

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Снігірьов В. М., Жорняк Л.Б.

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ АПАРАТИ  
АВТОМАТИКИ**

*Навчальний посібник*

Запоріжжя ЗНТУ 2016

**УДК 681.527.2**

**ББК 32.965.32**

**С53**

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Запорізького національного технічного університету  
(Протокол №2 від 15.09.2015 р.)*

Рецензенти:

**Горкунов Б.М.** - доктор технічних наук, професор кафедри приладів та методів неруйнівного контролю Національного технічного університету «ХПІ»

**Волков О.В.** - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідроенергетики ЗДІА

**Радченко В.В.** - кандидат технічних наук, доцент кафедри гідроенергетики ЗДІА

**Снігірьов В.М.**

Електромеханічні апарати автоматики / В.М. Снігірьов, Л.Б. Жорняк. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 –120 с.

ISBN 978-617-529-142-9

Навчальний посібник присвячений курсу «Електромеханічні апарати автоматики». Розглядаються апарати, що застосовуються для керування, захисту та сигналізації електричних кіл. Навчальний посібник призначений для студентів електротехнічних факультетів.

**УДК 681.527.2**

**ББК 32.965.32**

ISBN 978-617-529-142-9

© Снігірьов В. М., 2018

© Жорняк Л. Б., 2018

© Запорізький національний  
технічний університет (ЗНТУ), 2016

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ РЕЛЕ	6
1.1 Контакти реле	10
1.2 Основні положення теорії магнітних кіл	15
1.2.1 Закони магнітних кіл	17
1.3 Електромагнітні зусилля	19
1.4 Характеристика електромагнітів: навантажувальна, протидіюча та тягова	24
1.5 Електромагнітні реле постійного струму	28
1.5.1 Вплив полюсного наконечника на тягову характеристику реле постійного струму	28
1.6 Електромагнітні реле змінного струму	32
1.6.1 Пульсація електромагнітної сили	33
1.6.2 Вібрація якоря	34
1.7 Поляризовані електромагнітні реле	36
1.8 Індукційне реле	41
1.8.1 Момент обертання індукційної системи	41
1.8.2 Індукційне реле потужності	47
1.9 Магнітоелектричні реле	49
1.10 Електродинамічні реле	51
1.11 Теплові реле (термореле)	53
1.12 Особливості вибору і тенденції розвитку електромеханічних реле	55
1.13 Герконові реле	58
1.13.1 Герметизовані магнітокеровані контакти і геконові реле	58
1.13.2 Механічна (протидіюча) і тягова характеристики геркона	61
1.13.3 Засоби керування реле на герконах	62
1.13.4 Ферриди	64
1.14 Контрольні питання та задачі	66
2 ДАТЧИКИ КОНТРОЛЮ І РЕГУЛЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	69
2.1 Контактні датчики	73
2.2 Потенціометричні датчики	74
2.3 Омичні тензодатчики	79
2.4 Термоелектричні перетворювачі(термопари)	83
2.5 Індуктивні і трансформаторні датчики	88
2.5.1 Індуктивні датчики	89
2.5.2 Трансформаторні датчики	91

2.6 Ємнісні датчики	93
2.7 Активні датчики	95
2.7.1 Датчик частоти обертання – тахогенератор	96
2.7.2 Датчик кутового прискорення	97
2.7.3 Датчик Вігарда	98
2.8 Особливості конструктивно-технологічних характеристик електромагнітних датчиків	98
2.9 Контрольні питання та задачі	100
3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І МАГНІТНІ МУФТИ	102
3.1 Фрикційні електромагнітні муфти	103
3.2 Індукційні муфти	105
3.3 Електростатичні (порошкові) муфти	107
3.4 Контрольні питання	109
4 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І МАГНІТНІ ПІДВІСИ ТА ОПОРИ	110
4.1 Коротка класифікація існуючих підвісів	111
4.2 Індукційні електромагнітні підвіси та опори	111
4.3 Магнітофероридинні опори	116
4.4 Контрольні питання	116
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	117

## ВСТУП

Електромеханічні апарати автоматики (ЕМАА) належать до електротехнічних пристроїв, що застосовуються на всіх етапах використання електричної енергії, починаючи з генерування, потім транспортування, розподілення та перетворення і, нарешті, закінчуючи її споживанням. ЕМАА призначені для вмикання та вимикання, вимірювань, захисту та керування, стабілізації та регулювання певних параметрів обладнання, об'єктів і установок, а також контролювання і перетворювання неелектричних величин в електричні для подальшого використання в системах автоматизованого регулювання і керування (відповідно САР і САК). Крім того, в теперішній час додатково під ЕМАА розуміють електротехнічні пристрої керування потоками енергії і інформації, причому потоки енергії різного виду: електричні, механічні, теплові та інші [11, 15, 16, 25]. Наприклад, потоки механічної енергії від двигуна до технологічної машини можна скеровувати за допомогою електромагнітної муфти, або потік теплової енергії – за допомогою електромагнітних клапанів і заслонок і т. і.

За принципом дії електричні апарати (ЕА) підрозділяються на електромеханічні контактні (такі, що мають, зазвичай, хоча б одну рухому деталь) і безконтактні (коли комутації електричного кола відбувається без фізичного розриву самого кола). Всі решта – загальнопромислові ЕА належать до електромеханічних контактних апаратів, в яких зміна струму здійснюється з фізичним розривом електричного кола.

ЕМАА умовно можна розрізняти за такими групами:

- первинні електромеханічні вимірювальні перетворювачі;
- різноманітні електромеханічні реле;
- датчики контролю і регулювання;
- електромагнітні муфти, клапани та ін.;
- електричні і магнітні опори та підвіси.

Окрім того, ЕМАА розрізняються за величиною струму, що комутується, на слабострумові – до 10 А (при цьому нижні межі можуть сягати  $10^{-9}$  А) та сильнострумові – більше 10 А (при цьому реле струму можуть мати номінативні струми до декількох сотень ампер).

# 1 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 складається з релейного елемента (з двома станами стійкої рівноваги) та групи електричних контактів, що замикаються (або розмикаються) при зміні стану релейного елемента [12,13,18]. Реле широко застосовуються в пристроях автоматичного управління, контролю, сигналізації, захисту та комутації. В залежності від фізичної природи сигналу, що керує, реле розрізняються на електричні, теплові, механічні, оптичні та ін. Електричні реле реагують на такі електричні параметри як струм, напруга, потужність, електричний струм, тощо, або ж на температуру, кількість теплоти і т.і. Реле, в яких використовується тепла дія струму, мають відношення до електричних, і відповідно назву електротеплові. Механічні реле реагують на силу, тиск, швидкість, переміщення, тощо. 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, гірнично-рудної та нафтовидобувної промисловості, тощо [3, 5, 6, 11, 29]. Загалом релейний елемент є технічним 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 — апарати, призначені здійснювати стрибкоподібні зміни сигналів у вихідних колах при заданих значеннях електричних сигналів керування.

Електромеханічні реле — електричні реле, робота яких побудована на використанні відносного переміщення його механічних елементів в результаті впливання електричного струму, що протікає по вхідних колах.

Електромагнітні реле — електромеханічні реле, робота яких базується на впливанні магнітного поля нерухомої обмотки на рухомий феромагнітний елемент. Стисла класифікація електро-

магнітних реле за функціональними ознаками показана на рис. 1.1.

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 ( $10^{-6} - 10$ ) 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  $2 \text{ см}^3$ ;
- мініатюрні — масою до 16 г та об'ємом  $2 \dots 6 \text{ см}^3$ ;
- малогабаритні — масою 16...40 г та об'ємом до  $6-15 \text{ см}^3$ ;
- нормальні — масою більш 40 г та об'ємом більше  $15 \text{ см}^3$ .

На рис. 1.2 наведено найпростішу конструкцію електромагнітного реле з контактом, що замикає, та закріпленими консольно контактними пружинами. Тут зазор між контактами позначений як  $\beta$ , зазор між полюсом та якорем, як  $\delta$ . Причому  $\delta > \beta$ .



Рисунок 1.1 – Класифікація електромагнітних реле

Реле постійного струму зазвичай мають штифт відлипання (або немагнітну прокладку), який служить для запобігання «залипання» якоря реле через остаточний магнетизм 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.

На рис. 1.3 представлені типові характеристики керування апаратів релейного принципу дії, на яких прийняті такі позначення:  $X_{сп}$  – параметр спрацьовування;  $X_{зв}$  – параметр повернення (зворотній);  $X_p$  – робочий сигнал (параметр);  $Y_{max}$ ,  $Y_{min}$  – максимальне і мінімальне значення вихідного сигналу (параметра);  $X_0$  – 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.

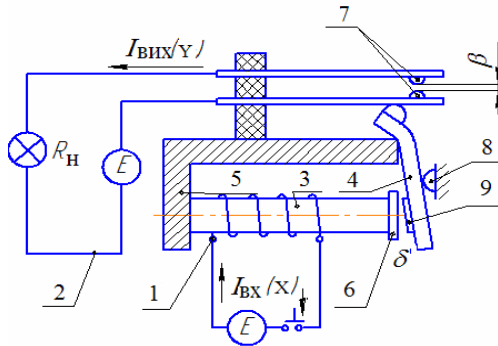


Рисунок 1.2 – Спрощена конструкція електромагнітного реле:

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

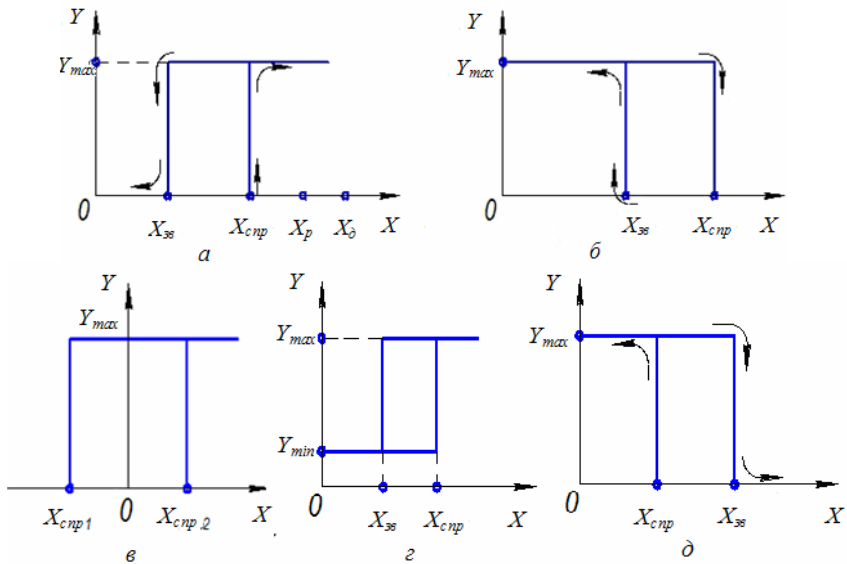


Рисунок 1.3 – Типові характеристики керування апаратів релейного принципу дії:

- 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

## 1.1 Контакти реле

Фізичні процеси в роботі контактів визначаються конструкцією, властивостями матеріалу, умовами довкілля, процесами в замкненому електричному колі, при вмиканні та вимиканні [23, 38]. На рис. 1.4 наведена стисла класифікація електричних контактів. Основні поняття, згідно зі стандартом (ГОСТ14312-79): [36]

– 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 к.-д., нормальна до поверхонь їх зіткнення  $F_{\kappa}$ ;

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

– 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.

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 розрізу (рис. 1.5, а).

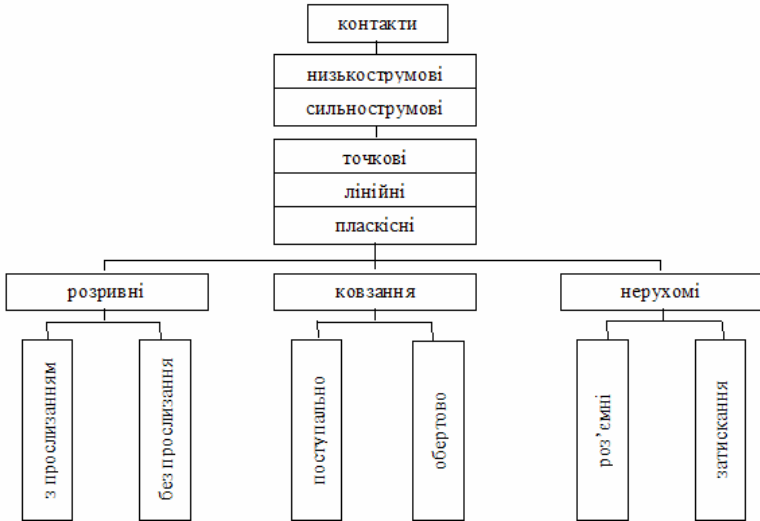


Рисунок 1.4 – Стисла класифікація електричних контактів

При цьому електричний струм проходить лише в місцях без-посереднього контакту, а отже зменшується площа  $S_k$ , через яку проходить струм. Добре видно, що лінії струму ніби стягуються до реальної площі натискання (рис. 1.5, б), а це, в свою чергу, визиває появу опору стягнення  $R_c$ . На поверхні контактів утворюються плівки головним чином при контактуванні матеріалу з до-вкіллям. Особливо це має значення для малопотужних контактів. До основних видів плівок відносяться: адсорбовані кисневі (адгезійні) плівки та плівки потемніння (окисні або сульфідні). Плівки сприяють появі опору плівок  $R_{пл}$ . Окрім тих плівок, що утворюються при контактуванні 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 чистим металевим контактом;
- з квазіметалевим контактом (коли контактні елементи розділені тонкою адгезійною плівкою або тонкою до  $20 \text{ \AA}$  плівкою потемніння);

– з неметалічним контактом, вкритим товстими плівками потемніння.

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

$$R_{пер} = R_c + R_{пл} + R_{кр} . \quad (1.1)$$

Зазвичай  $R_{кр}$  не перевищує декількох сотих од відсотків від  $R_c$  і  $R_{пл}$ , 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, переключанням і таке інше. Якщо ж за умовами роботи не можна відключати електричний апарат, то при розрахунках номінальної 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 мікросуви для руйнування плівок. Позитивний вплив плівок полягає в тому, що вони запобігають можливості розвинення надмірно великих сил міжмолекулярного зчеплення на поверхні торкання котактів.

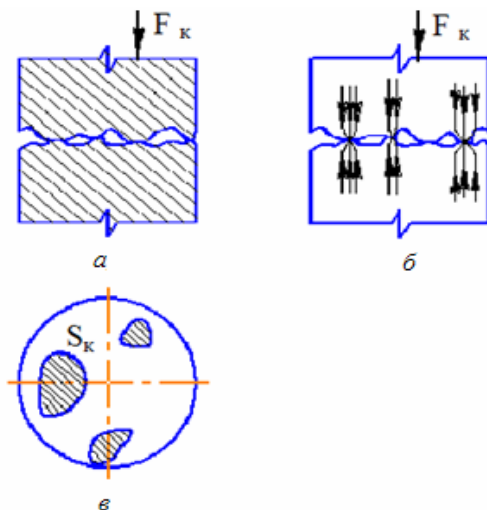


Рисунок 1.5 – Картина проходження струму через контактне з'єднання:

*a* – поперечний переріз; *б* – місця зтягування струму;  
*в* – місця реальних точок контактування

Для інженерних розрахунків перехідного опору можна застосувати наступну емпіричну формулу [2, 27, 30]:

$$R_{пер} = \frac{K_1 \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \Delta\theta \right)}{(0,102 F_k)^m}, \quad (1.2)$$

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

$\alpha$  – температурний коефіцієнт матеріалу контакту;

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

$F_k$  – 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.

Малопотужні розривні контакти реле виробляються з благородних і тугоплавких металів *Au*, *Ag*, *W*, *Mo*, *Pt*, *Pd*, *Rh*, *Ir*, *Ru* їх сплавів [4, 20, 36]. 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  $R_{пер}$ ;
- $Ag + Cd$  – застосовується як металокераміка.

Вольфрам  $W$  має підвищену стійкість до дугоутворення, електричній ерозії та зварюванню. Застосовується при великих натисканнях. Особливо часто застосовується сплав із молібденом  $W +$

Мо. Як припої при паянні контактів до контактних пружин застосовуються сплави  $Ag + Cu$ , або  $Ag + Cu + Zn$ .

## 1.2 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 ЕМАА є розімкненими немагнітними зазорами, що не переривають магнітний потік, а лише збільшують магнітний опір на його шляху. У табл. 1.1 наведена аналогія між параметрами електричних і магнітних кіл, в якій кількість витків обмотки позначена літерою  $W$  [15, 21, 25, 27, 30]. Відомо, що між магнітними полюсами виникає магнітне поле, силову дію якого можна графічно пояснити за допомогою рис. 1.6. Тут прийняті такі позначення  $F_{Д.Т.}$  – 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.

Таблиця 1.1 – Аналогія між параметрами електричних і магнітних величин

Електричні величини			Магнітні величини		
Величина	Рівняння	Одиниці	Величина	Рівняння	Одиниці
Сила струму	$I = \frac{\partial Q}{\partial t}$	$A$	Напряга індукції	$U = -W \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t}$	$B$
Напряга	$U = E \cdot d$	$B$	Магніторушійна сила	$E = H \cdot l$	$A$
Заряд	$Q = I \cdot t$	$Kл = A \cdot C$	Магнітний потік	$\Phi = B \cdot S$	$B\bar{b} = B \cdot C$
Місткість	$C = \frac{Q}{U}$	$\Phi = Kл/B$	Індуктивність поля	$L = \frac{B \cdot W}{I}$	$\Gamma_H = B \cdot \frac{C}{A}$
Напруженість поля	$E = \frac{U}{d}$	$B/м$	Напруженість поля	$H = \frac{I \cdot W}{l}$	$\frac{A}{м}$
Електричне зміщення	$D = \frac{Q}{S}$	$\frac{Kл}{м^2}$	Магніт на індукція	$B = \frac{\Phi}{S}$	$\Gamma_L = B \cdot \frac{C}{м^2}$
Енергія поля	$E_s = \frac{C \cdot U^2}{2}$	$Дж = Вт \cdot C$	Енергія поля	$E_s = \frac{L \cdot I^2}{2}$	$Дж = Вт \cdot C$
Електрична постійна	$\varepsilon = \frac{1}{\mu_0 \cdot C^2}$	$\frac{\Phi}{м}$	Магніт на постійна	$\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot C^2}$	$\frac{\Gamma_H}{м}$
Відносна діелектрична проникність середовища, що показує в скільки раз в даній середовищі сила взаємодії між зарядами зменшується в порівнянні з вакуумом	$\varepsilon$	-	Відносна магнітна проникливість середовища – показує в скільки разів магнітна індукція поля, створеного струмом в середовищі більше ніж у вакуумі	$\mu$	-
Абсолютна діелектрична проникність	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$	$\frac{\Phi}{м}$	Абсолютна магнітна проникливість	$\mu_a = \mu \cdot \mu_0$	$\frac{\Gamma_H}{м}$

На рис. 1.7 представлений електромагніт, що складається з магнітопроводу (ярмо – 1, яркір – 2, осердя – 3), виробленого з магнітного матеріалу (сталі), який має невеликий магнітний опір, що дозволяє збільшити робочий магнітний потік  $\Phi_\delta$  в повітряних зазорах 4 і 5, де магнітний опір є високим у порівнянні зі сталлю. Магнітний потік  $\Phi_\delta$ , що не замикається через повітряні зазори називається потоком розсіяння. На осерді розташовується обмотка управління – 6.

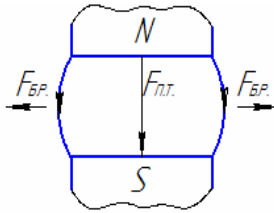


Рисунок 1.6 – Розподіл магнітних силових ліній між полюсами

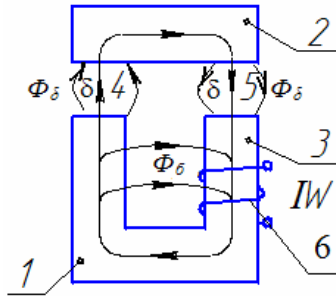


Рисунок 1.7 – Магнітне коло електромагніт клапаного типу з двома робочими зазорами

### 1.2.1 Закони магнітних кіл

Закон Ома для простого нерозгалуженого кола:

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{R_M} \quad (1.3)$$

де  $R_M$  – магнітний опір;

$I$  – струм в обмотці управління;

$W$  – кількість витків обмотки.

