією окремих параметрів схеми від переміщення центрованого елемента, тоді підвіси називаються пасивними.

14.2 Індукційні електромагнітні підвіси та опори

На рис. 14.2 показана система з двох коаксіальних (1 і 2), але ж не компланарних витків, крізь які протікають синусоїдальні струми, що рівні за амплітудою та протилежні по фазі.

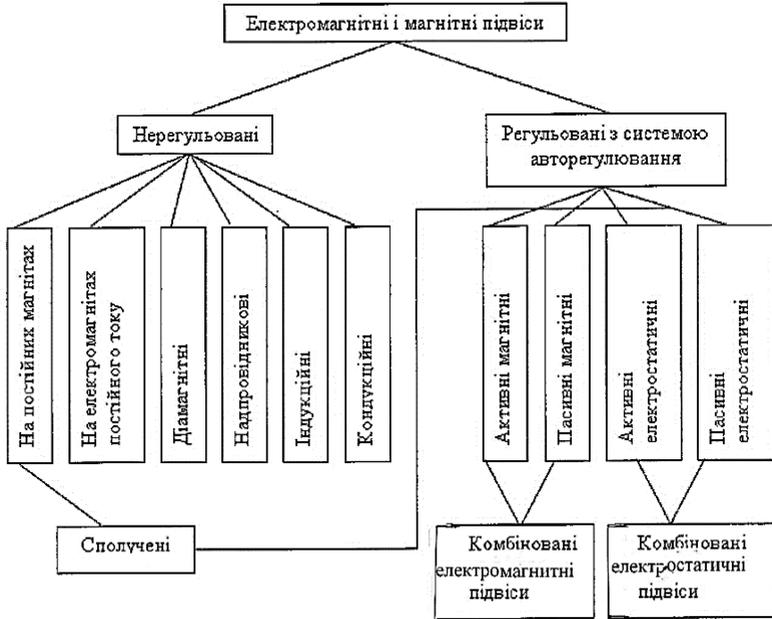


Рисунок 14.1 – Коротка класифікація підвісів [41, 51]

Як видно, сепаратриси і графіки розподілу складових магнітної індукції та електродинамічної сили, відповідно, по осях y і x індукційної системи.

Припустимо, що невагоме неферромагнітне електропровідне тіло 3 знаходиться між точками Б і Б' на осі x , або точками Г і Г' на осі y . Тоді на тіло діятиме електродинамічна сила ($F_{ЕДx}$ чи $F_{ЕДy}$), яка буде прагнути повернути його в точку А, де магнітна індукція дорівнює нулю. Тому точка А для невагомому тіла є точкою стійкої рівноваги. Точки Б, Б', Г і Г' є точками нестійкої рівноваги, хоча електродинамічна сила $F_{ЕД}$ дорівнює в них нулю. В реальних умовах на тіло 3 діє сила ваги. Розташуємо тіло 3 в точку А, а оскільки в ній $F_{ЕДy} = 0$, то тіло спускатиметься в точці Д. Тут виникає два варіанти: або на ділянці А-Д (рис. 14.2, б) зростаюча

сила F_{EDy} врівноважить силу ваги (тоді настане – левітація), або тіло «проскочить» точку Γ' і падатиме далі.

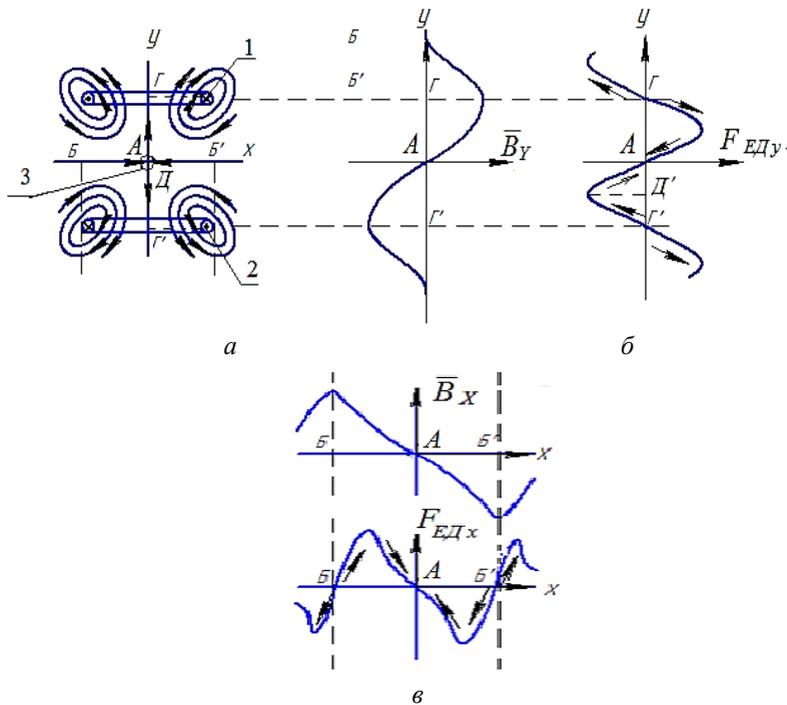


Рисунок 14.2 – Система з витків електромагнітних опор [51]

Розглянемо індукційний підвіс зі стійкою рівновагою вздовж вертикальної осі (рис. 14.3). Пристрій має в складі магнітопровід 1, обмотку змінного струму 3 і електропровідний неферомагнітний диск 2 (короткозамкнений виток), а також центральний стрижень магнітопроводу 4. При протіканні струму по обмотці на диск діє електродинамічна сила, направлена у бік зниження потокозчеплення обмотки з диском, тобто вгору. Через те диск піднімається. Така система економічна, оскільки в ній реалізується властивості електромагнітного зв'язку джерела поля та електропровідного тіла, завдяки магнітопроводу. Але тут не реалізується левітація (ширання), оскільки стійка рівновага диска

можлива лише у вертикальній площині (осі), а вздовж горизонталі вона обмежується центральним стрижнем магнітопроводу.

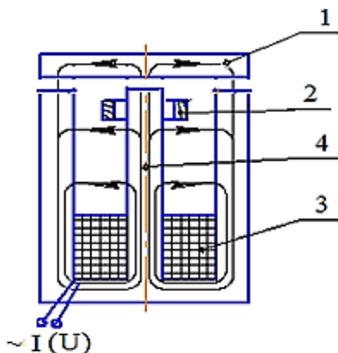


Рисунок 14.3 – Індукційний підвіс по вертикальній осі зі стійкою рівновагою

Одновісний резонансний підвіс (рис. 14.4, а) – це система, в якій тіло, що є підвішеним. У одновісній резонансній системі підвісу, підвішене тіло центрується за допомогою регулювання струму в підтримуючих магнітах.

Якщо знехтувати потоками випинання та розсіяння та втратами потужності в магнітопроводі, а також вважати, що всі магнітні опори є зосередженими в повітряному зазорі (магнітне коло насичене), отримаємо:

$$\begin{cases} i_1 = i_0 (1 + K_1 X) \\ i_1 = i_0 (1 + K_1 X) \end{cases} ; \quad \begin{cases} \Phi_1 = \Phi_0 (1 + K_2 X) \\ \Phi_1 = \Phi_0 (1 + K_2 X) \end{cases} ; \quad (14.1)$$

де i_0 і Φ_0 – відповідно струм і потік магнітної системи за відсутності зсуву тіла, що центрується;

$X = \Delta x / \delta_0$ – відносне відхилення тіла, що центрується;

Δx – абсолютний лінійний зсув тіла, що центрується;

δ_0 – половина розміру початкового повітряного зазору;

K_1 і K_2 – коефіцієнти посилення струму та потоку.

Необхідною умовою стійкості є значення коефіцієнтів $K_1 > 1$ і $K_2 > 0$, що забезпечується пасивними, або активними методами, тобто законами регулювання струмів в обмотках. Пасивні підвіси діють лише на змінному струмі, і називаються магніторезонансними та електромагнітними підвісами з внутрішнім (параметричним) зворотним зв'язком. Це забезпечується налагодженням параметрів схеми при резонансних режимах, тобто через те, що в цьому випадку виникає більша залежність струму від параметрів схеми. Використовується резонанс струмів і напруги.