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

$$\sum \Phi_x = 0 \quad (1.4)$$

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

$$\oint \Phi \cdot dR_M = \sum I \cdot W, \quad (1.5)$$

Закон повного струму. Циркуляція вектора напруженості поля  $H$  по замкненому контуру дорівнює результуючій силі, що намагається, цього контуру

$$\oint H \cdot dl = I \cdot W, \quad (1.6)$$

де  $l$  – довжина середньої лінії магнітопроводу;  
 $H$  – напруженість поля в магнітній системі.

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

$$H \cdot l = I \cdot W. \quad (1.7)$$

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  $\mu$  – 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. 1.8.

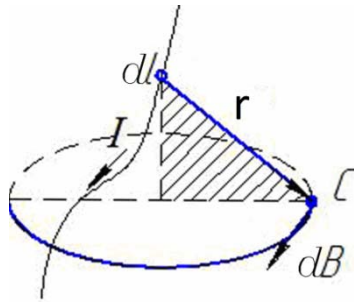


Рисунок 1.8 – Елемент електромагнітного поля. Визначення величини та напрямку магнітної індукції  
Тоді закон у скалярній формі запишемо:

$$dB = \mu_0 \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin (dl, r)}{r^2}, \quad (1.8)$$

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

$\mu_0$  – абсолютна магнітна проникність повітря, що дорівнює  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Г/м;

$\mu$  – відносна магнітна проникність середовища.

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

### 1.3 Електромагнітні зусилля

Для визначення електромагнітних зусиль можна використувати декілька методів. Наприклад, фізичний, або енергетичний підходи [15, 21, 25, 27, 30].

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 стру-

му  $j$  буде діяти зі сторони магнітного поля з індукцією  $\vec{B}$  сила, яка визначається формулою

$$d\bar{F} = \left[ \bar{B} \cdot \bar{j} \right] dV, \quad (1.9)$$

отже повна сила:

$$\bar{F} = \oint_V \left[ \bar{B} \cdot \bar{j} \right] dV. \quad (1.10)$$

Максвелл перетворив цю формулу до вигляду:

$$F = \frac{l}{\mu} \cdot \oint_S \left[ \left( \bar{B} \cdot \bar{n} \right) \cdot B + \frac{1}{2} \cdot B^2 \right] \cdot dS, \quad (1.11)$$

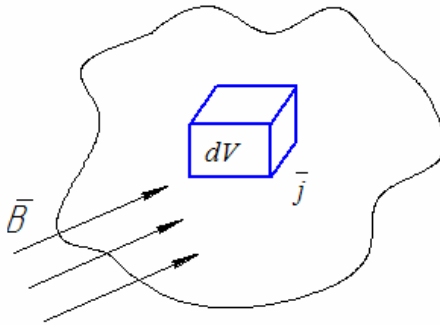


Рисунок 1.9 – Феромагнетик в електричному полі. Визначення електродинамічних зусиль

де  $B$  – індукція зовнішнього поля;

$S$  – площа поверхні феромагнетика;

$\bar{j} = n_0 \cdot e \cdot \bar{V}$  – щільність струму,

$de n_0$  – 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 колінеар-

ні  $\bar{B} \parallel \bar{n}$ , та їх похідна дорівнює нулю, сила визначатиметься як

$$F = \frac{l}{\mu_0} \cdot \oint B^2 \cdot dS, \quad (1.12)$$

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

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (1.13)$$

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

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}. \quad (1.14)$$

Співвідношення (1.13) і (1.14) 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 електромагніта.

Для кола електромагніту справедливо:

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt} \dots \quad (1.15)$$

Помножимо праву та ліву частину рівняння на  $i \cdot dt$ , про інтегруємо, після чого отримаємо рівняння енергетичного балансу:

$$\int_0^t U \cdot i \cdot dt = \int_0^t i^2 R \cdot dt = \int_0^\psi i \cdot d\psi \quad (1.16)$$

$W_e$  – 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  $\delta$ , струму  $I$  та потокозчиплення  $\psi$  визначатиметься площею «0 – 1 – 2 – 3 – 0» на рис. 1.10. На першому етапі, коли яркі залишається нерухомим ( $\delta = \delta_1$ ), потокозчиплення нарощується до значення  $\psi_1$  вдовж кривої намагнічування  $\delta_1$ . При цьому енергія, пропорційна «0 – 1 – 4 – 0» перетворюється у магнітну. При струмі  $I_1$  яркі починає свій рух, а потокозчиплення змінюється по перехідній кривій 1 - 2. При цьому енергія, яка пропорційна площі «1 – 2 – 3 – 4 – 1», перетвориться в магнітну енергію.

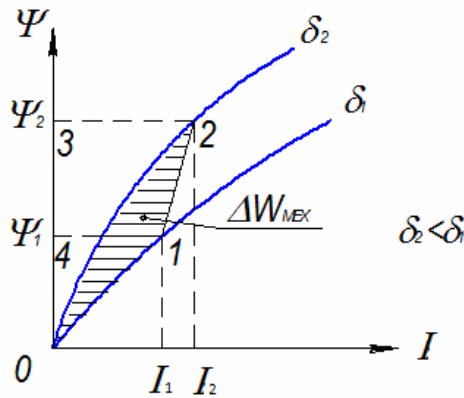


Рисунок 1.10 – До питання визначення  $\Delta W_{mex}$

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 ярка вже витратилась, тобто робота зроблена за рахунок електромагнітної сили задля подолання протидіючих сил, сил тертя, інерції рухомих частин. Це є механічна енергія  $\Delta W_{mex}$ . Тоді електромагнітна сила дорівнюватиме:

$$F_{EM} = \frac{\Delta W_{mex}}{\Delta x} = - \frac{\Delta W_{mex}}{\Delta \delta}, \quad (1.17)$$

або при нескіченно малому переміщенні:

$$F_{EM} = \frac{dW_{mex}}{dx} = - \frac{dW_{mex}}{d\delta}, \quad (1.18)$$

де  $\Delta x$  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  $\delta_1$  та  $\delta_2$  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

$$F_{EM} = -\frac{1}{2} \cdot \left( I \cdot \frac{d\psi}{d\delta} - \psi \cdot \frac{dI}{d\delta} \right), \quad (1.19)$$

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

$$M_{EM} = -\frac{1}{2} \cdot \left( I \cdot \frac{d\psi}{d\varphi} - \psi \cdot \frac{dI}{d\varphi} \right). \quad (1.20)$$

Струм не буде змінюватися в сталому режимі для електромагнітів постійного струму через те, що згідно із законом Ома його значення визначається напругою живлення та опором обмотки ( $I = U / R$ ). Перетворемо формулу сили з урахуванням індуктивності обмотки, кількості її витків і потокозчиплення ( $\psi = L \cdot I = W \cdot \Phi = W \cdot (I \cdot W) \cdot \Lambda = W^2 \cdot \Lambda \cdot I$ ), отримаємо:

$$F_{EM} = -\frac{1}{2} \cdot (I \cdot W)_{\delta}^2 \cdot \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta}, \quad (1.21)$$

де  $W$  – кількість витків обмотки;

$\Lambda_{\delta}$  – 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).

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.

**1.4 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. 1.11).

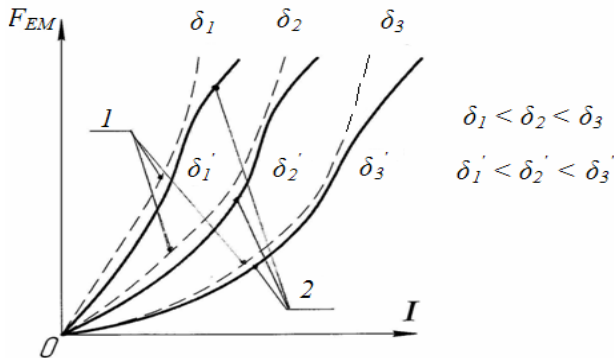


Рисунок 1.11 – Характеристика навантаження

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. 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. 1.12 а), яка включає зворотню пружину (1) та контактні пружини (2, 3). При подачі напруги на котушку (4) електромагнітна якір починає рухатися, а отже, одразу по-

чинає діяти реакція від пружини (1) на рис. 1.12, б (ламана крива (1')), одночасно діє реакція від маси рухомих частин 2' (самого якоря, передавальних вузлів і т. і.), причому ця вага може відніматися, залежно від того, що має в своєму розпорядженні реле при експлуатації (лінія 2'').

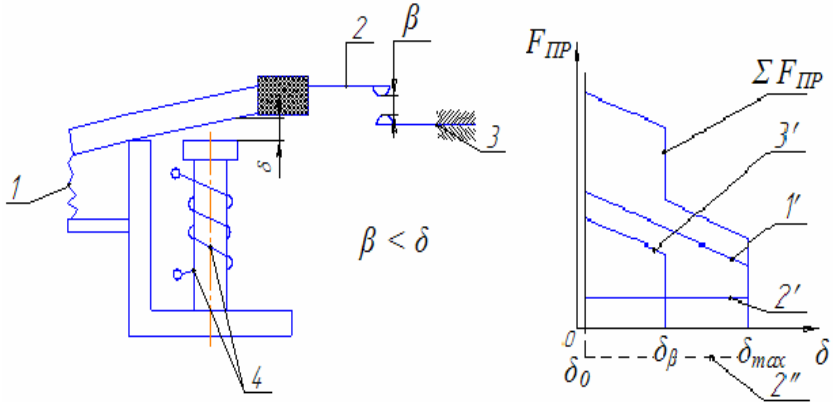


Рисунок 1.12 – Спрощена конструкція електромагнітного реле та його протидіюча характеристика:

а – схема кінематична принципова

б – протидіюча характеристика

Потім починає працювати пружина (3) при певному значенні зазору  $\delta_\beta$  (залежність 3'). Відстань  $\beta$ , яку проходить рухомий контакт до зіткнення з нерухомим (на протидіючій характеристиці відповідає відстані, що дорівнює  $\beta = \delta_{max} - \delta_\beta$ ). Тоді сумарна залежність  $\Sigma F_{PP}$  це є повна 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.

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 характерис-

тики (рис. 1.15). Статична характеристика будується при незмінній МРС обмотки, що можливо при нескінчено повільному русі якоря (крива 1, рис. 1.13). Динамічна характеристика будується з урахуванням перехідних процесів, що протікають при спрацьовуванні або поверненні електромагніту (крива 2, рис. 1.13).

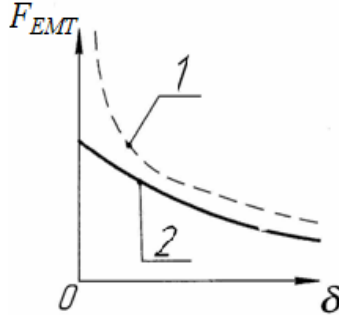


Рисунок 1.13 – Статистична та динамічна тягові характеристики реле

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 (1.21)

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 (1.21) реальне значення сили буде менше, ніж без урахування опору сталі, а при  $\delta \approx 0$  сила матиме кінцеве значення. На рис. 1.14 наводиться принцип узгодження тягової і протидіючої характеристик реле. Узгодження характеристик зводиться до того, щоб тягова характеристика  $F_{EMT}$  має лежати обов'язково вище протидіючої  $F_{PP}$ , а зворотня  $F_{ЗВ}$  – обов'язково нижче протидіючої. Таке розташування можна отримати, якщо:

- а) зменшити жорсткість пружин, тобто «відпустити»  $F_{PP}$ ;
- б) застосувати полюсний наконечник, тобто змінити характер  $F_{EMT}$ ,
- в) змінити рушійну силу (тобто змінити  $\Phi_{\delta}$ ) і т.і.

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  $\delta$  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.

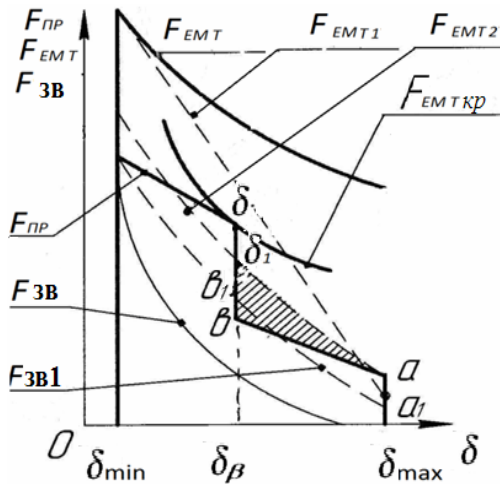


Рисунок 1.14 – Узгодження характеристик реле

## 1.5 Електромагнітні реле постійного струму

Залежно від розташування якоря і характеру впливу на нього магнітного потоку застосовуються такі основні магнітні системи (рис. 1.15). Характерною особливістю схем «б» та «в» є те, що яр (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, 4]. При магнітній системі «г» яр рухається «впоперек» магнітних силових ліній в робочому зазорі. Завдяки цьому можна отримати характеристики спеціального вигляду.

### 1.5.1 Вплив полюсного наконечника на тягову характеристику реле постійного струму

Припустимо, що клапанні електромагніти відрізняються один від одного лише тим, що один має полюсний наконечник діаметром  $d_n$ , а інший не має (рис. 1.16) [15, 21, 25, 27, 30]. Якщо прийняти, що опір сталі  $R_{CT} = 0$ , тоді при великому зазорі при енергетичному підході для електромагніту на рис. 1.16, а маємо

$$F_{EM} = \frac{1}{2} \cdot (I \cdot W)_\delta^2 \cdot \frac{\mu_0 \pi \cdot d^2}{4\delta^2}, \quad (1.22)$$

а для електромагніту на рис. 1.15, б відповідно є

$$F'_{EM} = \frac{1}{2} \cdot (I \cdot W)_\delta^2 \cdot \frac{\mu_0 \pi d_H^2}{4\delta^2}. \quad (1.23)$$

Розділимо рівняння (1.23) на рівняння (1.22), отримаємо:

$$\frac{F'_{EM}}{F_{EM}} = \frac{d_H^2}{d^2}. \quad (1.24)$$

З рівняння (1.24) 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 (1.14)

отримаємо для варіанту конструкції електромагнита без полюсного наконечника (а):

$$F_{EM} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 \frac{\pi d^2}{4}}, \quad (1.25)$$

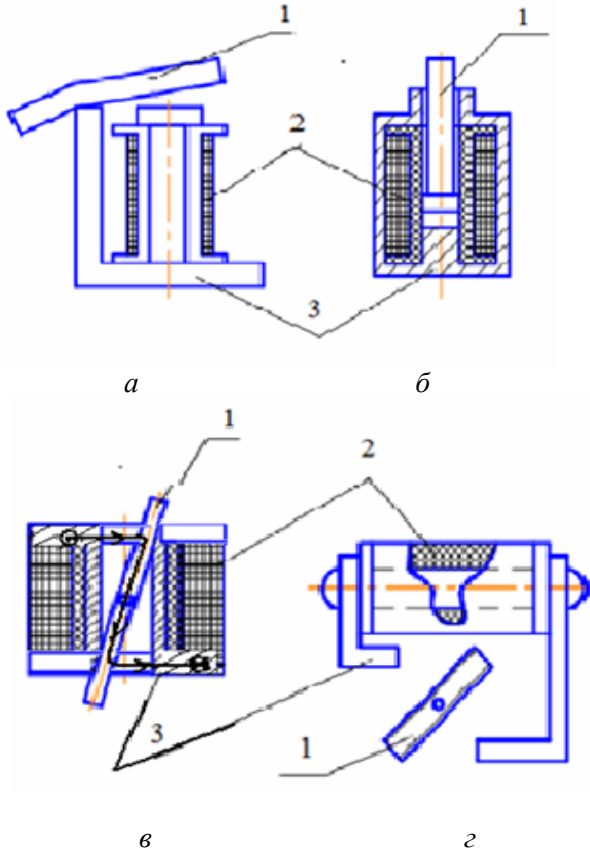


Рисунок 1.15 – Конструкції реле електромагнітних:

*а* – із зовнішнім неврівноваженим якорем клапанного типу; *б* – з якорем соленоїдного типу; *в* – з внутрішньокотушковим урівноваженим якорем; *г* – із зовнішнім урівноваженим якорем поворотного типу, що притягується

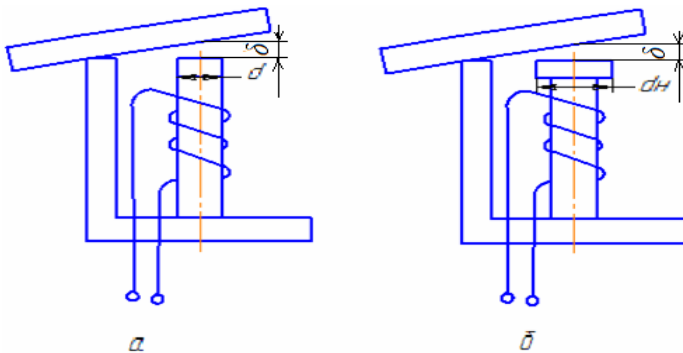


Рисунок 1.16 – До питання призначення полюсного наконечника:  
*a* – схема реле без полюсного наконечника, *б* – з полюсним наконечником.

а для варіанту конструкції (*б*):

$$F'_{EM} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 \frac{\pi d_H^2}{4}}. \quad (1.26)$$

Розділимо рівняння (1.26) на (1.25) і отримаємо:

$$\frac{F'_{EM}}{F_{EM}} = \frac{\frac{\Phi^2}{2\mu_0 \frac{\pi d_H^2}{4}}}{\frac{\Phi^2}{2\mu_0 \frac{\pi d^2}{4}}} = \frac{\Phi^2 \cdot 2\mu_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{\Phi^2 \cdot 2\mu_0 \cdot \frac{\pi d_H^2}{4}} = \frac{d^2}{d_H^2}. \quad (1.27)$$

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. 1.17.

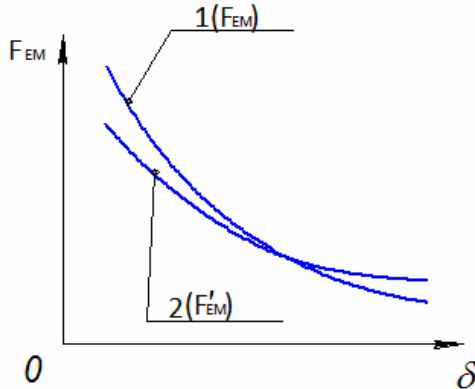


Рисунок 1.17 – Статичні тягові характеристики клапанних електромагнітів постійного струму:  
1 – без полюсного наконечника; 2 – з полюсним наконечником.

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. Треба зауважити, що збільшення діаметру полюсного наконечника доцільно лише до певного значення, оскільки в подальшому із збільшенням діаметру збільшуватимуться втрати від потоків випучування ( $\Phi\sigma$ ).

Прикладом реле постійного струму є конструкція однокотушкового неполяризованого реле з двома перемикальними контактними групами показана на рис. 1.18. Два полюсні наконечники (7)  $L$  – образної форми, плоске осердя (5) і якір (4) з півосями-цапфами, розташованими уздовж короткої осі симетрії якоря. Всі деталі магнітної системи виготовлені з електротехнічної сталі. При збиранні якір 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 нейзільберу. При цьому цапфи якоря входять в отвори стійки і планки, а у початковому положенні якір фіксується поворотною пружиною (9). На осердя (5) розташована котушка (6), а виступаючі кінці осердя приварюються до вільних кінців полюсних наконечників.