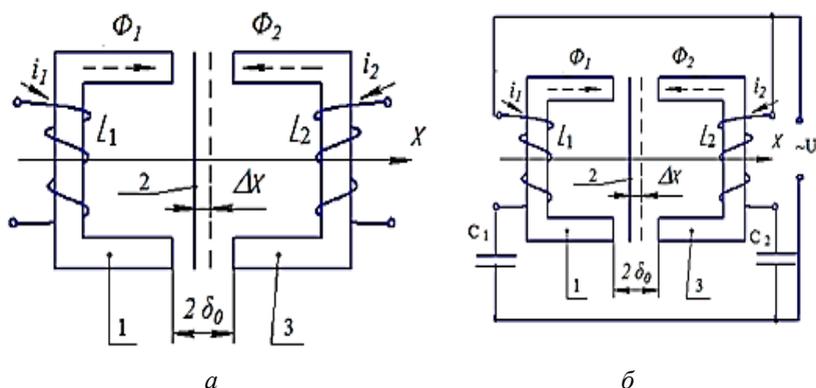


Рисунок 14.4 – Схема одновісного резонансного підвісу (а) та магніторезонансного підвісу з LC - контуром (б)

На рис. 14.4 до обмоток L_1 і L_2 двох електромагнітів 1 та 3 підключаються конденсатори настроювання C_1 і C_2 , чим забезпечують роботу на необхідному відрізку резонансної характеристики. Принцип роботи такої схеми заснований на зміні індуктивностей L_1 і L_2 обмоток при зсуві центрованого тіла 2. У техніці також використовують двовісні та тривісні магніторезонансні підвіси, які відрізняються від одновісних – лише кількістю електричних контурів.

14.3 Магнітоферорідинні опори

У магнітоферорідинних опорах між двома поверхнями вводиться ферорідина (колоїдний розчин феромагнетиків) для магнітного ущільнення валу (рис. 14.5).

Ферорідина 1 в зазорі між зубчастими поверхнями кільцевих феромагнітних полюсів 2 і феромагнітним валом 3, і утримується в цих зазорах магнітним полем, який утворюється кільцевим постійним магнітом 4. Феромагнітні полюси 2 і постійні магніти 4 закріплені нерухомим немагнітним корпусами 5.

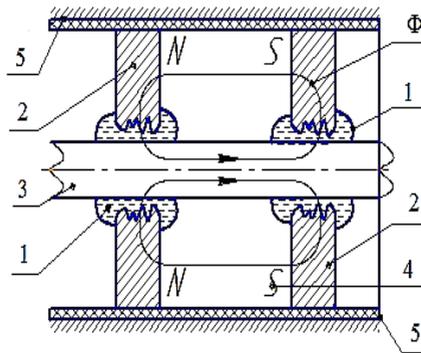


Рисунок 14.5 – Схема магнітоферорідинної опори [51]

14.4 Безконтактні магнітні підшипники. Можливості, переваги та недоліки

Безконтактні магнітні підшипники це пристрої магнітних підшипників або безконтактних підвісів, яким не потрібне мастило, відсутні тертьові частини, отже немає втрат на тертя, вкрай низький рівень вібрації, мають високу відносну швидкість, мале енергоспоживання, систему автоматичного контролю та моніторингу стану під герметизації.

Всі ці переваги роблять магнітні підшипники кращими рішеннями для безлічі застосувань: для газових турбін, для криогенної техніки, у високооборотних електрогенераторах, для

вакуумних пристроїв, для різних верстатів та іншого обладнання, у тому числі високоточного та високошвидкісного (близько 100000 обертів на хвилину), де дуже важлива відсутність механічних втрат, перешкод та похибок.

Принципово магнітні підшипники поділяються на два типи: пасивні та активні магнітні підшипники.

Пасивні магнітні підшипники виготовляються на базі постійних магнітів, але такий підхід далеко не ідеальний, тому він використовується вкрай рідко.

Більш гнучкі та широкі технічні можливості відкриваються з активними підшипниками, в яких магнітне поле створюється змінними струмами в обмотках сердечників.



Рисунок 14.6 – Конструкція безконтактного магнітного підшипника

Робота активного магнітного підвісу чи підшипника базується на принципі електромагнітної левітації — левітації з допомогою електричного і магнітного полів. Тут обертання валу у підшипнику відбувається без фізичного контакту поверхонь одна із одною. Саме з цієї причини повністю виключається мастило, а механічне зношування проте відсутнє. Так підвищуються надійність та ККД машин.