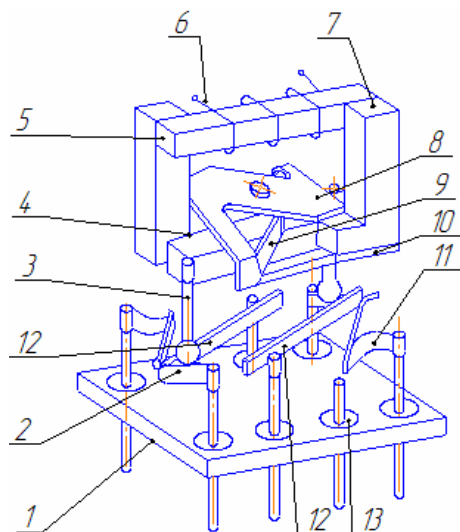


Рисунок 1.18 – Конструкція реле однокотушкового неполяризованого

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

## 1.6 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.

### 1.6.1 Пульсація електромагнітної сили

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

$$\begin{aligned} e &= E_m \cdot \sin \omega t; & u &= U_m \cdot \sin \omega t; \\ i &= I_m \cdot \sin \omega t; & \phi &= \Phi_m \cdot \sin \omega t, \end{aligned}$$

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

Якщо знехтувати нелінійністю магнітного кола, то при синусоїдальній нарузі джерела живлення магнітний потік в робочому зазорі так само змінюється за тим же законом. Згідно з формулою Максвела (1.14), отримаємо:

$$F_{EM} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 S} \cdot \sin^2 \omega t = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} - \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} \cdot \cos 2\omega t. \quad (1.28)$$

Тобто миттєве значення сили представляється у вигляді двох складових: постійної  $\Phi_m^2 / 2\mu_0 S$  та змінної  $(\Phi_m^2 / 2\mu_0 S) \cdot \cos 2\omega t$  (рис. 1.19). Причому остання змінюється з подвійною частотою по відношенню до частоти джерела живлення, яка завжди позитивна  $F_{EM_{CP}} = \Phi^2 / 4\mu_0 S$ . При змінному струмі говорять про силу, яка розвивається електромагнітом, зважаючи на її середнє значення:

$$F_{EM} = F_{EM_{CP}} + F_{EM_{CP}} \cos 2\omega t \quad (1.29)$$

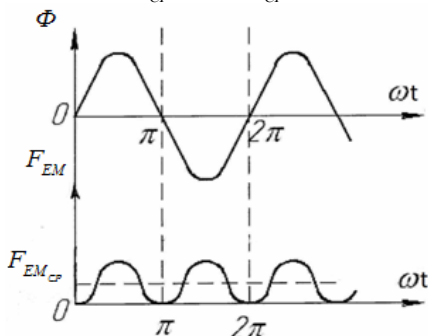


Рисунок 1.19 – Магнітний потік та електромагнітна сила реле змінного струму

За інших рівних умов електромагніт змінного струму розвине зусилля приблизно в два рази менше, ніж електромагніт постійного струму. Дія на яркі пульсуючої сили в процесі спрацьовування мало впливає на характер переміщення через порівняно велику інерційність рухомої системи (рис. 1.20).

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

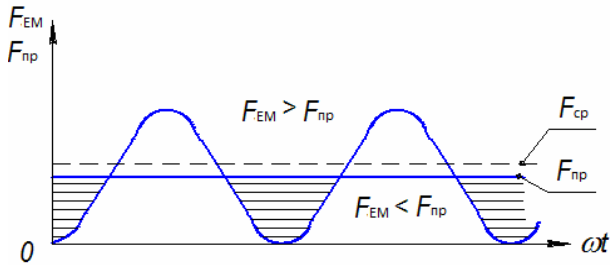


Рисунок 1.20 – Характеристики реле змінного струму

### 1.6.2 Вібрація якоря

Це явище – вкрай небажане і призводить до вібрації контактів, нагріву котушок, розхитування 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. 1.21).

В якості екрана може бути застосована закорочена обмотка, або короткозамкнений виток, який є найбільш поширеним. В магнітному колі він виконує функцію реактивного магнітного опору  $\chi_\mu$ , завдяки чому основний потік  $\Phi$  розділяється на два потоки  $\Phi_e$  і  $\Phi_n$ , зміщені один відносно другого на кут  $\varphi$  (рис.1.21, в).

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  $\Phi_n$  і  $\Phi_e$ , на кут:

$$\varphi = \frac{\text{arctg } X \cdot \mu_{\delta E}}{R_{\delta E}} \quad (1.30)$$

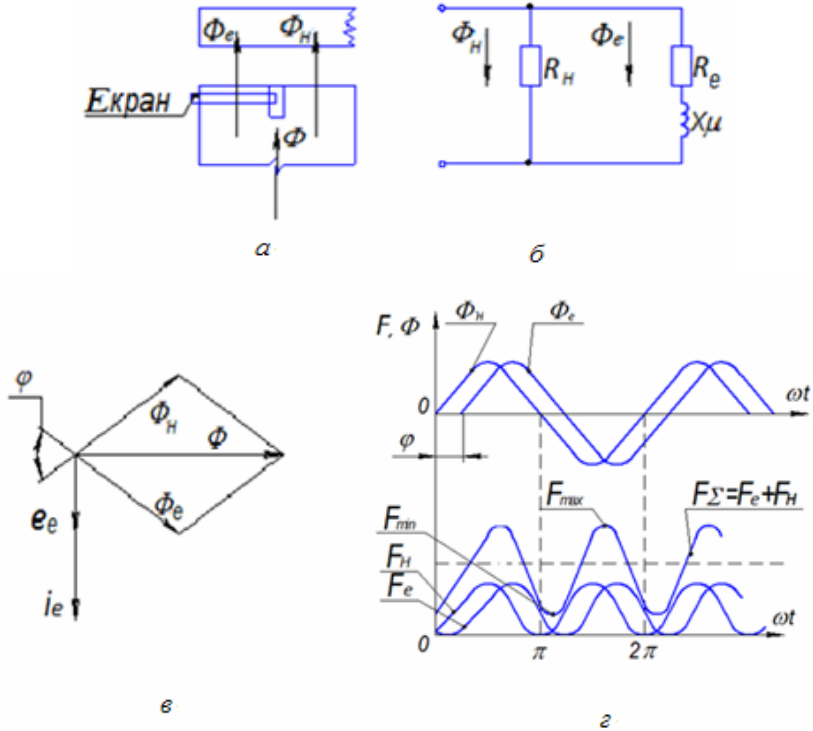


Рисунок 1.21 – Частина магнітної системи з короткозамкненим витком:   
 а – схема принципова екранування полюса для визначення розподілу магнітного потоку;   
 б – схема електрична заміщення магнітного кола;   
 в – векторна діаграма;   
 г – результуюча електромагнітна сила –  $F_{\Sigma}$

В результаті сила  $F_{\Sigma}$ , що переміщує якір, складатиметься з  $F_n$  (неекранованої частини) і  $F_e$  (екранованої частини), та в будь-який момент часу відрізняється від нуля. Амплітуда змінної скла-

дової:

$$F_{\Sigma} = \sqrt{F_{cp,e}^2 + F_{cp,n}^2 + 2F_{cp,e} \cdot F_{cp,n} \cdot \cos 2\varphi} \quad (1.31)$$

Вважається, що оптимальне співвідношення неекранованої частини полюса  $S_H$  та екранованої –  $S_e$ , при якому пульсація мінімальна знаходиться в межах  $S_e/S_H = 0,68...0,80$  (рис. 1.22) [15, 21, 25, 27, 30].

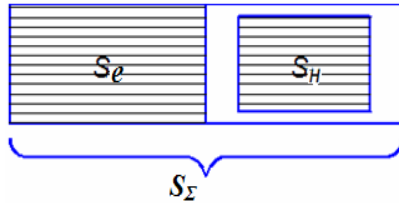


Рисунок 1.22 – Екранування полюсу короткозамкненим витком

## 1.7 Поляризовані електромагнітні реле

Поляризовані реле відносяться до реле постійного струму, зміна стану якого залежить від полярності його вхідної діючої величини [5, 6, 15, 25, 32].

На відміну від нейтральних, вони характеризуються наявністю двох незалежних магнітних потоків – поляризуючого –  $\Phi_n$ , що утворюється зазвичай постійним магнітом, і робочого –  $\Phi_p$ . Завдяки чому дія реле залежить не лише від значення струму в робочій обмотці, але і від його напрямку. При відімкненій робочій обмотці на яркір 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  $P_{сnp}$  ( $P_{сnp} = 10...150$  мкВт) високочутливих реле менше, а швидкодія – вище, ніж у найбільш чутливих нейтральних реле ( $P_{сnp} = 20...100$  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. 1.23): послідовна, диференційна і мостова. В реле з послідовним магнітним ланцюгом (рис. 1.23, а) є лише один шлях замикання

поляризуючого  $\Phi_n$  та робочого  $\Phi_p$  потоків, оскільки джерела МРС включені послідовно, тому опір на шляху  $\Phi_p$  більше. Такі схеми застосовуються рідко. В реле з диференційною магнітною системою (рис. 1.23, б) джерела МРС включені паралельно один одному, і  $\Phi_p$  майже не проходить через постійний магніт. У диференційних схемах на вісь якоря або плоску пружинну підвіску діють великі зусилля через дію електромагнітних сил на яркі. Реле з мостовим колом (рис. 1.23, в) не мають цього недоліку. Джерела МРС включені в діагоналі моста, тому  $\Phi_n$  і  $\Phi_p$  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 двох стабільними, а також відрізняються по типу регулювання. Двохстабільні в свою чергу бувають з двохпозиційним та трьохпозиційним регулюванням.

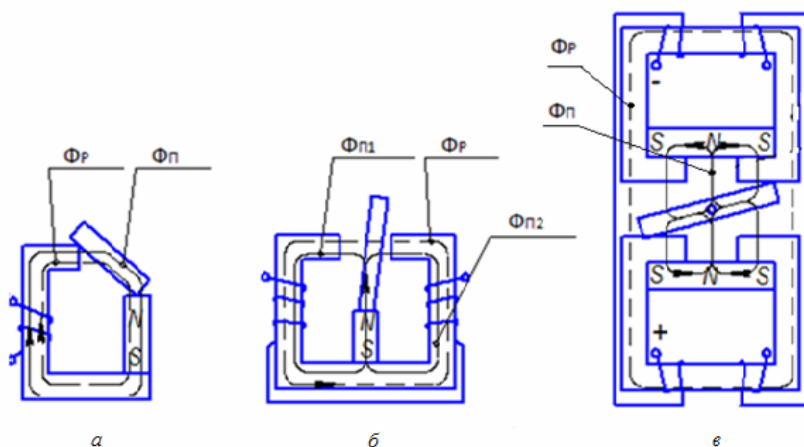


Рисунок 1.24 – Типи магнітних систем поляризованих реле

а – послідовна; б – диференційна; в – мостова

При роботі реле яркі може займати декілька положень, і в двопозиційному регулюванні з переважанням яркі 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 (полюсів), 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 переміщається або вліво, або вправо залежно від напрямку струму [5, 6, 15, 25, 27, 32]. Це досягається закріпленням якоря на достатньо жорсткій підвісній зворотній пружині. Розглянемо електромеханічні характеристики поляризованого реле з паралельним магнітним колом (рис. 1.24).

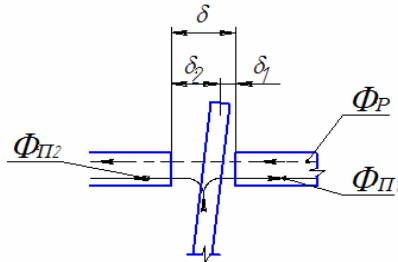


Рисунок 1.24 – Настроювання якоря поляризованого реле  
 $\delta$  – робочий зазор,  $\delta_1$  та  $\delta_2$  – відповідно правий та лівий зазори полюсів реле

На якір 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  $F_{ем}$  буде дорівнювати:  $F_{EM} = F_1 - F_2$ .

Причому, в лівому зазорі  $\delta_2$  робочий  $\Phi_p$  і поляризуючі  $\Phi_{П1}$ ,  $\Phi_{П2}$  потоки складаються, а в правому  $\delta_1$  віднімаються

$$\Phi_1 = \Phi_{П1} - \Phi_p, \quad \Phi_2 = \Phi_{П2} + \Phi_p.$$

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:

$$\Phi_{П} = \Phi_{П1} + \Phi_{П2} = const.$$

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

$$\Phi_P = \frac{I \cdot W_P}{R_{\delta}}, \quad \Phi_{II} = \Phi_{II} \cdot \frac{\delta_2}{\delta}, \quad \Phi_{I2} = \Phi_{II} \cdot \frac{\delta_1}{\delta} \quad (1.32)$$

де  $W_P$  – кількість витків обмотки;

$I$  – струм обмотки.

$\mu_0$  – магнітна постійна;

$S_{\delta}$  – площа робочого зазору.

Відповідно до формули Максвелла (1.14) результуюча сила буде дорівнювати

$$F_{EM} = \frac{(\Phi_{II} - \Phi_P)^2}{2\mu_0 S_{\delta}} - \frac{(\Phi_{II2} + \Phi_P)^2}{2\mu_0 S_{\delta}}. \quad (1.33)$$

Підставимо в рівняння (1.33) складові з формул (1.32) і отримаємо:

$$F_{EM} = \frac{\Phi_{II}^2 (\delta_2 - \delta_1)}{2\mu_0 S_{\delta}} - \frac{\Phi_{II} \cdot (I \cdot W_P)}{\delta}. \quad (1.34)$$

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

$$F_{EM} = \frac{\Phi_{II}^2 \cdot X}{\mu_0 \cdot S_{\delta}} - \frac{\Phi_{II2} \cdot (I \cdot W_P)}{\delta}. \quad (1.35)$$

Побудуємо характеристики реле навантаження  $F=f(IW_P)$  та тягову  $F_{EM}=f(X)$  без врахування опору сталі, потоку розсіяння і витіщення (рис. 1.25).

У реальних умовах, коли враховується опір сталі, потоки розсіяння і випинання, електромеханічні характеристики приймуть нелінійний характер (рис. 1.26).

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.

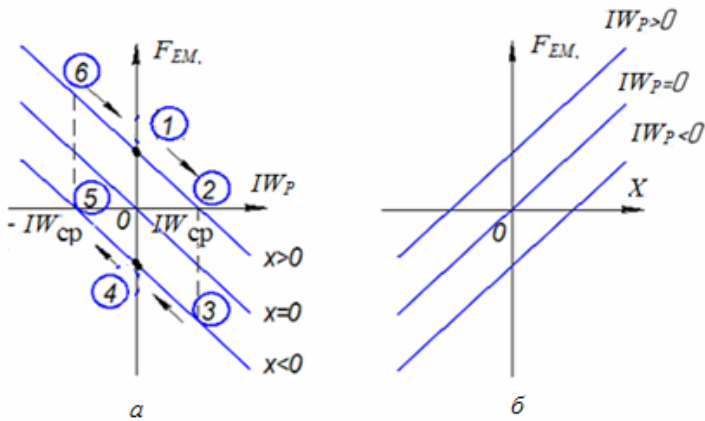


Рисунок 1.25 – Характеристики поляризованого реле:  
 а - характеристика навантаження  $F = f(IW_P)$ ; б - характеристика тягова  $F_{EM} = f(X)$

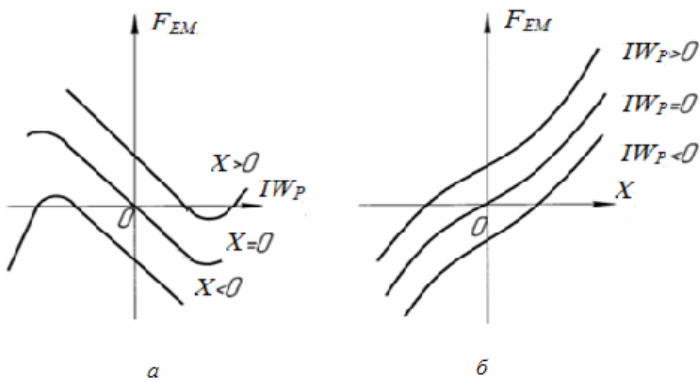


Рисунок 1.26 – Реальні характеристики поляризованого реле:  
 а - характеристика навантаження; б - характеристика тягова

## 1.8 Індукційне реле

Електроμηχανічне реле, робота якого базуються на взаємодії змінних магнітних полів нерухомих обмоток із струмами, що індуктуються цими полями в рухомому елементі [15, 25, 26, 29, 32]. 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, зсунених 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. 1.27). Осердя у магнітної системи з барабанчиком і рамкою застосовується для зменшення магнітного опору на шляху магнітного потоку і виконується з магнітної сталі.

### 1.8.1 Момент обертання індукційної системи

Розглянемо момент обертання на прикладі індукційної системи з диском (рис 1.28). При протіканні по обмоткам змінного струму в повітряних зазорах утворюється магнітне поле зі змінним знаком. Магнітні потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  наводять в диску ЕРС  $E_1$  і  $E_2$ , які визначають струми трансформації  $I_1$  та  $I_2$ . Припустимо, що потоки є синусоїдальними і зсуненими один відносно одного по фазі на кут  $\alpha$ , 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.

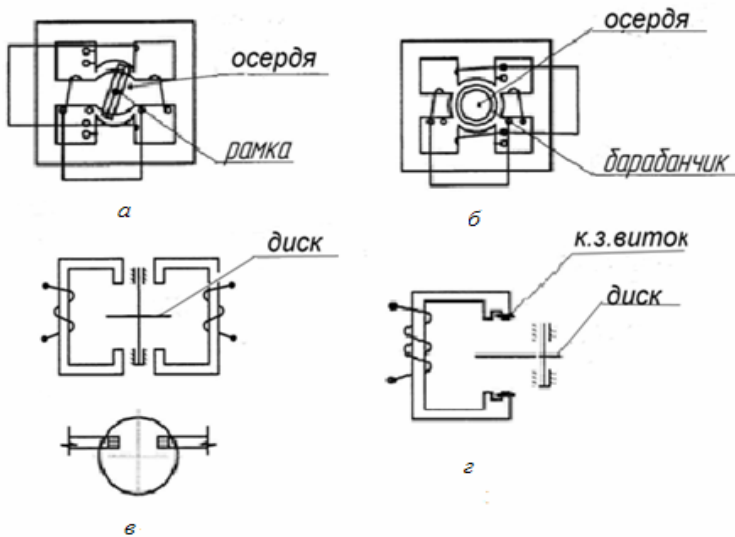


Рисунок 1.27 – Конструкції магнітних систем індукційних реле:  
*а* – з рухомою рамкою; *б* – з барабанчиком; *в* – тангенціальна система з диском і розділеним магнітопроводом; *г* – з диском і КЗ витками на полюсах

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  $90^0$  (рис. 1.28) [15, 25, 26, 29, 32]. 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 зсунені по фазі на кут  $\psi$ , тоді її можна визначити

$$F(t) = l \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \psi) \cdot B_m \cdot \sin \omega t, \quad (1.36)$$

де  $I_m$  – амплітудне значення струму;

$B_m$  – амплітудне значення індукції;

$\Psi$  – кут зсуву між  $I_m$  та  $B_m$ .

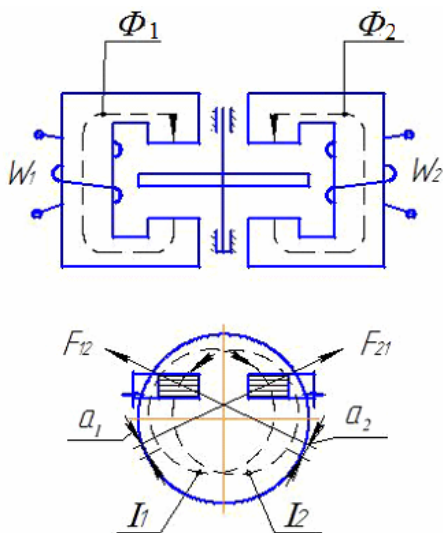


Рисунок 1.28 – Конструкція індукційного реле з диском

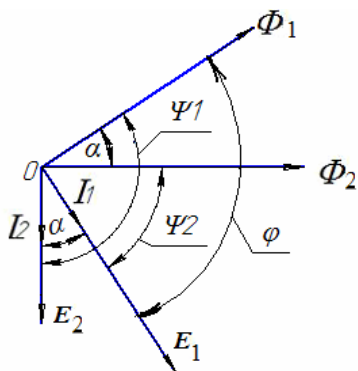


Рисунок 1.29 – Векторна діаграма ЕРС, струмів і магнітних потоків індукційного реле з диском

Тоді середнє значення сили за період  $T$  дорівнює:

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt . \quad (1.37)$$

Підставимо у рівняння (1.38) рівняння (1.37) і отримаємо:

$$F_{cp} = \frac{I_m \cdot B_m \cdot l}{2} \cos \varphi . \quad (1.38)$$

Сумарне зусилля, що діє на диск буде дорівнювати:

$$\Sigma F = F_{11} + F_{12} + F_{22} + F_{21} , \quad (1.39)$$

де  $F_{11}$  – сила взаємодії між потоком  $\Phi_1$  і струмом  $I_1$ ;

$F_{12}$  – сила взаємодії між потоком  $\Phi_1$  і струмом  $I_2$ ;

$F_{22}$  – сила взаємодії між потоком  $\Phi_2$  і струмом  $I_2$ ;

$F_{21}$  – сила взаємодії між потоком  $\Phi_2$  і струмом  $I_1$ .

Внаслідок того, що кут зсуву по фазі між одноіменними потоком і струмом дорівнює  $90^0$  ( $\cos \varphi = \cos 90^0 = 0$ ), то з рівняння (1.39)  $F_{11} = F_{22} = 0$  отримаємо сумарне зусилля:

$$\Sigma F = F_{12} + F_{21} . \quad (1.40)$$

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

$$\Sigma M = F_{12} \cdot a_2 - F_{21} \cdot a_1 , \quad (1.41)$$

де  $a_1, a_2$  – плечі прикладення сил.

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

$$I_{m1} = \frac{2\pi f \cdot \Phi_{m1}}{R_1} , \quad I_{m2} = \frac{2\pi f \cdot \Phi_{m2}}{R_2} \quad (1.42)$$

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  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу диска;

$\Delta$  – товщина диска;

$K_R$  – геометричний коефіцієнт опору.

З векторної діаграми (рис. 1.30) знаходимо  $\cos \psi_1 = -\sin \alpha$ ,  $\cos \psi_2 = \sin \alpha$ , з урахуванням рівнянь (1.40... 1.42) отримаємо для робочого обертового моменту:

$$M_\rho = \frac{f \cdot \Delta}{\rho} \Phi_{m1} \cdot \Phi_{m2} \left( \frac{\pi l_1 a_1 \beta_1}{S_1 K_{R1}} + \frac{\pi l_2 a_2 \beta_2}{S_2 K_{R2}} \right) \cdot \sin \alpha, \quad (1.43)$$

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

$S_1$  і  $S_2$  – площа перетину полюсів;

$\beta_1$  і  $\beta_2$  – коефіцієнти, що враховують частину струму, яка протікає лише під полюсами.

Сума складових в дужках рівняння (1.43) залежить від геометричних співвідношень індукційної системи і називається геометричною постійною:

$$\left( \frac{\pi l_2 a_2 \beta_2}{S_2 K_{R2}} + \frac{\pi l_1 a_1 \beta_1}{S_1 K_{R1}} \right) = x. \quad (1.44)$$

Тоді в загальному вигляді для робочого моменту обертання можна записати:

$$M_\rho = \frac{f \cdot \Delta}{\rho} \cdot x \cdot \Phi_{m1} \cdot \Phi_{m2} \sin \alpha. \quad (1.45)$$

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. 1.30). Природу струмів різання проілюструємо на прикладі рамки, виготовленої з провідника в магнітному полі. При русі контуру змінюється потік, пов'язаний з ним:

$$\Phi_x = B \cdot S_x = B \cdot l \cdot x. \quad (1.46)$$

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

$$e = -\frac{\partial \Phi_x}{\partial t} = -B \cdot l \frac{\partial x}{\partial t} = -B \cdot l \cdot V, \quad (1.47)$$

де  $V$  – швидкість руху контуру.

З формули (1.47) ЕРС різання пропорційна швидкості руху контуру і спрямована таким чином, що його рух пригальмовується. Аналогічна природа струму різання і в диску. Припустимо, що кут зсуву по фазі між потоком і струмом різання дорівнює нулю (рис. 1.31). Тоді в результаті взаємодії між потоками  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ , а також струмами різання  $I_{p1}$  та  $I_{p2}$  створюється момент загальмовування:

$$M_T = K_2 \omega \left( \Phi_{m1}^2 + \Phi_{m2}^2 \right), \quad (1.48)$$

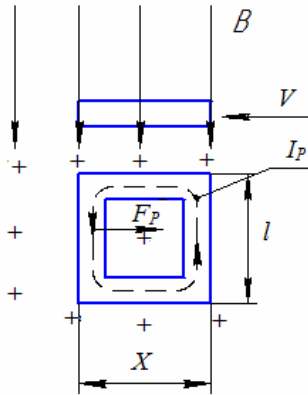


Рисунок 1.30 – Розташування рамки в магнітному полі

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

$\Phi_{m1}, \Phi_{m2}$  – амплітудні значення потоків.

З урахуванням формули (1.48) сумарний обертальний момент, що діє на диск буде визначений

$$M_{OB} = K_1 \cdot \Phi_{m1} \cdot \Phi_{m2} \cdot \sin \alpha - K_2 \omega \left( \Phi_{m1}^2 + \Phi_{m2}^2 \right), \quad (1.49)$$

де  $K_1 = \frac{f \cdot \Delta}{\rho} \cdot x$ ;  $\omega$  – кутова швидкість.

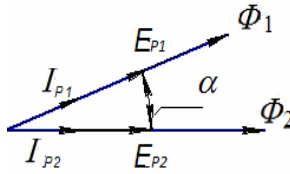


Рисунок 1.31 – Векторна діаграма струмів, ЕРС та потоків

Як випливає з (1.49)  $M_{OB}$  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 потужності (рис. 1.32).

### 1.8.2 Індукційне реле потужності

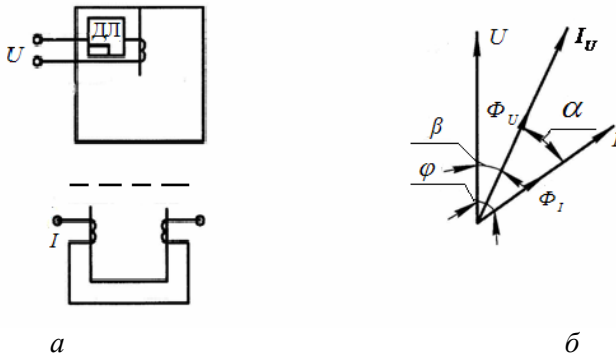


Рисунок 1.32 – Реле потужності з векторною діаграмою його струмів та потоків

Якщо на обмотку верхньої магнітної системи (рис. 1.32, а) подати сигнал, що буде пропорційний напрузі, а на нижні обмотки подати струм, то момент обертання дорівнюватиме  $M = K \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_U \cdot \sin \alpha$ , причому  $\Phi_U \equiv U$ ;  $\Phi_I \equiv I$ . Отже,

$$M \equiv K \cdot U \cdot I \cdot \sin \alpha. \quad (1.50)$$

З векторної діаграми (рис. 1.32, б) отримаємо  $\alpha = \varphi - \beta$ . Тому  $M \equiv K \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi - \beta)$ . Тобто момент пропорційний повній потужності та залежить від кута зсуву  $\varphi$  по фазі між струмом  $I$  і напругою  $U$  та «внутрішнім» кутом  $\beta$ , який в свою чергу залежить від співвідношення активного і реактивного опору кола котушки напруги. Включаючи послідовно з котушкою напруги додатковий ланцюжок (ДЛ) з резистора, конденсатора і дроселя, або їх різних поєднань, можна отримати різний кут  $\beta$ , що дозволить визначити, на яку потужність реагуватиме реле. Для випадку, коли кут  $\alpha = 90^\circ$ , оскільки  $\beta = 90^\circ - \varphi$  (рис.1.33, а), а також  $\sin 90^\circ = 1$ , реле реагуватиме на зміну повної потужності:

$$M \equiv K \cdot U \cdot I . \quad (1.51)$$

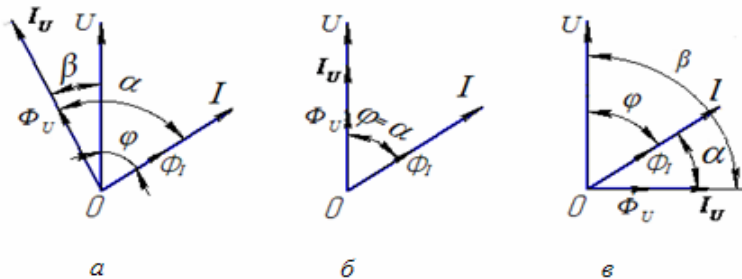


Рисунок 1.33 – Векторні діаграми струмів, потоків і напруг реле потужності

Для випадку, коли кут  $\beta = 0$ ,  $\alpha = \varphi$  (рис.1.33, б), реле реагуватиме на реактивну потужність:

$$M \equiv K \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi . \quad (1.52)$$

Для випадку, коли кут  $\beta = 90^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ - \varphi$ ,  $\sin \alpha = \cos \alpha$ , (рис.1.33, в) реле реагуватиме на активну потужність:

$$M \equiv K \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi . \quad (1.53)$$

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 рухомим алюмінієвим циліндровим ротором або сектором (наприклад, в однофазних реле напружності, 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 автоматичі залізничного транспорту [15, 25, 26, 29, 32].

### 1.9 Магнітоелектричні реле

Магнітоелектричні реле – це електромеханічні реле, робота яких заснована на взаємодії магнітних полів нерухомого постійного магніту та рухомі обмотки, що збуджується струмом. Рухома обмотка виконується у вигляді рамки, на яку намотується обмотка (рис. 1.35) [15, 25, 26, 29, 32].

У повітряному зазорі між полюсами системи (можуть бути виконані з магнітом'якої сталі (рис.1.34, а), або з магнітотвердого матеріалу (рис.1.34, б)) і осердям утворюється магнітне поле, в якому розташовується рухлива рамка. В конструкції для зменшення габаритних розмірів (рис. 1.34, в) осердя відсутнє, а всередині розташований магніт. У конструкції (рис.1.34, г) рамка здійснює поступальний рух. Якщо на рамку подавати змінний в часі сигнал, то через невелику масу рамка знаходитиметься в коливальному русі, тому магнітоелектричні системи на змінному струмі не застосовуються.

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

$$M_{OB} = 2 \cdot B \cdot I_P \cdot l \cdot W \cdot a , \quad (1.54)$$

де  $B$  – індукція магнітного поля в зазорі;

$I$  – струм рамки;

$l$  – ширина полюсів;

$W$  – число витків рамки;

$a$  – плече сили.

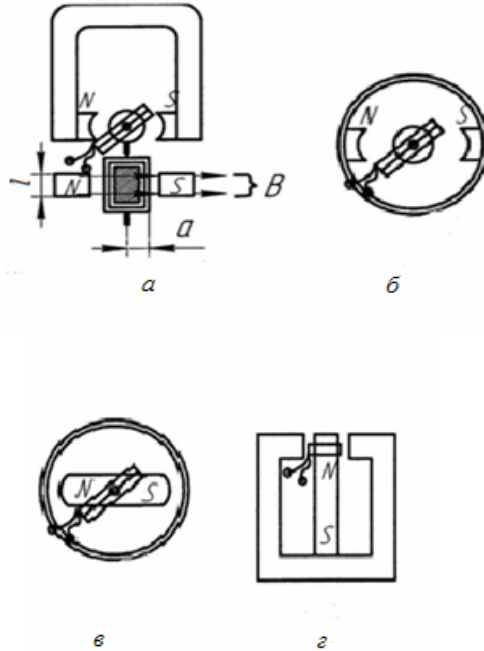


Рисунок 1.34 – Конструкції магнітоелектричних реле електромагнітне:  
*a* – з підковоподібним магнітопроводом; *б* – з кільцевим магнітопроводом;  
*в* – з внутрішнім розташуванням магніту; *г* – з поступальною ходою рамки

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.

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

де  $r_p, r$  – опори відповідно рамки та кола живлення;  
 $\varphi$  – 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, то-

му його слід враховувати:  $\sum M = M_{OB} + M_G$ . Напрямок обертання рамки для системи з поступальним рухом визначається за правилом лівої руки [25]. 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 до 0,2 с. Зазвичай знаходять застосування як нуль-індикатори в схемах на випрямленому струмі, й досі знаходяться в експлуатації.

### 1.10 Електродинамічне реле

Електродинамічне реле, робота якого заснована на взаємодії магнітних полів рухливої і нерухомої обмоток, що збуджуються струмами, підведеними ззовні (рис. 1.36) має дві котушки [15, 25, 26, 29, 32]. Одна 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 таким чином (рис. 1.35).

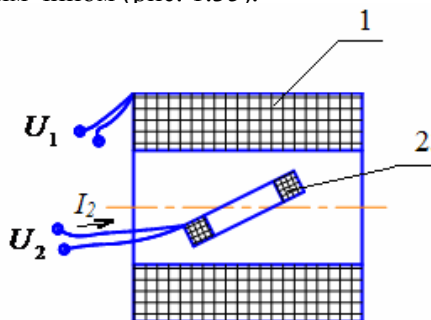


Рисунок 1.35 – Принцип дії електродинамічне реле

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:

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l_2 \cdot W_2, \quad (1.55)$$

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.

Сила при змінному струмі:

$$F = \frac{B_{m1} \cdot I_{m2} \cdot l_2 \cdot W_2}{2} \cdot \cos\varphi, \quad (1.56)$$

де  $B_{m1}$  – максимальна індукція поля в зазорі;

$I_{m2}$  – максимальний струм рухомої котушки;

$\varphi$  – кут зсуву по фазі між комплексними векторами  $\vec{B}$ ,  $\vec{I}$ .

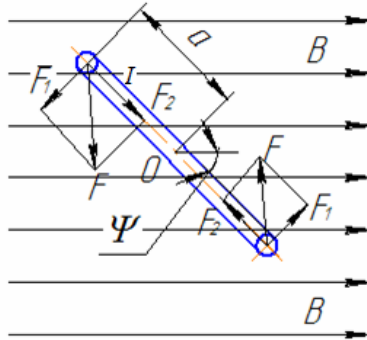


Рисунок 1.36 – Визначення сили  $F$  і моменту обертання  $M$  рухомої котушки в магнітному полі

Нормальна складова сили:

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

де  $\psi$  – кут повороту рамки.

Тоді момент обертання при постійному струмі буде рівний:

$$M = F \cdot a \cdot \cos\psi = B_1 \cdot I_2 \cdot l_2 \cdot W_2 \cdot a \cdot \cos\psi, \quad (1.57)$$

де  $a$  – плече сили.

Обертальний момент на змінному струмі рівний:

$$M_{cp} = F \cdot a \cdot \cos\varphi \cdot \cos\psi = \frac{B_1 \cdot I_2 \cdot l_2 \cdot W_2}{2} \cdot a \cdot \cos\varphi \cdot \cos\psi. \quad (1.58)$$

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 максимальний, коли комплексні вектори індукції  $\vec{B}_1$  і струму  $\vec{I}_2$  збігаються за фазою [15, 25, 26, 29, 32].

### 1.11 Теплові реле (термореле)

Довготривалі струми перевантаження (до 5...7  $I_{\text{НОМ}}$ ) доволі перегрівають електрообладнання, тому для його автоматичного захисту при перевищенні допустимої температури існують апарати теплового захисту з термобіметалічним механізмом спрацьовування [38, 39, 40]. Такими є електромеханічні реле, які спрацьовують при визначеній температурі вимірювального елемента (рис. 1.37, а). Вимірювальний елемент нагрівається струмом, що протікає крізь цей елемент (прямий нагрів), або крізь окремий нагрівач (непрямий або косвений нагрів) (рис. 1.37, 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  $\alpha_1$  (1 на рис. 1.37, а), а шар термоінертного металу з коефіцієнтом  $\alpha_2$  (2 на рис. 1.37, а) майже не деформується. Пластина з більшим  $\alpha$  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). Якщо один кінець біметалевої пластини жорстко закріпити, інший вільний кінець має можливість вигинатися. Максимальне вигинання складе в цьому випадку

$$\beta = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{l^2 \theta}{\delta},$$

де  $l$  – довжина біметалевої пластини;

$\theta$  – перевищення температури біметалевої пластини над температурою навколишнього середовища;  
 $\delta$  - сумарна товщина біметалевої пластини.

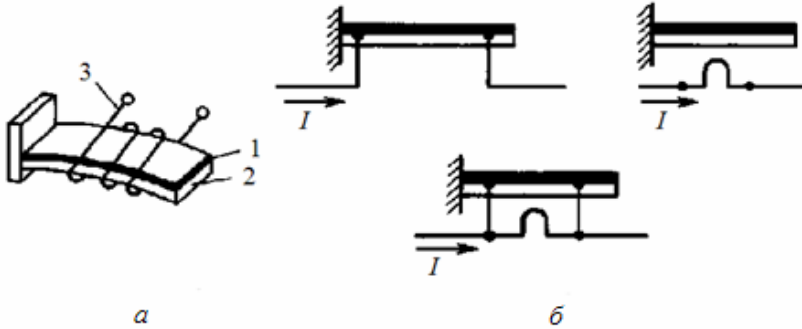


Рисунок 1.37 – Біметалева пластина з нагрівальним елементом (а) та способи їх нагрівання (б)

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. 1.38. 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. 1.39. На рис. 1.39, а) захід, коли пластини біметалу, при різних коефіцієнтах розширення  $\alpha$  (від температури довкілля), прогинатимуться в ту або іншу сторону на одне і теж значення (зберігаючи значення  $\beta$  постійним) і лише струм, який протікає обмоткою, змусить контакти замкнутися, та на рис. б) – це, коли при різних коефіцієнтах  $\alpha$  біметалеві пластини вигинатимуться в різні сторони, а ізоляційна пластина (1) збереже  $\beta_1$  і  $\beta_2$  незмінними. Спрацьовує реле від сигналів, що поступають в обмотки  $W_1$  і  $W_2$ .

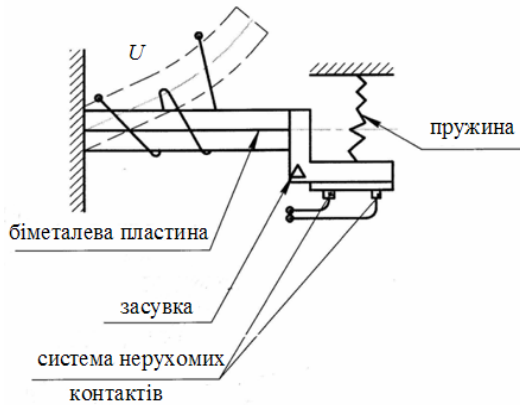


Рисунок 1.38 – Принцип конструкції теплових реле

При конструюванні термореле з біметалами потрібно враховувати явище гістерезису, що викликає залишкову деформацію навіть при допустимих, але тривалих за часом, температурних дій.

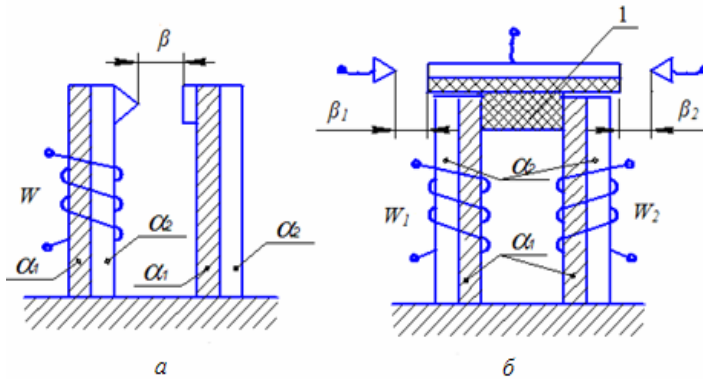


Рисунок 1.39 – Способи компенсації температури навколишнього середовища в термореле

## 1.12 Особливості вибору і тенденції розвитку електроме-ханічних реле

Різноманіття типів і конструкцій реле ставить питання про техніко-економічну раціональність використання того чи іншого типу реле для реалізації необхідних функціональних задач в кон-кретних умовах експлуатації [2, 3, 24, 41, 42, 43]. На етапі

проекування реле або апаратури, де буде встановитися, ре-ле, формулюються загальні вимоги по чутливості, швидкодії, час-тоті та діапазону комутації і таке інше. Вимоги до надійності можна оцінити формулою:

$$\lambda = \frac{\ln P}{n \cdot N \cdot k}, \quad (1.59)$$

- де  $P$  – вірогідність безвідмовної роботи;  
 $n$  – необхідне число реле;  
 $N$  – необхідне число спрацьовувань;  
 $k$  – число контактних пар.