Фахівці також наголошують на важливості наявності контролю положення валу ротора. Система датчиків безперервно стежить за положенням валу і подає сигнали системі автоматичного керування для точного позиціонування шляхом

коригування позиціонуючого магнітного поля статора, – сила тяжіння з потрібного боку валу робиться сильнішою або слабшою шляхом регулювання струму статорних обмотках активних підшипників.

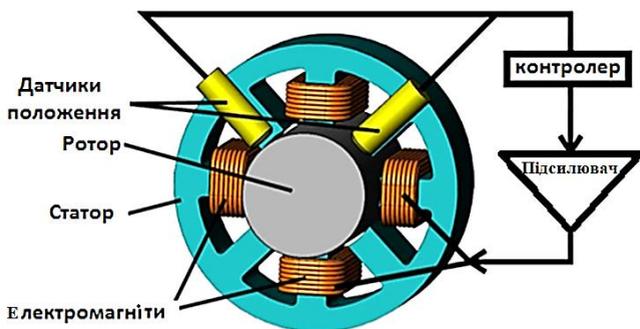


Рисунок 14.7 – Пристрій безконтактного підшипника

Два конічні активні підшипники або два радіальні і один осевий активні підшипники дозволяють безконтактно підвісити ротор буквально в повітрі. Система керування підвісом працює безперервно, вона може бути цифровою або аналоговою. Так забезпечується висока міцність утримання, висока вантажопідйомність, та регульовані жорсткість та амортизація. Дана технологія дозволяє підшипникам працювати в умовах низьких та високих температур, у вакуумі, на великих швидкостях та в умовах підвищених вимог до стерильності.

Пристрій активного безконтактного магнітного підшипника з наведеного вище ясно, що основними частинами системи активного магнітного підвісу є: магнітний підшипник і автоматична система електронного керування. Електромагніти весь час діють на ротор з різних боків, і їхня дія підпорядкована електронній системі контролю.

Ротор радіального магнітного підшипника оснащений феромагнітними пластинами, на які і діє магнітне поле, що утримує від котушок статора, в результаті чого ротор виявляється підвішений в центрі статора, не стикаючись з ним. Індуктивні

датчики постійно стежать за положенням ротора. Будь-яке відхилення від правильного положення призводить до появи сигналу, який подається на контролер, щоб той у свою чергу повернув ротор у потрібне положення. Радіальний проміжок може становити від 0,5 до 1 мм. Аналогічним чином функціонує упорний магнітний підшипник. Електромагніти у формі кільця закріплені на валу упорного диска. Електромагніти розташовуються на статорі. На кінцях валу розташовуються осеві датчики.

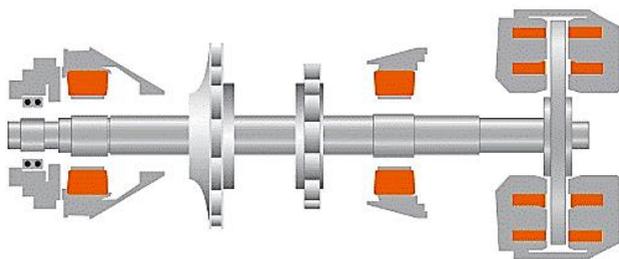


Рисунок 14.8 – Упорний магнітний підшипник

Для надійного утримання ротора машини під час її зупинки або в момент відмови системи утримання використовуються страхувальні кулькові підшипники, які закріплені так, що зазор між ними і валом виставлений рівним половині того, що має місце в магнітному підшипнику.

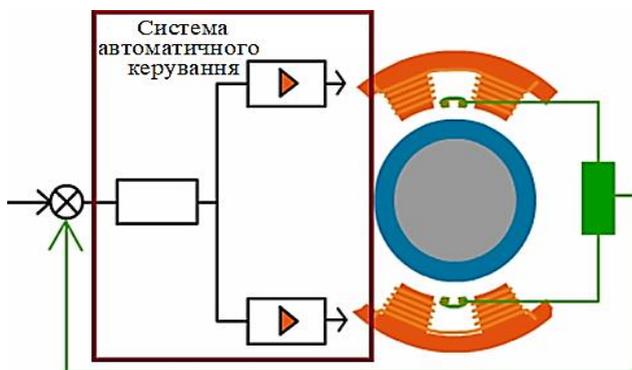


Рисунок 14.9 – Система автоматичного регулювання

Система автоматичного регулювання розташовується в шафі, і відповідає за правильну модуляцію струму, що проходить електромагнітами, відповідно до сигналів від датчиків положення ротора. Потужність підсилювачів пов'язана з максимальною силою електромагнітів, величиною повітряного зазору та часом реакції системи на зміну положення ротора.