Рекомендується передбачати експлуатаційні запаси за допо-могою коефіцієнта використання  $k_e$ , який по суті є співвідношен-ням поточного параметра апарата до максимально допустимого його значення відповідно до технічної документації (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Рекомендовані значення  $k_u$

Параметр	$K_e$	Параметр	$K_e$
1. Тривалість безпере-рвного знаходження обмотки під струмом	0.8	5. Комутаційний струм при навантаженні:	
2. Число спрацьову-вань	0.7	активному	0.9
3. Напруга, що кому-тується	1.0	ємнісному	0.7
4. Підвищена темпера-тура та вологість	0.8	індуктивному	0.5
		6. Напруга живлення	0.9

За конструктивним виконанням перевага має бути за герметичними реле, особливо для умов вологого середовища і зниженої температури експлуатації, для запобігання утворення непродливних плівок на контактах, швидкого старіння ізоляції і т. і.

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 плівки).

В теперішній час розвиток електромеханічних реле на традиційних принципах конструювання наблизився до межі технічних можливостей.

Прогнозована оцінка еволюційного розвитку реле на струми до 10 А [24] складає

$$Q = \frac{P_{k\max} \cdot N}{V}, \quad (1.60)$$

де  $P_{k\max}$  – максимальна потужність, що комується, Вт;

$N$  – число спрацьовувань, кількість;

$V$  – об'єм реле, см<sup>3</sup>.

Цей показник ще наприкінці минулого століття швидко зростає 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

9,53×9,53×6,99 мм<sup>3</sup> (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.

## 1.13 Герконові реле

### 1.13.1 Герметизовані магнітокеровані контакти і 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 [3, 14, 19,25, 26, 29, 33, 36]. 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 і схемних задач;

- підвищити швидкість до 0,5 мс, мати перехідний опір  $R_{Д}$  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. 1.40 представлений ескіз симетричного геркона.

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 впаєні 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. Цей геркон розташований в коло керування- котушку 4. Пермалої – це сплави заліза та нікелю, які мають велику початкову магнітну проникність в області слабких магнітних полей, що пов'язана з практичною відсутністю анізотропії і магніострикції.

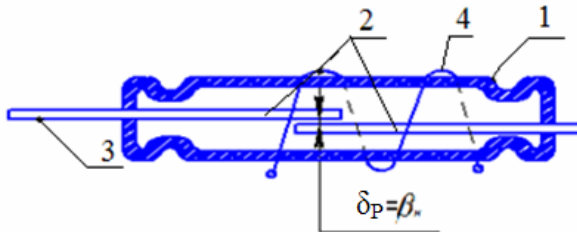


Рисунок 1.40 – Ескіз симетричного магнітокерovanого контакту, що замикає

Комутуючі частини контакт-деталей (рис. 1.41) покриваються шаром благородних металів ( $R_{II} = const$ ), 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 сумішшю), 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].

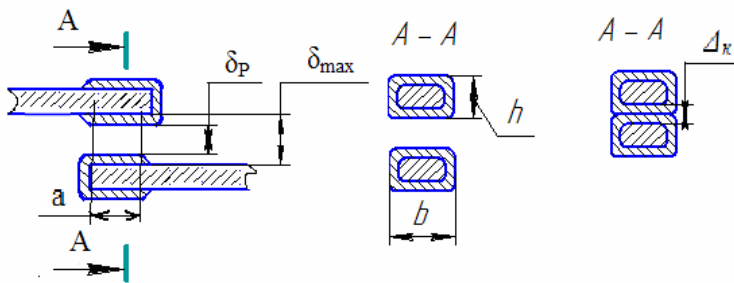


Рисунок 1.41 – Розімкнене та замкнене положення контактної частини замикального геркона:

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

У контактному зазорі  $\delta_{max}$  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. 1.42), на якій лінії, що відділяють одні характерні ділянки поля від інших, називаються сепаратрисами.

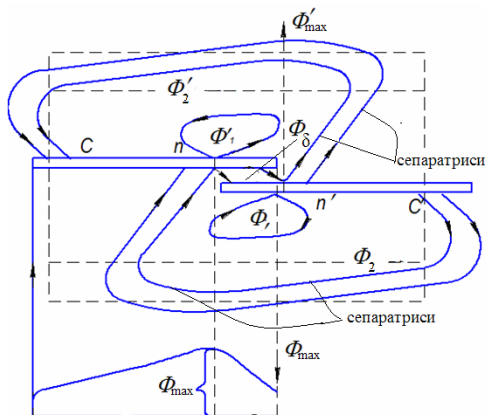


Рисунок 1.42 – Розподіл магнітного поля контакт-деталі.

Максимальний потік складається з наступних потоків:

$$\Phi_{\max} = \Phi'_{\max} = \Phi_{\delta} + K_1 \cdot \Phi_1 + K_2 \cdot \Phi_2, \quad (1.61)$$

де  $\Phi_{\delta}$  – 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.

### 1.13.2 Механічна (протидіюча) і тягова характеристики геркона

Магнітні потоки  $\Phi$  та тягове зусилля  $F$  є головними характеристиками, за якими можна оцінити чутливість та розрахувати параметри керування. Тягове зусилля визначається за формулою Максвелла:

$$F_{EM.m} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S_{\delta}}, \quad (1.62)$$

де  $S_{\delta}$  – площа поперечного перетину робочого зазору.

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

$$F = c \cdot x = c (\delta - \delta_0) \cdot K_{CM}, \quad (1.63)$$

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. 1.43 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,  $\Phi_1$ ) і носить характер попереднього їх наближення.

Протягом збільшення напруженості магнітного потоку до  $\Phi_{KP}$  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.і.).

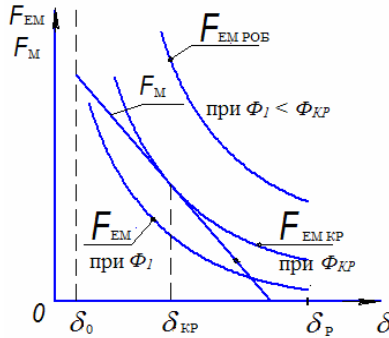


Рисунок 1.43 – Характеристики герконового реле

Потік  $\Phi_{KP}$  відповідає критичній величині  $\delta_{KP}$  робочого зазору і для наближених розрахунків для симетричних герконів можна прийняти

$$\delta_{KP} = \frac{1}{2} \delta_P, \quad (1.64)$$

де  $\delta_P$  – робочий зазор.

### 1.13.3 Засоби керування реле на геконах

Розглянемо декілька засобів керування геконовими реле, такими як:

- лінійне або кутове переміщення геркону або постійного магніту (рис. 1.44, 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. 1.44, б);
- зміна намагнічувальної сили за допомогою обмоток керування (рис. 1.44, в, 1.45, 1.46 і 1.47).

При наявності однієї обмотки в колі керування (рис. 1.45) вона розвиває достатньо велику силу  $F_{роб}$ , яка забезпечує надійне спрацьовування геркона, і утримує його контакти в замкненому стані за умови всіх, заздалегідь обумовлених умовах експлуатації.

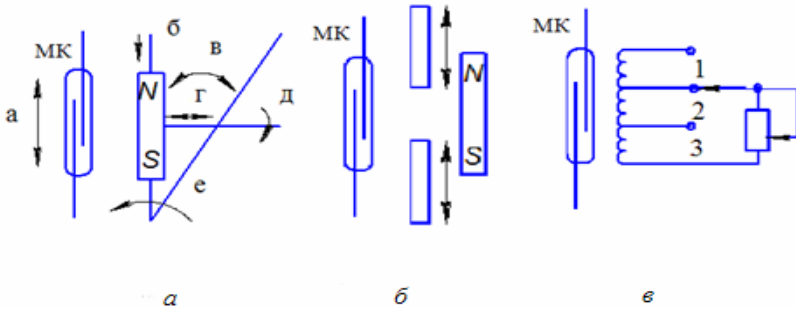


Рисунок 1.44 – Засоби та схеми керування герконовими реле

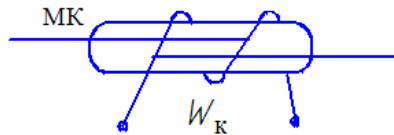


Рисунок 1.45 – Система керування реле на герконах за допомогою обмотки

При наявності двох обмоток керування, які мають зсув відносно робочого зазору (рис. 1.46), можна реалізувати логічну функцію «АБО» (якщо МРС обмоток  $F_1 = F_2 \geq F_{cnp}$ ), чи функцію «І» (якщо  $F_1, F_2 < F_{cnp}$ ) при цьому спрацьовування буде лише за умови  $F_1 + F_2 \geq F_{cnp}$ . Таке розташування не дозволяє задавати значний коефіцієнт запасу по спрацьовуванню -  $K_{зан}$ . Дійсно, якщо робоча сила  $F_{роб}$  є МРС двох обмоток, тоді  $F_{роб} = F_1 + F_2 = F_{cnp} \cdot K_{зан}$ , 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  $\Phi_n < \Phi_{відн}$ , що забезпечуватиме відпускання геркона за умови знімання сигналу з основної керуючої обмотки. Для реалізації функції «НІ» обмотки включаються зустрічно.

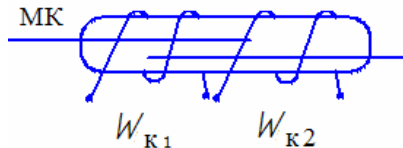


Рисунок 1.46 – Реле на герконах. Система управління. Схема принципова

Для реалізації різних логічних функцій геркони з декількома контакт-деталлями мають декілька обмоток (рис. 1.47). 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  $I$  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 протікаючих крізь них магнітних потоків.

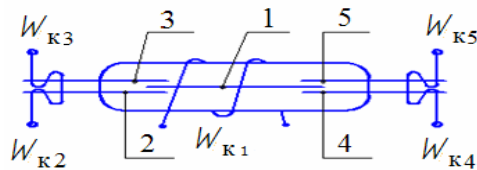


Рисунок 1.47 – Реле на герконах. Система управління. Схема принципова

### 1.13.4 Фериди

Для різноманітних систем автоматики та для забезпечення швидкодії були розроблені електромеханічні магнітокервані контактні пристрої, що запам'ятовують, або фериди – електричні апарати, що складаються з геркона і магнітопровода з елементом магнітної пам'яті (ЕМП). ЕМП виконується із середньокоерцитивних ( $H_C = 2 \dots 6$  кА/м) металевих феромагнетиків з великим значенням залишкової індукції ( $B_{r0} = 1,6 \dots 1,8$  Тл) і коефіцієнтом прямокутності петлі гістерезиса, що дорівнює  $0,85 \dots 0,9$  [3, 8, 10, 14, 15]. 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. 1.48). Якщо роль магнітної пам'яті виконують контакт-деталі, або їх частини, то ферид називається з внутрішньою пам'яттю (гезакон) (рис. 1.49). Таким чином, в гезаконі поєднується в одному контактна система, струмопровід, магнітопровід і електромагнітна пам'ять.

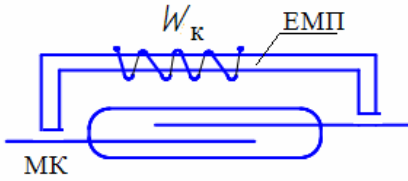


Рисунок 1.48 – Ферид із зовнішньою пам'яттю. Схема принципова

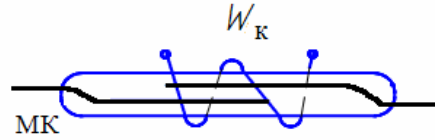


Рисунок 1.49 – Ферид із внутрішньою пам'яттю. Схема принципова

В обох схемах магнітна пам'ять створюється та руйнується за допомогою відповідних імпульсів струму (рис. 1.50).

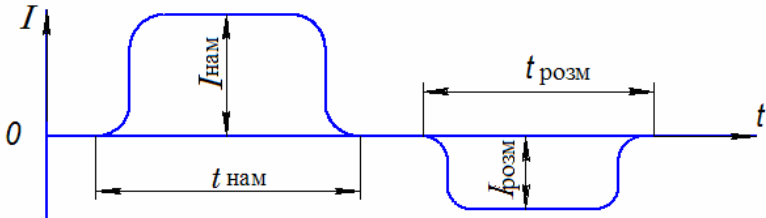


Рисунок 1.50 – Імпульси керування найпростішими феридами

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

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. 1.51). 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. 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. а), магнітні потоки в контакт-деталі взаємно компенсуються. Осердя намагнічуються протилежними знаками, і контакт-деталі розмикаються. Всі перелічені ферида мають однакову особливість – при їх керуванні необхідне перемагнічування в протилежних напрямках переважно по повному циклу петлі гистерезиса хоча б однієї частини електромагнітної пам'яті. Третій спосіб реалізується послідовним феридом. Четвертий спосіб не отримав широкого розповсюдження.

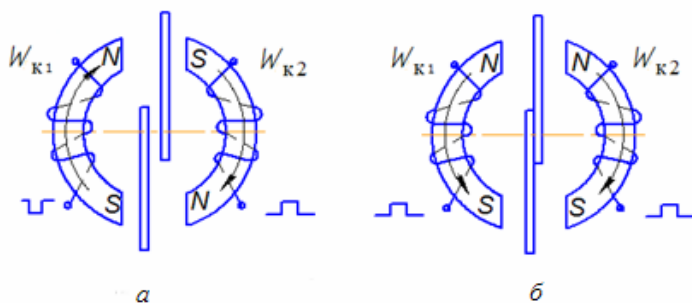


Рисунок 1.51 – Принцип дії паралельного ферида. Шунтування ділянок ЕМП:

а – відключений стан; б – включений стан.

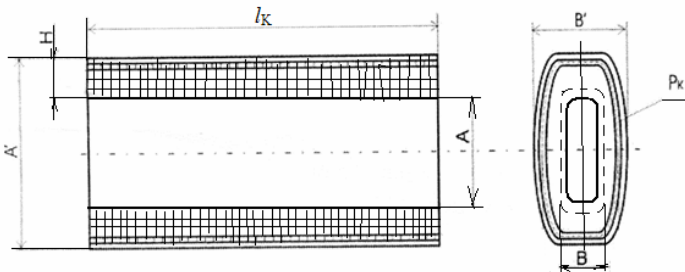
### 1.14 Контрольні питання та задачі

1. Як визначити електромагнітну силу (фізичний та енергетичний підходи)?
2. Реле електромагнітне. Призначення. Основні характеристики. Конструктивні елементи.
3. Електромеханічні, логічні та вимірювальні реле.

4. Протидіюча і тягова характеристика реле. Узгодженість цих характеристик. Характеристика відпускання.
5. Вплив полюсного наконечника на перерозподіл електромагнітної сили.
6. Відмінність електромагнітного реле змінного струму від постійного. Вібрація якоря.
7. Контактні системи реле. Матеріали малопотужних розривних контактів з благородних та тугоплавких металів – платиноїдів.
8. Поляризовані електромагнітні реле. Робочий цикл.
9. Індукційне реле. Призначення. Визначення моменту обертання.
10. Реле струму, напруги, потужності і опору індукційної системи. Методи підвищення чутливості і швидкодії реле.
11. Магнітоелектричні реле. Конструкції. Визначення моментів обертання та гальмування. Чому ця система не застосовується на змінному струмі?
12. Електродинамічне реле. Сила та момент обертання на постійному та змінному струмі. Фазочутливість. Магнітогідродинамічна система, як різновидність електродинамічної.
13. Феродинамічне реле з обертальним та поступовим рухами. Визначення моменту обертання на постійному та змінному струмі.
14. Теплові (термо-) реле. Чому не можна розташувати контакти на біметалевій пластині? Компенсація реакції на температуру навколишнього середовища.
15. Особливості вибору і тенденція розвитку електродинамічних реле. Прогнозована оцінка розвитку. Побудова спільних схем реле з інтегральними мікросхемами.
16. Герметизовані магнітокеровані контакти (геркони). Побудова та основні характеристики.
17. Реле змінного струму на герконах.
18. Способи керування герконами. Реалізація логічних функцій. Логічні матричні реле.
19. Ферриди з зовнішньою та внутрішньою пам'яттю. Способи, що усувають помилкове спрацювання. Паралельний феррид з диференційним керуванням.
20. Особливості спільної роботи декількох герконів в одній обмотці керування.
21. **Задача 1.** Розрахувати тягову характеристику електромагніта клапанного типу реле постійного струму за допомогою енергетичної формули. Вихідні дані для розрахунку: МРС котушки

$F_{НОМ}=280\text{А}$ , критична МРС  $F_K=0,65\cdot F_{НОМ}=182\text{А}$ , повітряний зазор  $\delta=1,1\cdot 10^{-3}\text{м}$ . Криві намагнічування електромагніта взяті з довідкової літератури.

22. **Задача 2.** Розрахувати котушку керування герконового реле (ескіз котушки представлений на рис. 1.52), 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  $^{\circ}\text{К}$  до 328  $^{\circ}\text{К}$ , 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 1.52 – Ескіз котушки реле на герконах

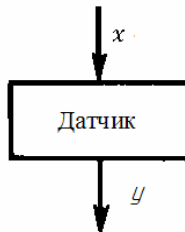
23. **Задача 3.** Визначити розміри екрануючого витка електромагнітного реле змінного струму при заданих: квадратному перетині полюса  $S=1,2\cdot 10^{-4}\text{ м}^2$ , температурі нагрівання витка 170  $^{\circ}\text{С}$ , ширина паза  $\Delta=2,1\cdot 10^{-3}\text{ м}$ , коефіцієнт заповнення сталі дорівнює  $K_{зс}=0,91$ .

24. **Задача 4.** Розрахувати реостатний датчик переміщення і зобразити ескіз цього датчика, при заданих: довжині намотування на каркас  $l=40\text{ мм}$ , нижній межі температури корпусу  $\Theta=20\text{ }^{\circ}\text{С}$ , максимальній температурі навколишнього середовища  $\Theta_{max}=40\text{ }^{\circ}\text{С}$ , опір обмотки  $R=800\text{ Ом}$ , струм обмотки  $I=0,01\text{ А}$ , матеріал обмотки ніхром Х15Н60.

## 2 ДАТЧИКИ КОНТРОЛЮ І РЕГУЛЮВАННЯ. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Датчик – 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 (рис. 2.1 і 2.2).

Вхідна змінна, що  
контролюється або регулюється



Вихідний  
електричний сигнал

Рисунок 2.1 – Характеристики вхідних та вихідних сигналів датчиків

Розрізняють дві основні форми сигналів:

- безперервну, яка відбиває певний фізичний процес, інформація про який визначається певними інформативними параметрами: струму, частоти, фази та іншими (рис 2.2, а) [25];
- дискретну (кодовану), при якій носіями інформації є кількість елементів кода, їх розподіл в часі, або в просторі (рис. 2.2, б).

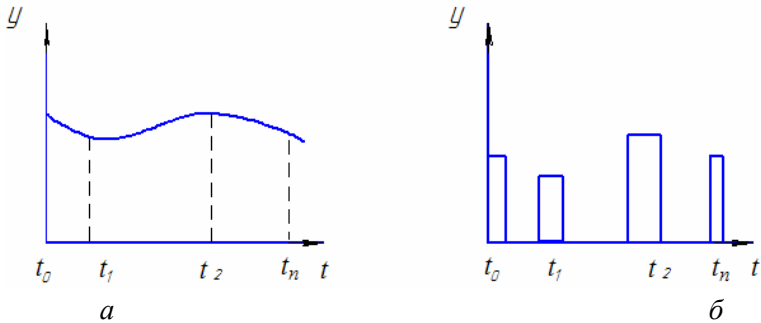


Рисунок 2.2 – Характеристики датчиків при безперервному (а) та дискретному (б) вихідних сигналах

Датчики доповнюють і розширюють можливості відчуттів і почуттів людини. Між будь-якою технічною системою (автоматом, роботом) і біологічною системою (людина) існує аналогія (рис. 2.3). 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 2.3 – Аналогія функціонального зв'язку між процесами отримання, обробки і перетворення сигналів в біологічних (людина) і технічних (автомат) системах

- 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.і.

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.і.);
- 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 і т.д.);
- 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, селени, 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:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} . \quad (2.1)$$

Відносна чутливість – за такою формулою:

$$S_{ВІД} = \frac{\Delta y \cdot x}{\Delta x \cdot y} , \quad (2.2)$$

де  $x$  і  $y$  – повні змінення вхідної та вихідної величин.

Якщо  $S = const$ , тоді датчик є «лінійним», якщо ж  $S = var$ , датчик є «нелінійним». Тривалість перехідного процесу визначається швидкодією.

Повна похибка  $\Delta P$  датчика визначається як:

$$\Delta P = \pm(\Delta X_A + \gamma_S), \quad (2.3)$$

де  $\Delta X_A$  – адитивна похибка, яка не залежить від вхідної величини, джерелом її служать зовнішні наведення, втрати в схемах, шуми схемних елементів і таке інше;

$\gamma_S$  – мультиплікативна похибка, яка залежить від вхідної величини, джерелом її є нестабільність і невідповідність номінальним значенням коефіцієнтів передач окремих функціональних вузлів і т. і.

## 2.1 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. 2.4). 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.

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.

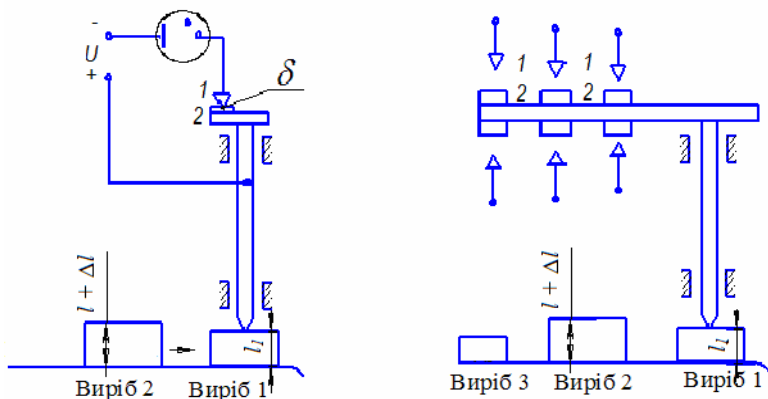


Рисунок 2.4 – Схема принципова дії контактних датчиків для контролю розмірів деталей:

*а* - одноможевий контактний датчик;  
*б* - багатоможевий контактний датчик.

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.

## 2.2 Потенціометричні датчики

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 опороми:

- 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 ( $Cn + Ni + Mn$ )  $\rho = 0,42 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ;
- 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, напиле-

ний ізоляційними окислами (наприклад,  $Al_2O_3$ ), які добре відводять тепло. Повзунки зазвичай виготовляють зі сплавів паладія з іридієм, сріблом, або кобальта ( $Pd + Ir$ ,  $Pd + Ag$ ,  $Pd + Ag + Co$ ) та інші. Задля забезпечення контакту у момент переміщення з витка на виток, повзунк має торкатися одночасно попереднього витка і наступного (рис 2.5).

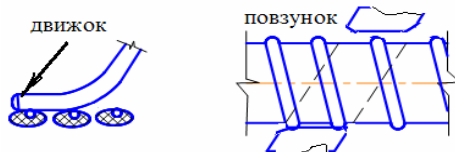


Рисунок 2.5 – Принцип дії потенціометричного датчика

З різноманітних існуючих схем комутації найбільшого поширення набула проста схема (рис 2.6).

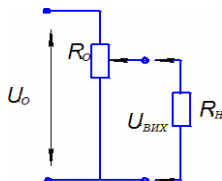


Рисунок 2.6 – Схема електрична підключення датчика переміщення

Якщо переріз каркаса, на який намотаний дріт, однаковий по всій довжині, то опір датчика змінюється пропорційно куту повороту  $\alpha$ , або переміщення  $x$ . Якщо вхідний опір у схемі, параметри якої вимірюються, має велике значення, то вихідна напруга  $U_{вих}$  залежатиме лише від куту повороту  $\alpha$ , або лінійного переміщення  $x$ , і не залежатиме від опору  $R_0$ .

$$U_{вих} = \frac{U_0}{\alpha_{max}} \cdot \alpha, \quad U_{вих} = \frac{U_0}{x_{max}} \cdot x, \quad (2.4)$$

де  $\alpha_{max}$  – максимальний кут повороту;

$x_{max}$  - максимальне переміщення повзунка.

Чутливість датчика з лінійним переміщенням рухомого контакту визначається як

$$S_D = \frac{dU_{вих}}{dx} = \frac{U_0}{x_{max}}. \quad (2.5)$$

Для підвищення чутливості датчиків зазвичай збільшують напругу живлення  $U_0$ , проте, при цьому підвищується потужність, що розсіюється датчиком.

Максимальна чутливість  $S_{max}$  дорівнює:

$$S_{max} = \frac{\sqrt{P_{max} \cdot R_0}}{x_{max}}, \quad (2.6)$$

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. 2.7) напруга дровових 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» (а – б – в – г). Тоді відхилення вихідної напруги від розрахункової через перестрибування по сходах 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 сходами, було введено розуміння електричної здатності розрізювання потенціометром  $\delta_p$ , (%). Це є величина приросту опору або напруги при переміщенні повзунка потенціометра на один виток. Вона визначає максимально можливу точність (безпомилковість) роботи потенціометричного датчика.

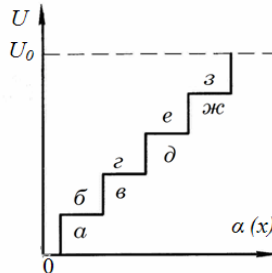


Рисунок 2.7 – Характеристика провідникових датчиків при зміні довжини переміщення або кута повороту

Для покращення здатності розрізнювання потенціометра збільшують число витків  $n$ . Цього можна досягти або шляхом подовження обмотки, або зменшенням перетину безпосередньо дроту. Проте, перший варіант приводить до збільшення розмірів потенціометра, а другий – до зменшення механічної міцності провідника, а також технологічним труднощам виготовлення потенціометра і т. і. Однообертові потенціометри мають значення  $\delta_p = (0,02...0,4)\%$ . Для зміни  $\delta_p$  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. 2.8). Основою каркасних датчиків [25] (рис. 2.8, а – г) є високоомний дріт, який виконує функцію опору.

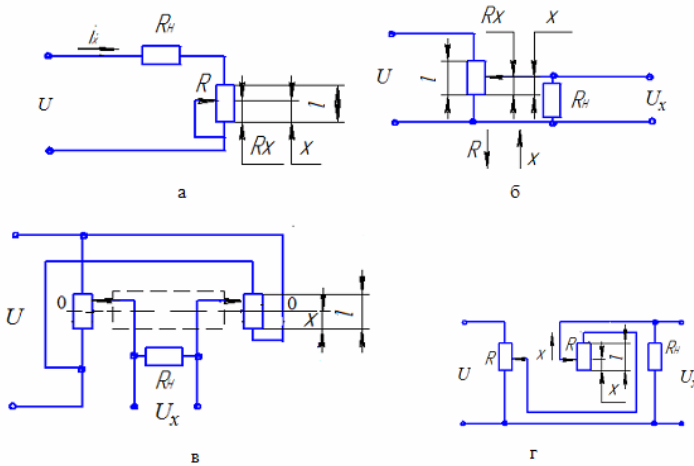


Рисунок 2.8 – Датчики положення резистивні каркасні.  
Схеми електричні принципи

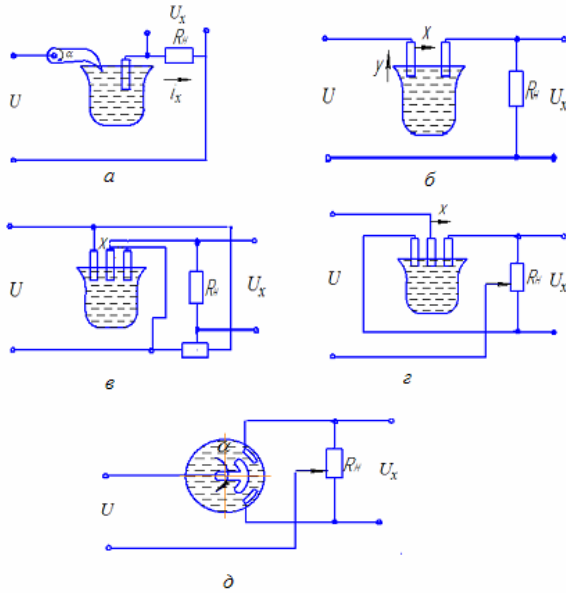


Рисунок 2.9 – Датчики положення резистивні електролітичні. Схеми електричні принципів

Для приблизного визначення зчпної ваги застосовуються датчики зі змінними довжиною та перетином каналу (рис. 2.11). Опір електролітичного датчика  $R_D$  довжиною  $L$  може бути визначений як  $R=1/\Lambda$ , де  $\Lambda$  – є провідність електроліту (в загальному випадку визначається шляхом побудови картини електричного поля і підсумовуванням провідності окремих ділянок).

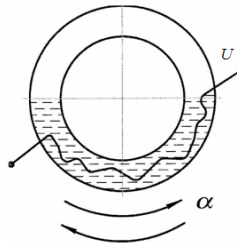


Рисунок 2.10 – Принцип роботи безступеневого датчика

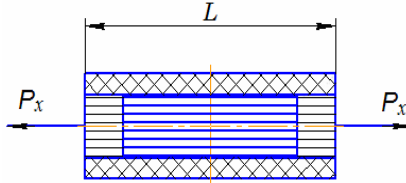


Рисунок 2.11 – Датчик зі змінними довжиною і перетином каналу

### 2.3 Омічні тензодатчики

Дія цих датчиків заснована на змінюванні активного опору провідникових і напівпровідникових матеріалів при дії на них зовнішніх механічних пружних сил. Вони є датчиками параметричного виду, і використовуються для перетворення малих деформацій (порядку  $10^{-3}$  мм) в електричний сигнал (рис. 2.12) [1, 15, 25]. Зазвичай деформація в напрямку дії сили в зоні пружних деформацій відбувається відповідно до закону Гука [20, 27]

$$\delta_t = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E},$$

де  $\delta_t$  - відносна продольна деформація;

$\sigma$  - механічне напруження в провіднику;

$l$  - довжина провідника;

$\Delta l$  - зміна довжини в результаті деформації,

$E$  - модуль пружності (модуль Юнга).

Зміна опору характеризується тензочутливістю:

$$S_d = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = E \cdot \frac{\Delta R/R}{\sigma}, \quad (2.8)$$

де  $R$  і  $\Delta R$  - відповідно опір і приріст опору в результаті деформації.

Якщо позначити відносне подовження як  $\xi = \Delta l/l$ , тоді модуль пружності буде рівний:

$$E = \sigma/\xi. \quad (2.9)$$

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:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2.10)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу тензочутливого елементу;  
 $l$  та  $S$  – відповідно довжина і перетин елементу.

Провідникові тензодатчики бувають дротові та фольгові. Чутливі елементи датчиків виконуються з металевого дроту, або фольги – стрічки, а також напівпровідників круглого або прямокутного перетину. Тензорезистор (рис. 2.12) – це є тонкий тензочутливий елемент – дріт або фольга (2), 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.

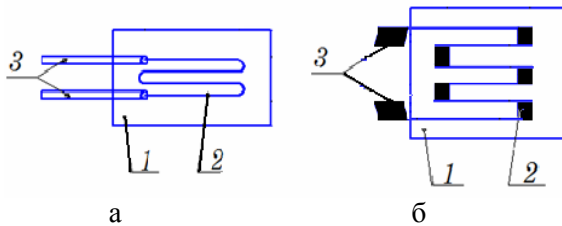


Рисунок 2.12 – Схема тензодатчиків дротової та фольгової конструкції

Дротові елементи (рис. 2.12, а) 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  $\rho$ , рівний 0,44...0,52 Ом·мм<sup>2</sup>/м, температурний коефіцієнт лінійного розширення  $K_m$ , що дорівнює 12,5 при нагріванні елемента датчика до 100 °С. Допустима робоча температура датчика  $\theta_{раб} \leq 400^\circ C$ . Інший матеріал може бути виконаний зі сплаву 479 (92%  $Pt$  + 8%  $W$ ), який має питомий опір  $\rho$ , приблизно рівний 0,1 Ом·мм<sup>2</sup>/м, коефіцієнт  $K_m = 9$  та допустиму робочу температуру  $\theta_{раб} \leq 1300^\circ C$ . Фольгові тензорезистори (рис. 2.12, б) 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 шеллак, а незахищені кислотостійким шаром ділянки фольги протравлюють.

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 омічні 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. Мала відносна зміна опору призводить до необхідності застосовувати вимірювальні схеми значної чутливості (наприклад, мостові), а температурну похибку можна компенсувати спеціальною схемою включення [1, 20]. 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. 2.13), які кріпляться на деталях, що взаємно переміщаються. Зусилля, яке можна отримати

при розтягуванні пучка дротів кількістю  $N$ , можна визначити формулою

$$P = N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

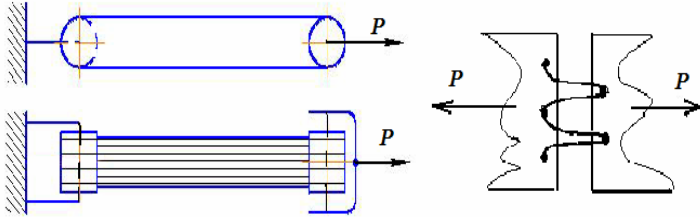


Рисунок 2.13 – Ненаклеюваний датчик для визначення великих зусиль

## 2.4 Термоелектричні перетворювачі (термопари)

Принцип роботи термопар оснований на фізичному явищі, коли два різнорідних за матеріалом провідника (або напівпровідника) контактують один з другим на атомному рівні, виникає різниця електричних потенціалів. Якщо края цього з'єднання помістити в середовище з різними температурами, тоді в контурі цих провідників виникатиме термо-ЕРС (рис. 2.14). Провідники А і Б називаються термоелектродами, а місця їх стику 1 і 2 –спаями. Вільним чи холодним називається спай, температура якого підтримується відносно постійною. Гарячим називається спай, що знаходиться у середовищі, температуру якого вимірюється.

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  $\theta_0$  – певна задана температура калібрування:

$$E = \alpha_1 \cdot (\theta - \theta_0) + \alpha_2 \cdot (\theta - \theta_0)^2 + \dots + \alpha_n \cdot (\theta - \theta_0)^n \quad (2.19)$$

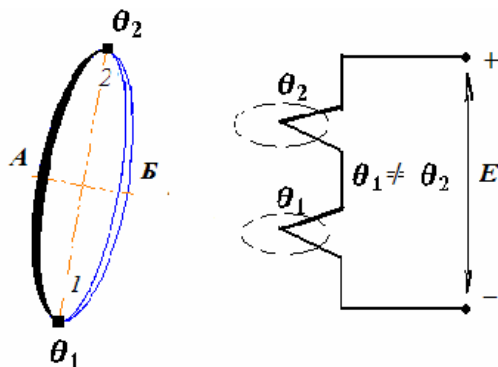


Рисунок 2.14 – Термопара. Принципова схема та термо-ЕРС

Кожна комбінація двох металів в термопарі характеризується власним рядом температурно-незалежних коефіцієнтів  $\alpha_i (i = l \dots n)$  [1, 15, 25]. Якщо спаї знаходяться при однаковій температурі, то струм в колі не протікає, оскільки в обох спаях виникає однакова за величиною, але протилежна за знаком термо-ЕРС. Для виміру термо-ЕРС до термопар підключаються мілівольтметри. Наприклад, між електродами А та Б, як показано на рис. 2.15, а, тут точкою 1 позначений гарячий спай; а точками 2, 3 – холодні спаї. На рис. 2.15, б мілівольтметр включений в розрив електрода Б, точкою 1 позначений – гарячий спай; точкою 2 – холодний спай; а точкою 3 – нейтральні спаї. Диференційна пара, що наведена на рис. 2.15, в, використовується для вимірювання різниці температур в двох точках 1 і 2, які є гарячі спаї. При цьому, якщо  $\theta_1 \neq \theta_2$ , то в колі буде з'являтися термо-ЕРС, полярність якої покаже, де температура буде вища, а де нижче. Для отримання значно більшої термо-ЕРС застосовують термобатарей, схема якої наведена на рис. 2.15, г. Через те, що термо-ЕРС, яка утворюється одною термопарою невелика і складає для різних термопар від 0,01 мВ до 0,07 мВ на  $1^\circ\text{C}$ , необхідно підсумовувати всі ЕРС. Вважається, що при використанні термобатарей з термопар в кількості  $n$  підвищуватиметься точність виміру температури відповідно в  $n$  раз.

Слід зазначити, що величина термо-ЕРС залежить лише від матеріалу термоелектродів і температури кожного спаю, і не залежить від розподілу температури вздовж термоелектродів (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.

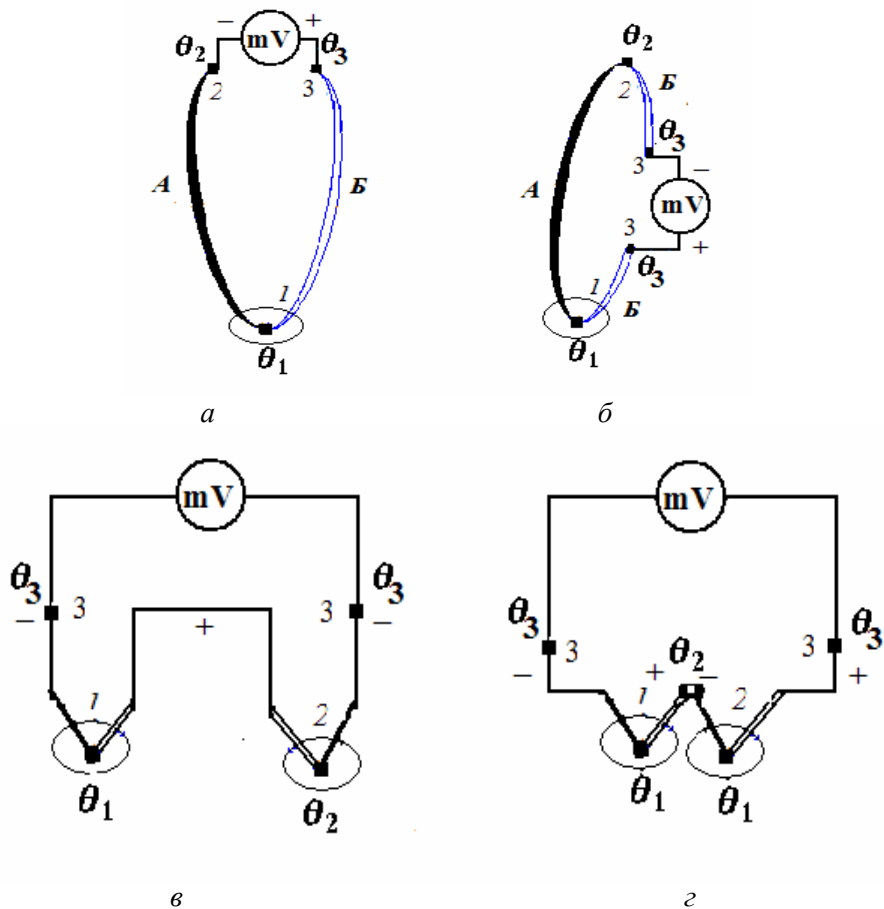


Рисунок 2.15 –Схеми підключення пристроїв вимірювання до термопар

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  $1000^\circ\text{K}$  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 1мВ на  $1^\circ\text{C}$  використовуються для перетворення теплової енергії в електричну в межах до  $700^\circ\text{K}$ . 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 поміщати холодний спай у ванну з танучим льодом, або розміщати в спеціальному термостаті. Тому простіше уточнювати реальну температуру відповідно до градуювальної кривої (рис. 2.16).