Максимально можлива швидкість обертання ротора в магнітному радіальному підшипнику обмежена лише здатністю феромагнітних пластин ротора опиратися відцентровій силі. Зазвичай межа окружної швидкості становить 200 м/с, тоді як для осьових магнітних підшипників межа обмежена стійкістю литої сталі упору – 350 м/с зі звичайними матеріалами.

Від феромагнетиків, що застосовуються, залежить і максимальне навантаження, яке здатний витримати підшипник відповідного діаметра і довжини статора підшипника. Для стандартних матеріалів максимальний тиск - 0,9 Н/см², що менше ніж у звичайних контактних підшипників, проте програш у навантаженні може бути компенсований високою швидкістю окружності при збільшеному діаметрі валу. Енергоспоживання активного магнітного підшипника не дуже велике. Найбільші втрати в підшипнику припадають на вихрові струми, але це в десятки разів менше, ніж та енергія, яка витрачається при використанні в машинах звичайних підшипників.

Муфти, термоізоляційні бар'єри та інші пристрої виключаються, підшипники ефективно працюють в умовах вакууму, гелію, кисню, морської води тощо. Діапазон температур становить від -253°C до +450°C.

Відносні недоліки магнітних підшипників насамперед – це необхідність застосовувати допоміжні страхувальні підшипники кочення, які можуть витримувати щонайбільше дві відмови, після чого їх потрібно міняти на нові. По-друге, це складність системи автоматичного керування, яка при виході з ладу вимагатиме складного ремонту.

По-третє, температура обмотки статора підшипника при високих струмах підвищується, внаслідок чого обмотки гріються, і їм потрібне персональне охолодження, краще якщо рідинне.

Нарешті, матеріаломісткість безконтактного підшипника виявляється високою, тому що площа несучої поверхні для підтримки достатньої магнітної сили повинна бути великою – осердя статора підшипника виходить великим і важким, а також явище магнітного насичення.

Але, незважаючи на недоліки, магнітні підшипники вже досить широко застосовуються, в тому числі в оптичних системах високої точності і в лазерних установках. Так чи інакше, починаючи з середини минулого століття магнітні підшипники постійно вдосконалюються.



14.5 Контрольні питання

14.5.1. Електромагнітні та магнітні підвіси. Призначення. Пондеромоторні сили та явища левітації.

14.5.2. Дати характеристику підвісів на постійних електромагнітах та магнітах. Підвіси з частковою компенсацією ваги підвішеного тіла. Навести їх приклади.

14.5.3. Підвіси на постійних електромагнітах.

14.5.4. Індуктивні електромагнітні опори.

14.5.5. Одновісний резонансний підвіс.

14.5.6. Принцип дії магнітно ферорідинної опори.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Агейкин, Д. И. Датчики контроля и регулирования [Текст]/ Д.И. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1985. – 509 с.
2. Александров, Г. Н. Теория электрических аппаратов: учебник для вузов [Текст] / Г. Н. Александров. – М.: Высшая школа, 1985. – 312 с.
3. Александров, Г. Н. Проектирование электрических аппаратов: учебник для вузов [Текст]/ Г. Н. Александров, В. В. Борисов, Г. С. Каплан и др.; под ред. Г. Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 448 с.
4. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст]/ В. А. Андреев. – М.: Высшая школа, 1991. – 495 с.
5. Аполлонский, С. М. Электрические аппараты управления: монография / С. М. Аполлонский, Ю. В. Куклев. – М.: РУСАЙНС, 2016. – 318 с.
6. Богородский, Н. П. Электрические материалы [Текст]/ Н. П. Богородский. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 362 с.
7. Буль, Б. К. Электромеханические аппараты автоматики: учебник для вузов [Текст]: / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов и др.; под ред. Б. К. Буля. – М.: Высшая школа, 1987. – 162 с.
8. Волкова О. Г. Исследование характера механического взаимодействия рабочих поверхностей сильноточных разрывных контактов [Текст]:/ О. Г. Волкова, Л. Б. Жорняк // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 1. – С. 12 – 16.
9. Гордон, А. В. Поляризованные электромагниты [Текст]/ А. В. Гордон, А. В. Сливинская. – М.: Энергия, 1994. – 240 с.
10. ГОСТ 2.710-81. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – 10 с. 72.
11. ГОСТ 2.755-87. ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – 13 с.
12. ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-67. Введ. 16.12.87. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 20 с.