Крім того, також застосовується автоматична корекція температурних похибок (рис. 2.17), що здійснюється за рахунок компенсації температури еталонного контакту, температура якого вимірюється резистивним датчиком  $R(\theta)$ , який включений в мостову схему. Схема підключена таким чином, що вхідна напруга моста і ЕРС термопари компенсують одна одну, і відбувається компенсація температури еталонного контакту.

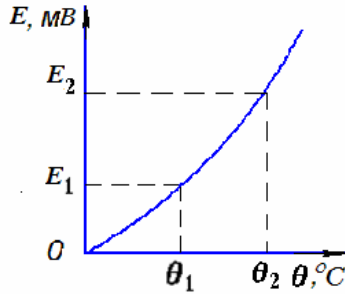


Рисунок 2.16 – Залежність ЕРС термопарі від температури. Градувальна крива термопарі

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.

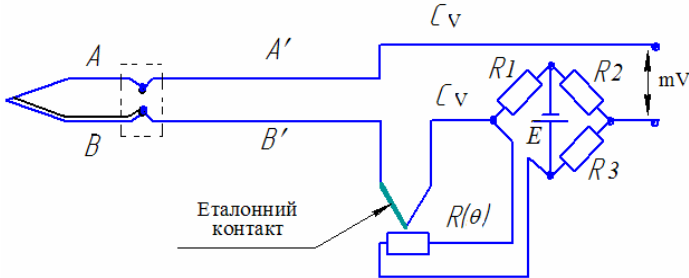


Рисунок 2.17 – Принципова електрична схема для компенсації температури за рахунок еталонного контакту

Матеріал у складі термопарі 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 термопарі має ті самі термоелектричні характеристики і називається компенсаційним кабелем.

Для вираховування температури за допомогою термопарі наведемо один з наступних наближених методів. Визначається величина термо-ЕРС формулою:

$$E_{ТП} = U_M \cdot (R_M + R_{ПД} + R_{ТП}) / R_M, \quad (2.20)$$

де  $U_M$  – напруга на затисках мілівольметра;

$R_M$  – опір мілівольметра;

$R_{ПД}$  – опір подовжувальних дротів;

$R_{ТП}$  – опір термопар.

Визначається перепад температури  $\theta_{пер}$ , який є різницею температури гарячого і холодного кінців термопар ( $\theta_1 - \theta_2$ )°К

$$\theta_{пер} = E_{ТП} \cdot 100 / E_{ТАБ}, \quad (2.21)$$

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:

$$\theta_1 = \theta_{пер} + \theta_2, \quad (2.22)$$

де  $\theta_2$  – температура холодного кінця термопар (зазвичай температура навколишнього середовища).

Це 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, 15, 25]. Розроблені цифрові пристрої для вимірювання температури термопарами в межах від 0 до 1800°С з інтервалом 0,1°С (рис. 2.18). Температура вимірюється за допомогою термопар ТП, виконану з двох електродів А і В, і далі перетворюється в сигнал, що придатний для обробки та аналізу. Функціональний блок - перетворювача забезпечує лінеаризацію загальної функції перетворення [1, 15].

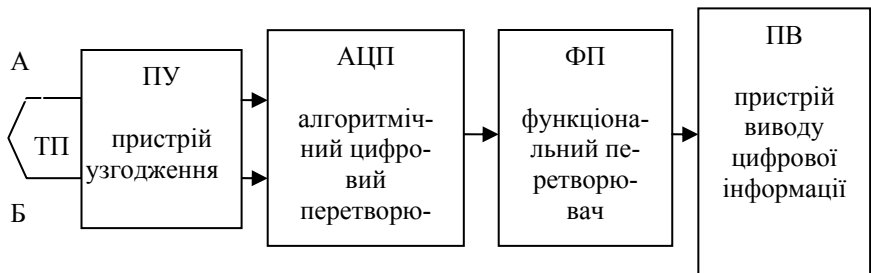


Рисунок 2.18 – Функціональна схема цифрового приладу для вимірювання температури

## 2.5 Індуктивні і трансформаторні датчики

Індуктивні і трансформаторні датчики призначені для вимірювання значень переміщувачів 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 взаємоіндукції, що змінюється (трансформаторні датчики).

### 2.5.1 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:

$$L = \frac{1}{I} \cdot \sum \Phi \cdot W, \quad (2.23)$$

де  $L$  – індуктивність електромагнітної системи датчика;

$I$  – струм котушки;

$\Phi$  – 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

$$L = \frac{W^2}{Z_\mu}, \quad (2.24)$$

де  $Z_\mu$  – повний магнітний опір магнітопроводу, який можна визначити за формулою

$$Z_\mu = \sqrt{(R_m + R_\delta)^2 + X_\mu^2}. \quad (2.25)$$

Складові якого наступні:

$$R_m = \frac{l}{\mu_a \cdot S}; \quad R_\delta = \frac{1}{\mu_0 \cdot \Lambda}; \quad X_\mu = \frac{P_{CT}}{\omega \cdot \Phi^2}, \quad (2.26)$$

де  $R_m$  – активний опір магнітопроводу;  
 $l$  – довжина середньої силової лінії магнітопроводу;  
 $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність;  
 $\mu_0$  – магнітна постійна повітря;  
 $S$  – перетин магнітопроводу;  
 $R_\delta$  – магнітний опір повітряного зазору;  
 $\Lambda$  – провідність повітряного зазору;  
 $X_\mu$  – реактивний опір магнітопроводу;  
 $P_{cm}$  – втрати в осерді і в провідних елементах конструкції;  
 $\omega$  – кутова частота.

Співвідношення (2.24) та (2.26) дозволяють пояснити наступні ідеї побудови індуктивних датчиків, наприклад, зі змінним числом витків (2.24), або з  $\mu_a$ , котра змінюється при підмагнічуванні осердя чи при дії механічних зусиль на осердя, або зі змінним повітряним зазором, чи зі змінним реактивним магнітним опором  $X_\mu$ , який змінюється при переміщенні витка в повітряному зазорі, або переміщенні екрана (2.26).

Розглянемо принцип роботи індуктивного датчика зі змінним повітряним зазором і його площею (рис. 2.19). Він має у своєму складі магнітопровід 1, на якій намотана обмотка збудження 2, а також рухомий якір 3. 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  $\delta$ , при переміщенні в напрямку  $X_2$  змінюватиметься площа зазору  $S$ , а також при переміщенні в напрямку  $X_3$  змінюватимуться обидва  $\delta$  і  $S$ . Для отримання більш задовільної лінійності такого датчика зміна робочого зазору  $\delta$  обмежується значенням 10% від номінального значення. До того ж вихідний сигнал не набуває нульового значення ні при яких значеннях  $X$ . На якір датчика діє одnobічне зусилля тяжіння:

$$F = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{dx},$$

де  $I$  – струм в обмотці.

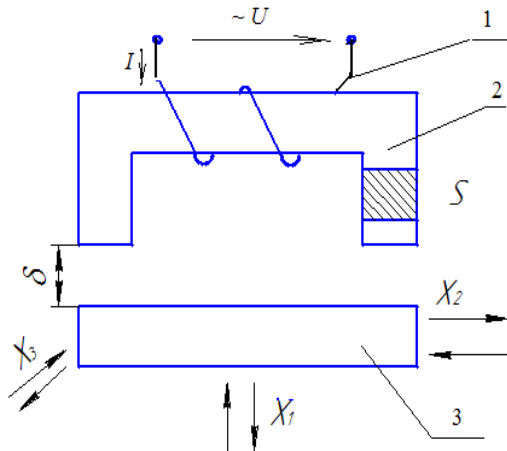


Рисунок 2.19 – Індуктивний датчик

На рис. 2.20 наведені характеристики такого датчика, які відображають їх нелінійність.

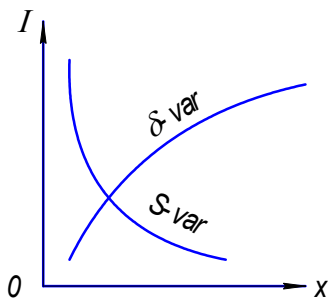


Рисунок 2.20 – Характеристики індуктивного датчика

Для усунення цих недоліків застосовуються диференційні та мостові схеми включення, які мають кращі характеристики  $i$ , відповідно, здобули більш широкого розповсюдження.

## 2.5.2 Трансформаторні датчики

На рис. 2.21 наведений найпростіший трансформаторний датчик.

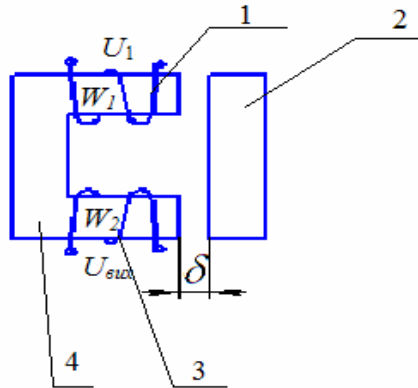


Рисунок 2.21 – Одинарний трансформаторний датчик

У цих датчиках вхідне переміщення ( $\delta$ ,  $x$  або  $\alpha$ ) 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.

Перехідна характеристика такого датчика дорівнює:

$$U_{вих} = \frac{W_2}{W_1} \cdot U_1 = k \cdot U_1, \quad (2.27)$$

де  $W_1$  і  $W_2$  – витки вхідної і вихідної обмоток;

$\delta$  – зазор між ярком і ярком датчика;

$k$  – коефіцієнт трансформації;

$U_1$ ,  $U_{вих}$  – відповідно вхідна та вихідна напруги.

На рис. 2.22 показаний більш чутливий – диференційний трансформаторний датчик, а його вихідна напруга, відповідно, дорівнює

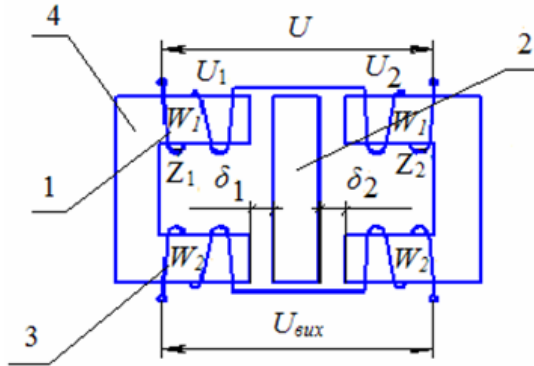


Рисунок 2.22 – Диференційний трансформаторний датчик

$$U_{\text{вих}} = k \cdot U_1 \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_2 + \delta_1}, \quad (2.28)$$

де  $\delta_1$  і  $\delta_2$  – зазори датчика;

$k$  – коефіцієнт трансформації.

З формули (2.28) випливає, що вихідна напруга ( $U_{\text{вих}}$ ) є прямопропорційною до різниці довжини зазорів ( $\delta_2 - \delta_1$ ).

На рис. 2.23 наведений датчик зі змінною площею зазорів, в якому при переміщенні якоря буде змінюватися розподіл магнітного потоку у вторинних обмотках.

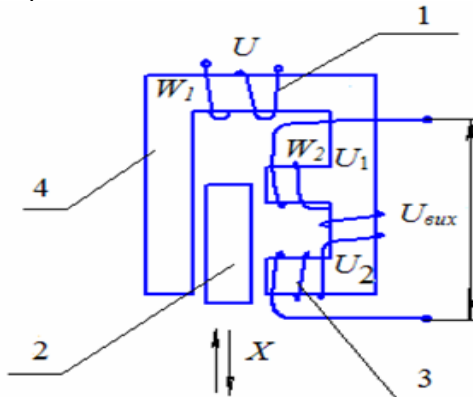


Рисунок 2.23 – Диференційний трансформаторний датчик зі змінною площею зазорів

## 2.6 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. Ємність  $C$  є функцією відстані  $d$  між електродами датчика (або обкладинками конденсатора), площі електродів  $S$  і діелектричної проникності  $\varepsilon$  діелектрика між електродами, тобто  $C = f(d, S, \varepsilon)$ . Вочевидь, змінюючи  $d$ ,  $S$  і  $\varepsilon$ , можна реалізувати три види ємнісних датчиків. Наприклад, деякі конструкції і графіки зміни їх ємності наведені на наступних рисунках: при зміні повітряного зазора між пластинами конденсатора (рис.2.24, а), при зміні площі перекриття пластин, коли одна пластина конденсатора зміщується відносно другої (рис.2. 24, б), при зміні діелектричної проникності середовища (рис. 2.24, в). Перший варіант конструкції має характеристику, що близька до гіперболічної, решта два варіанта конструкцій мають майже лінійні характеристики. Якщо знехтувати всіма краєвими ефектами, тоді ємність датчика, зображеного на рис. а, дорівнюватиме

$$C(x) = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.29)$$

де  $x$  – вхідна величина;

$\varepsilon_0$  – електрична константа, що дорівнює  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$S$  – 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. До того ж датчик нелінійний і має гіперболічну передавальну характеристику. Такі датчики 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. 2.24, б, має передавальну характеристику при змінненні площі перекриття електродів

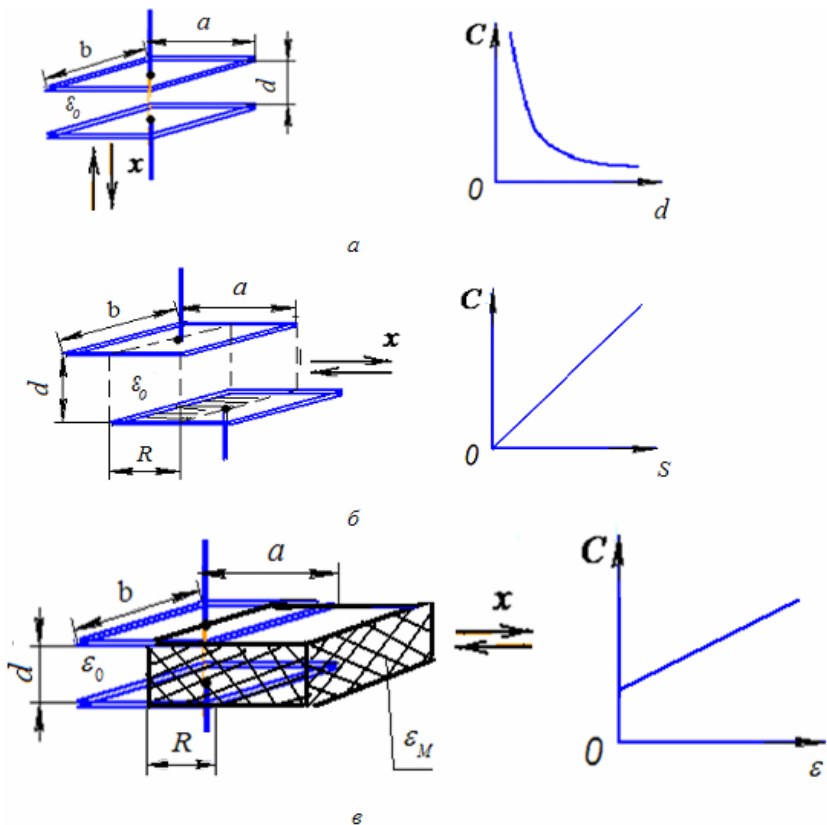


Рисунок 2.24 – Ємнісні датчики переміщення

$$C(x) = \frac{\varepsilon_0 \cdot (\vartheta \cdot R)}{d}, \quad (2.30)$$

де  $\vartheta$  – ширина датчика;

$R$  – довжина перекриття обкладинок конденсатора.

Такий датчик має лінійну залежність від  $x$ . Зазвичай його конструкція 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. в, також є лінійним, і використовується у випадку, коли змінюється положення діелектрика, що має відносну електричну

проникність  $\epsilon_M$  матеріалу. Якщо прийняти, що  $C_0 = C_0 \frac{a \cdot b}{d}$ , тоді ємність конденсатора буде дорівнювати

$$C(x) = C_0 \cdot \left\{ 1 + \frac{R}{a} \cdot (\epsilon_M - 1) \right\}, \quad (2.31)$$

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:

$$F(x) = \frac{1}{2} \cdot U^2 \frac{dC(x)}{dx}, \quad (2.32)$$

де  $U$  – напруга живлення датчика.

Якщо за позитивне прийняти збільшення  $x$ , то для датчика ( $a$ ) – сила буде позитивною, а для ( $\delta$ ) і ( $\epsilon$ ) – буде негативною. Загалом ємнісні датчики на практиці є достатньо надійними і дешевими.

## 2.7 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:

$$U = -B \cdot l \cdot V, \quad (2.33)$$

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.

### 2.7.1 Датчик частоти обертання – тахогенератор

На виході датчика частоти обертання формується напруга, пропорційна частоті обертання ротора. На рис. 2.25 зображені конструкції постійного (а) та змінного (б) струмів. Магнітний потік збудження утворюється постійним магнітом  $I$ . При обертанні ротора 3 (рис. 2.25, а), або магніту 1 (рис. 2.25, б) з кутовою швидкістю  $\omega$  у сигнальних обмотках  $N_c$  індукуються змінні ЕРС. Для випрямлення напруги, що генерується, в схемі а використовується колектор і щітки.

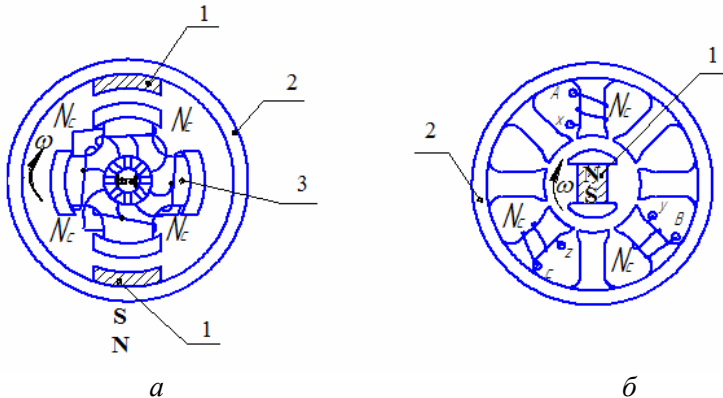


Рисунок 2.25 – Тахогенератори постійного та змінного струму

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  $\varphi$  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.

### 2.7.2 Датчик кутового прискорення

Такий датчик наведений на рис. 2.26. Магнітний потік збудження  $\Phi_\epsilon$  утворюється постійним магнітом 3. В роторі 4 (з міді або алюмінія) наводиться ЕРС за умови його обертання. Струми розподілятимуться, як в звичайній котушці.

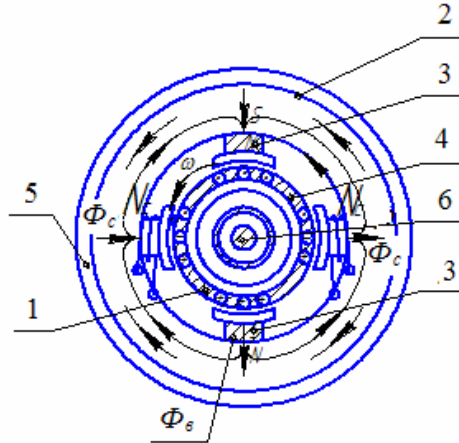


Рисунок 2.26 – Датчик кутового прискорення:

1 і 2 – внутрішній і зовнішній магнітопроводи; 3 – постійні магніти;  
4 – ротор, 5 – корпус з підшипниковими вузлами; 6 – вал.

Отже, спродуковані струми ротора утворюють сигнальний магнітний потік  $\Phi_c$ . Його напрямок буде співпадати з напрямком потоку, який продукується котушкою  $N$  при протіканні струмів в її верхній і нижній частинах. Потік  $\Phi_c$  є ортогональним по відношенню до потоку  $\Phi_\epsilon$ , і направлений вздовж магнітної осі сигнальних обмоток  $N_c$ . Якщо ротор обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega$ , 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  $\Phi_c$ , і в кінцевому рахунку – до наведення ЕРС в сигнальних обмотках. Результуюча вихідна ЕРС буде дорівнювати сумі ЕРС кожної сигнальної обмотки, і пропорційна кутовому прискоренню  $\xi$ . Якщо постійні магніти замінити електромагнітами, підключити їх до джерела змінного струму, тоді

при роботі датчика вихідна ЕРС буде пропорційна кутовій швидкості  $\omega$  обертання ротора.