13. ГОСТ 14312-79 Контакты электрические. Термины и определения. Введ. 16.12.79. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 22 с.
14. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Зміни № 4 від 28.05.99, протокол № 15, прийняті Міждержавною радою по стандартизації, метрології та сертифікації. – 66 с.
15. ГОСТ 1516.2-97 Электроустановки и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. З поправкою [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://online.budstandart.com>
16. Губкин, А.Н. Электреты [Текст]/ А. Н. Губкин. – М.: Наука, 1980. – 180 с.
17. Диковский, Я. М. Магнитоуправляемые контакты [Текст]:/ Я. М. Диковский, И. И. Капралов. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
18. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. Чинний від 1995-01-01. [Текст]. – Київ: Держспоживстандарт України, 1995. – 65 с.
19. ДСТУ 3020-95. Апарати комутаційні низьковольтні (ГОСТ 12434-93. Аппараты коммутационные низковольтные). – 36 с.
20. ДСТУ 3025-95. Вимикачі автоматичні низьковольтні (ГОСТ 9098-93. Выключатели автоматические низковольтные – Low-voltage automatic switches). – 32 с.
21. ДСТУ 3335-96. Шафи негерметизованих комплектних пристроїв та комплектних розподільних пристроїв та комплектних трансформаторних підстанцій [Текст] – К.: Держстандарт України, 1996. – 12 с.
22. ДСТУ 3440-96. Системи енергетичні. Терміни та визначення [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://online.budstandart.com>
23. ДСТУ EN 50160-2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної

призначеності (EN 50160:2010, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.loe.ant.lviv.ua/>

24. ДСТУ EN 60947-5-1:2015 Пристрої комплектні розподільчі низьковольтні. Частина 5-1. Пристрої розподільчих кіл і перемикальні елементи. Електромеханічні пристрої розподільних кіл (EN 60947-5-1:2004, IDT). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page>

25. ДСТУ ІЕС 60947-6-1:2007 Пристрої комплектні розподільчі низьковольтні Частина 6-1. Багатофункційне обладнання. Перемикальне комутаційне обладнання (ІЕС 60947-6-1:2005, IDT) Видання офіційне Київ ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2007. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.eslugder.com.ua/Brochures/AVR/DSTU_IЕС_60947_6_1.pdf

26. Жорняк Л. Б. Об оптимизации температурных режимов в электрических аппаратах [Текст] / Л. Б. Жорняк, А. Ш. Асатурян, О. В. Бояринцева // Электротехника та електромеханіка. – 2003. - № 1. - С. 5-10.

27. Жорняк, Л. Б. Определение коэффициента теплоотдачи при нестационарном теплообмене в шкафах низковольтных комплектных устройств [Текст] / Л. Б. Жорняк // Электротехника та електроенергетика. – 2003. – № 2. – С. 44-46.

28. Клименко, Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Точка, 2012. – 340 с.

29. Клименко, Б. В. Электричні та магнітні пристрої, електричні аксесуари, електричні установки. Терміни, тлумачення, коментарі: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Точка, 2009. – 272 с.

30. Клименко, Б. В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Талант, 2008. – 208 с.

31. Кобленц, М. Г. Герметичное коммутирующее устройство на силовых герконах [Текст]/ М. Г. Кобленц. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.

32. Кобозев, О. С. Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кВ [Текст] / О. С. Кобозев, О. Г. Середа, Л. Б. Жорняк, В. В. Моргун // Электротехника та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 66-72.

33. Коробков, Ю. С. Особенности устройства и работы магнитоуправляемых контактов: учебное пособие [Текст]:/ Ю. С. Коробков, С.В. Хромов. – М.: Изд-во МЭИ, 1992. – 306 с.

34. Коробков, Ю. С. Электрические аппараты автоматики [Текст]:/ Ю.С. Коробков, В. Д. Флора. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 344 с.

35. Коробков, Ю. С. Электрические аппараты автоматики: сборник вопросов, задач и упражнений [Текст]:/ Ю. С. Коробков, В. Д. Флора. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 116 с.

36. Крайуберт, М.И. Электромагнитные муфты скольжения в приводе [Текст]/ М.И. Крайуберт. – М.; Информэлектро, 1970. – 73 с.

37. Красник, В. В. Термины и определения в электроэнергетике [Текст]/ В В. Красник– М.: Энергосервис, 2002. – 355с.

38. Курбатов, П. А. Анализ силовых взаимодействий в электромагнитных системах электрических аппаратов [Текст]/ Курбатов П. А. – М.: Изд-во МЭИ, 1994 – 206с.

39. Науково-виробниче підприємство «РЕЛСІС»
<https://reلسis.ua/ua/about-us/reلسis>

40. Новиков, Ю. Н. Теория и расчет электрических аппаратов [Текст]/ Ю.Н. Новиков. – М.: Энергия, 1970. – 310 с.

41. Осокин, Ю. А. Теория и применение электромагнитных подвесов [Текст]/ Ю. А. Осокин. – М.: Машиностроение, 1980. – 210 с.

42. Правила улаштування електроустановок: / Міненерговугілля України. — 5-те вид., перероб. і доп. (станом на 22.08.2014) (чинне з 22.11.2014). — Харків: 2014. — 793 с.

43. Продукция General Electric промышленного назначения [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.vbr-electric.com.ua/general-electric/ge_sockets_switches.php

44. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии/ Аналитический обзор

[Текст]:/Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский. – Электротехника, 1998. – №3. – С.10-17.

45. Розанов, Ю. К. Электрические и электронные аппараты [Текст] /Под ред. Ю. К. Розанова, Е. Г. Акимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 160 с.

46. Ройзен, В. З. Электромагнитные малогабаритные реле [Текст]/ В. З. Ройзен. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. - 240 с.

47. Сахаров, П. В. Проектирование электрических аппаратов [Текст]/ П. В. Сахаров. – М.: Энергия, 1977. – 560 с.

48. Серeda, А. Г. Диагностирование аварийных режимов в разветвленной сети электроснабжения на основе анализа среднеквадратичного значения тока / А. Г. Серeda // Научни известия на НТSM. – София, 2013. – Година XXI – №2 (139). – С. 414-419.

49. Серeda, О. Г. Захист розгалуженої мережі електропостачання з розподіленням навантаженням від обриву нейтрального провідника / О. Г. Серeda // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2014. – № 785. – С. 66-73. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPEEC_2014_785_13.pdf

50. Снигирев В.М. К вопросу оптимального проектирования электрических аппаратов [Текст] / В. М. Снигирев, А.П. Агибалов и др. // Электротехника та електроенергетика. – 2012. – №1. – С. 16-18.

51. Снігірьов В. М. Електромеханічні апарати автоматики / В. М. Снігірьов, Л. Б. Жорняк. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 –120 с.

52. Софронов, Ю. В. Электромеханические аппараты автоматики [Текст]/ Ю. В. Софронов. – Чебоксари: Изд-во Чуваш.ун-та, 1982. – 103 с.

53. Таев, И. С. Электрические аппараты автоматики и управления [Текст]/ И. С. Таев. – М.: Высшая школа, 1975. – 16 с.

54. Харазов, К.И. Устройства автоматики с магнитными контактами [Текст]/ К.И. Харазов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 225 с.

55. Чунихин, А. А. Электрические аппараты [Текст]/ А. А. Чунихин. – М.; Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.

56. Шоффа, В. Н. Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов [Текст]/ В. Н. Шоффа. – М.: Изд-во МЭИ. 1994. – 186 с.

57. Шоффа, В. Н. Сборник задач и упражнений по электромагнитным явлениям в электрических аппаратах [Текст]:/ В. Н. Шоффа, А. В. Савцев. – М.: Мир, 1985. – 236 с.

58. Электротехническая продукция и средства автоматизации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.vbr-electric.com.ua>

59. IEC 60529: Ed. 2.1, 2001-02. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). – 50 p.

60. IEC 60898-1: Ed. 1.2, 2003-07. Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations – Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation. – 282 p.

61. IEC 60898-2: Ed. 1.1, 2003-07. Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations – Part 1: Circuit-breakers for a.c. and d.c. operation. – 46p.

62. Sereda, O. G. Monitoring thermal state of induction motors through the winding direct temperature control during the start [Текст]: / O. G. Sereda, V. Lytvynenko, I. Varshamova // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). – Volume 63, Issue 3, 2018, Pages 433-446.

63. <https://new.abb.com/low-voltage/ru/launches/neogear>

64. <https://pluton.ua/products/low-voltage-equipment/low-voltage-switchgears/low-voltage-switchgears-series-kru-0.23k-kru-0.4k>

65. <https://reلسis.ua/ua/about-us/reلسis>

66. <https://reلسis.ua/ua/products/control-cabinets/krza>

67. <https://keaz.ru/company/press-center/news/2017/1247-predohraniteli-ppn-h0-ot-keaz-effektivnaya-i-ekonomichnaya-zaschita-elektricheskikh-setey>

68. <https://eltron.com.ua/ru/predohraniteli-plavkie-modulnye>

69. <https://asenergi.com/catalog/predohraniteli/smd-chip.html>

70. https://radioskot.ru/publ/nachinajushhim/smd_predokhraniteli/5-1-0-1675.

71. <https://infourok.ru/prakticheskoe-zanyatie-po-mdk-01-01-ustrojstvo-i-to-podstancij-na-temu-izuchenie-konstrukcii-i-principa-raboty-magnitnogo-puskat-4025902.html>
72. <https://electrozamer.ooo/blog/klassifikatsiya-avtomaticheskikh-vykluchateley>
73. <https://lemzspb.ru/zashchitnyye-ustroystva-ostatochnogo-toka/>
74. <https://enext.ua/press/articles/UZO-ili-diffavtomat/>
75. <https://goodlinez.ru/electroassembly/239>.
76. https://electrica-shop.com.ua/files/Schneider_Electric/Resi9/Katalog_ustroystv_Resi9.pdf
77. <https://elquanta.ru/vyklyuchateli/paketyjji-vyklyuchatel.html>
78. <https://electrocontrol.com.ua/kontaktery/kotaktery-kt-6000.html>
79. <https://en.ppt-online.org/1161950>
80. <https://studfile.net/preview/4546143/>
81. https://studopedia.su/14_15654_magnitoelektricheskie-rele.html
82. <https://textarchive.ru/c-2984575-p2.html>
83. <https://rusvolt.su/contacts-puskatelei-kontaktorov-kontrollerov>
84. <https://elektronchic.ru/elektrotexnika/podbor-materialov-ispolzuemyx-dlya-elektricheskix-kontaktov.html>
85. <http://elektrik.info/main/school/1537-chno-takoe-tverdotelnoe-rele-i-kak-ego-pravilno-ispolzovat.html>
86. <https://ekfgroup.com/catalog/products/kontaktor-kt-6023-160a-220v-3no-3nc-ekf-proxima>
87. http://eskatel.by/avtomaticheskie_vyklyuchateli/
88. <https://sesaga.ru/naznachenie-ustrojstvo-i-rabota-magnitnogo-puskatelya.html>
89. <https://elenergi.ru/magnitnye-puskateli.html>
90. <https://worldofmaterials.ru/spravochnik/conductors/21-kompozitsionny-kontaktnye-materialy>
91. <https://sovet-ingenera.com/elektrika/rele/tverdotelnoe-rele.html>

92. <https://tadgikov.net/stroitelnye-materialy/4629-avtomaticheskije>
93. https://electrica-shop.com.ua/files/Schneider_Electric/Resi9/Katalog_ustroystv_Resi9.pdf
94. <https://kaskadenergo.by/catalog/rele-/rele-toka-siez-vbti-maksimalnogo-minimalnogo>
95. https://energotk.ru/actionviewdynamicpage/9a/3a/23a_630.html
96. <https://prom.ua/p1541379698-promyshlennye-komandokontrollery>
97. <https://www.asutpp.ru/induktivnyy-datchik.html>

Навчальне видання

ЖОРНЯК Людмила Борисівна
АНТОНОВА Марина Володимирівна
ВАСИЛЕВСЬКИЙ Володимир Валентинович

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ АВТОМАТИКИ ТА КЕРУВАННЯ

Комп'ютерний набір *Жорняк Л.Б.*
Верстання *Дяченко О.О.*

Підписано до друку 12.09.2022. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 24,06.
Тираж 100 прим. Зам. № 695.

Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.