### 2.7.3 Датчик Віганда

Датчик Віганда (рис. 2.27) використовується для визначення частоти обертання робочого механізму [1, 16]. При обертанні робочого механізму (на рисунку 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  $N_c$  та магнітопровід 3. В результаті в сигнальній обмотці 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 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.

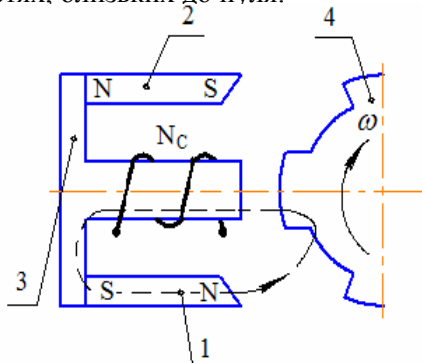


Рисунок 2.27 – Датчик Віганда

## 2.8 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, обмоточні дроти 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 металоріжучих верстатах (табл. 2.1). 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.

2) Використовувати обмотувальні дроти (крім спеціальних і дорогих 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.

Таблиця 2.1 – Якісні порівняльні характеристики пермалою

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

3) Оскільки на підшипники діють як радіальні так і осьові навантаження, а прогин валу під дією цих навантажень малий, і не викликає кутового зсуву вісі валу відносно вісі посадочного отвору, тому треба обирати радіальні однорядні шарикопідшипники, або 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  $10^7$  обертів; діапазон температури експлуатації від  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а також вологостійкість. Магнітні, або електромагнітні підвіси використовуються для розвантаження вузлів тертя, в тому числі підшипників.

## 2.9 Контрольні питання та задачі

1. Датчики контролю та регулювання. Призначення. Класифікація.

2. Контактні датчики. Переваги та недоліки.

3. Потенціометричні датчики. Чутливість. Електрична розрізнявальна здатність потенціометра. Спеціальні види потенціометрів.

4. Омічні тензодатчики. Переваги фольгових перед дротяними. Тензочутливість. Компенсація температурної похибки. Ненаклеювані тензодатчики.

5. Термоелектричні датчики.

6. Термопари. Основні схеми вмикання. Термопари з благородних і не благородних металів. Термогенератори. Автоматична корекція температурних похибок.

7. Індуктивні датчики. Принцип дії. Математичні співвідношення, з яких витікають ідеї побудови цих датчиків.

8. Індуктивні датчики зі змінними зазором та площею. Схеми вмикання.

9. Трансформаторні датчики. Принцип дії.

10. Ємнісні датчики. Три їх види.

11. Активні датчики. Принцип дії. Тахогенератори постійного та змінного струму.

12. Датчик кутового прискорення.

13. Датчик Віганда.

14. Особливості конструктивно-технологічних характеристик електромагнітних датчиків.

15. **Задача 1.**

Розрахувати реостатний датчик переміщення і накреслити його ескіз при таких вихідних даних: довжина намотки по каркасу  $L = 40$  мм, нижня межа температури корпусу  $\theta = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимальна температура навколишнього середовища  $\theta_{max} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , опір обмотки  $R = 800$  Ом, струм обмотки  $I = 0,01$  А, матеріал обмотки - ніхром Х15Н60.

16. **Задача 2.**

За допомогою термопари визначити температуру вимірювального середовища, якщо відомі: напруга на клеммах мілівольтме-

тра  $U_M$ , опір мілівольметра  $R_M$ , подовжувальний провід  $R_{II}$  і термомпари  $R_{TP}$ ,  $E_{ТАБЛ}$  – величина термо-е.р.с. для визначеної термомпари (приводиться в довідкових таблицях).

### 3 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 [5, 15, 17, 29]. Ці пристрої призначені для дистанційного зчеплення, розчіплювання, перемикання, 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;
  - перемикання;
  - 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 вісі електромагнітної муфти і обмотки збудження збігаються);
  - багатополюсні (вісі електромагнітної муфти і обмотки є паралельними, перпендикулярними, або тангенціальні).

### 3.1 Фрикційні електромагнітні муфти

У фрикційних електромагнітних муфтах (ФЕММ) дві, або декілька поверхонь тертя дотикаються одне одну, і стискаються силою, яка створюється електромагнітом (рис. 3.1).

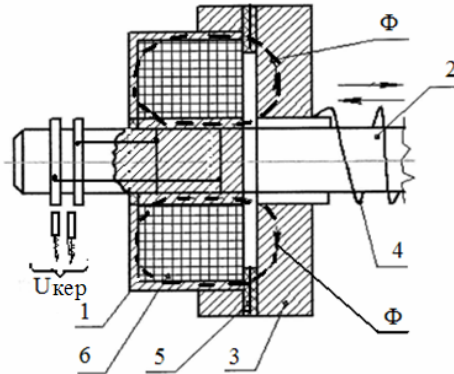


Рисунок 3.1 – Конструкція фрикційної електромагнітної муфти

При необхідності включення муфти на її ведучу частину (1) – обмотку збудження (6) подається напруга керування  $U_{\text{кер}}$ , через що створюється магнітний потік  $\Phi$ , 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. 3.1 муфта діє за рахунок моменту тертя  $M_{\text{ТР}}$ . На рис. 3.2 зображені елемент тертя з позначеннями:  $R_{\text{вТ}}$  – внутрішній та  $R_{\text{зш}}$  – зовнішній радіуси кільцевого елемента тертя.

Візьмемо елементарний кільцевий елемент тертя з середнім радіусом  $R$  і шириною  $dR$ . Тоді збільшення зусилля тертя:

$$dF_{\text{ТР}} = K_{\text{ТР}} \cdot P_{\text{ПТ}} \cdot dS_{\text{Т}}, \quad (3.1)$$

де  $K_{\text{ТР}}$  – коефіцієнт тертя між робочими поверхнями;  
 $P_{\text{ПТ}}$  – питомий тиск між ними:

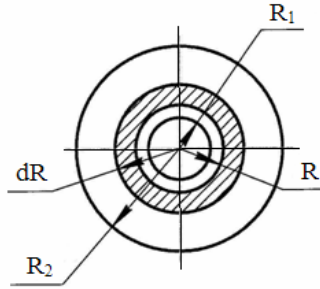


Рисунок 3.2 – Елемент тертя кільцевий. Схема принципова

$$P_{ITT} = \frac{P_K}{S_T}, \quad (3.2)$$

де  $P_K$  – кінцеве зусилля, коли струм в обмотці управління досягає номінального;

$dS_T$  – площа елементарного кільцевого елемента тертя:

$$dS_T = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot dR, \quad (3.3)$$

тоді:

$$dF_{TP} = 2 \pi \cdot K_{TP} \cdot P_{ITT} \cdot R \cdot dR. \quad (3.4)$$

Приріст моменту тертя визначатиметься як співвідношення:

$$dM_{TP} = dF_{TP} \cdot R = 2 \pi \cdot K_{TP} \cdot P_{ITT} \cdot R^2 \cdot dR. \quad (3.5)$$

Звідси момент тертя визначатиметься формулою:

$$M_{TP} = \int_{R_{BT}}^{R_{ЗШ}} dM_{TP} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot K_{TP} \cdot P_{ITT} \cdot R_{ЗШ}^3 \cdot (1 - \beta^3), \quad (3.6)$$

$$\text{де } \beta = \frac{R_{BT}}{R_{ЗШ}}.$$

Для нормальної роботи момент  $M_{TP}$  має бути більше моменту навантаження  $M_B$  веденої вісі (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 стискання, 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 стискання  $P_{\text{ПТ}} = 0,4 \dots 0,6$  МПа, або металокераміки (найбільш досконалі) – з  $P_{\text{ПТ}} = 0,8 \dots 1,0$  МПа, та робочою температурою – до  $200^\circ\text{C}$ . Час включення  $t_{\text{вкл}}$  лежить в межах від 0,07 с до 0,3 с, залежить від габаритів муфти, постійної часу електромагніта, ходу якоря, або кількості дисків.

### 3.2 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. 3.3). Принцип їх роботи нагадує роботу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, та відрізняється тим, що магнітне поле, яке обертається, утворюється індуктором на головному валу (6) після подачі напруги керування  $U_{\text{кер}}$  на струмом'ємний механізм (5).

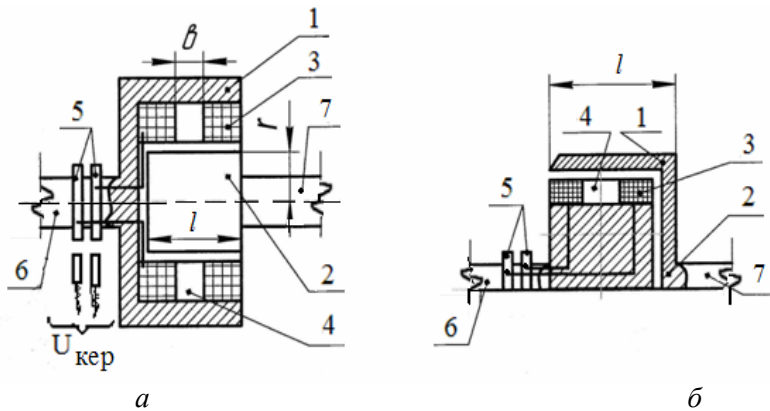


Рисунок 3.3 – Конструкції індукційних муфт з внутрішнім (а) та зовнішнім (б) якорями

Обмотки збудження (3) з полюсами (4) знаходяться всередині магнітопроводу індуктора (1). 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. 3.4 наведено механічну характеристику ІЕММ з масивним ротором.

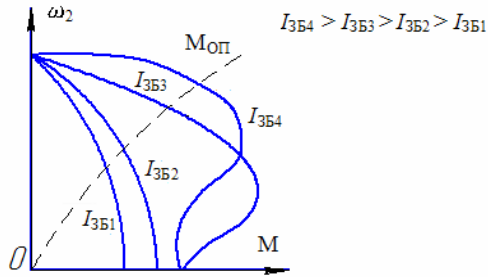


Рисунок 3.4 – Механічна характеристика ІЕММ

Якщо регулювати струм збудження  $I_{3Б}$  ( $I_{3Б1} \dots I_{3Б4}$ ) і, відповідно, магнітний потік  $\Phi$ , можна плавно і в широкому діапазоні регулювати частоту обертання  $\omega_2$  ведомого валу, а також момент  $M$ , який передається муфтою. Чим більше  $I_{3Б}$ , тим більше магнітний потік  $\Phi$ , тим крутіше механічна характеристика, як видно на рис. 3.4, за умови  $I_{3Б4} > I_{3Б3} > I_{3Б2} > I_{3Б1}$  і роботи муфти в сталому режимі. Якщо під час роботи муфти змінюються частота обертання  $\omega_2$  та момент опору  $M_{оп}$  головного валу (тобто протидіючий момент змінюється), частота обертання ведомої частини 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:

$$e = -B \cdot l \cdot V,$$

де  $l$  – геометричний розмір (див. рис. 3.3, 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:

$$F_{EM} = B \cdot l. \tag{3.7}$$

Тоді електромагнітний момент визначатиметься як:

$$M_{EM} = F_{EM} \cdot r, \tag{3.8}$$

де  $r$  – середній радіус муфти.

Потужність, що передається муфтою дорівнює:

$$P_2 = M_{EM} \cdot \omega_2 \quad (3.9)$$

де  $\omega_2$  – частота обертання частини муфти, що ведеться.

Якщо  $M_{EM} \approx M_{OP}$ , тоді  $P_2 - M_{EM} \cdot \omega_2 \approx M_c \cdot \omega_2$ , і, відповідно, потужність втрат визначатиметься  $\Delta P = M_{OP} \cdot \omega$ , ( $\omega = \omega_1 - \omega_2$  – частота ковзання однієї частини муфти відносно іншої).

Електромагнітні процеси в якорі типа «біляча клітка» протікають таким самим чином (або подібно), як і в асинхронних двигунах. Коефіцієнт ковзання ПЕММ складає 1...3%. Коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) 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 зношення поверхонь, мають гнучкий зв'язок, і через відсутність механічного контакту допускають значні перевантаження.

### 3.3 Електростатичні (порошкові) муфти

Порошкові електростатичні муфти з магнітним зв'язком (ПЕММ) по своїй сутності є конденсаторами з рухомими обкладками, які виконують функцію силового елемента (рис. 3.5). Одна обкладка є головною (ведучою), друга – веденою (такою, що ведеться). Простір між обкладками наповнюється напіврідкою сумішшю, що складається з твердої основи (окис магнію, гіпс, желатин, тощо) і рідкого компонента (трансформаторне чи кремнійорганічне масло, керосин, тощо)

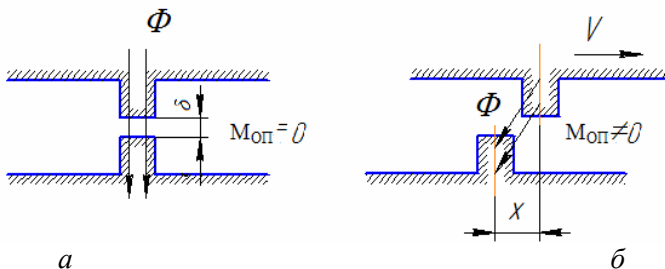


Рисунок 3.5 – Принцип дії електростатичної муфти при  $M_{OP} = 0$  (а) та при  $M_{OP} \neq 0$  (б)

). Якщо до пластин такого конденсатора прикласти напругу  $U$ , то між ними утворюється ланцюжок з зерен твердого компо-

ненту (так званий «нежорсткий механічний зв'язок»). Між пластинами виникає електростатичне зусилля:

$$F_{EC1} = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{dC}{d\delta}, \quad (3.10)$$

де  $F_{EC1}$  – електростатичне зусилля;

$U$  – напруга між пластинами;

$C$  – ємність муфти;

$\delta$  – відстань між обкладинками (пластинами).

Електростатичне зусилля  $F_{E3}$ , що передається, рівне:

$$F_{EC} = \mu_x \cdot F_{EC1}, \quad (3.11)$$

де  $\mu_x$  – коефіцієнт в'язкості наповнювача, залежний від складу і концентрації компоненту.

Тоді електростатичний момент  $M_{CT}$ , що передається, дорівнює:

$$M_{CT} = F_{EC} \cdot r, \quad (3.12)$$

де  $r$  – середній еквівалентний радіус муфти.

На рис. 3.6 показана механічна характеристика електростатичної муфти, з якої видно, що  $M_{CT}$  не залежить від частоти обертання, але змінюється зі зміною струму ( $I_{3B3} > I_{3B2} > I_{3B1}$ ) 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.

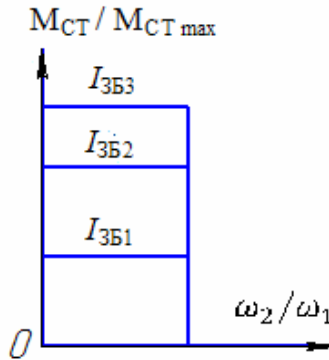


Рисунок 3.6 – Механічна характеристика

Ці муфти використовують при автоматичному керуванні задля: плавного регулювання моменту, що передається, або частоти обертання (наприклад, у стрічкопротяжних механізмах); плавного зчеплення або розчіплювання; 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.

### 3.4 Контрольні питання

1. Електромагнітні муфти. Призначення. Класифікація.
2. Фрикційні електромагнітні муфти. Визначення моменту тертя.
3. Індукційні муфти (муфти ковзання). Конструкція. Характеристика. Потужність, що передається муфтою.
4. Електростатичні муфти (порошкові). Конструкція. Визначення електростатичного моменту. Характеристика. Приклад застосування.

## 4 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...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 [15, 25, 33].

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 літання» 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 намагнічувальному полю, 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 в феромагнетиках і парамагнетиках. Стійкими підвісами можуть бути лише ті, які виконані з діамагнетиків. Найкращими з них є вісмут (Bi) і піролітичний графіт, а також надпровідники, в яких  $\mu = 0$ , тобто в надпровідниках магнітне поле зменшується до нуля, і таким чином утворюють на своїх поверхнях 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.

### 4.1 Коротка класифікація існуючих підвісів

Простішими магнітними підвісами є підвіси на постійних магнітах. Вони підрозділяються на системи «магніт-магніт» і «магніт-феромагнетик». Для забезпечення стійкості їх застосовують

разом з опорами регульованого типу, або з частковим розвантаженням. На рис. 4.1 наведена коротка класифікація підвісів.

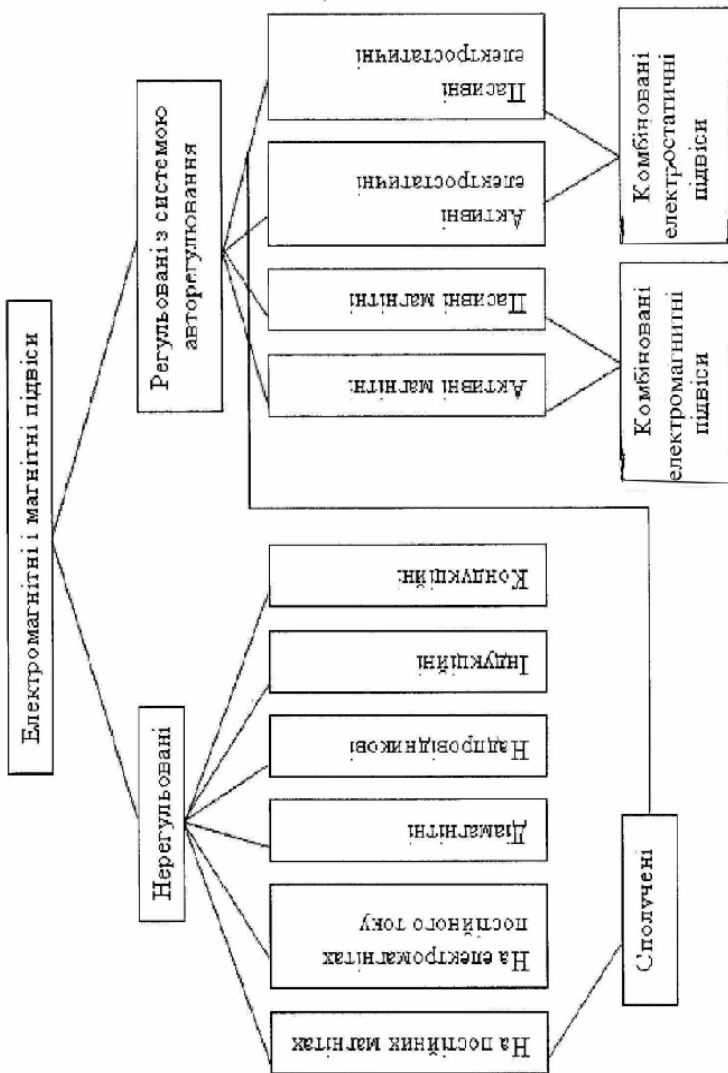


Рисунок 4.1 – Коротка класифікація підвісів

Електромагнітні підвіси з нерегульованими магнітами мають велику переважувальну 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 при переміщенні центрального елемента, тоді підвіси називаються пасивними.

## 4.2 Індукційні електромагнітні підвіси та опори

На рис. 4.2 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. Тут сепаратриси і графіки розподілу складових магнітної індукції та електродинамічної сили, відповідно, по вісях  $y$  і  $x$  індукційної системи.

Припустимо, що невагоме неферромагнітне електропровідне тіло 3 знаходиться між точками Б і Б' на вісі  $x$ , або точками Г і Г' на вісі  $y$ . Тоді на тіло діятиме електродинамічна сила ( $F_{ед, x}$  або  $F_{ед, y}$ ), яка буде прагнути повернути його в точку А, де магнітна індукція дорівнює нулю.

Тому точка А для невагомого 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  $F_{ед, y} = 0$ , то тіло опускатиметься в точці Д. Тут виникає два ва-

ріанти: або на ділянці А-Д (рис. б) зростаюча сила  $F_{EDy}$  врівноважить силу ваги (тоді настане – левітація), або тіло «проскочить» точку Г' і падатиме далі.

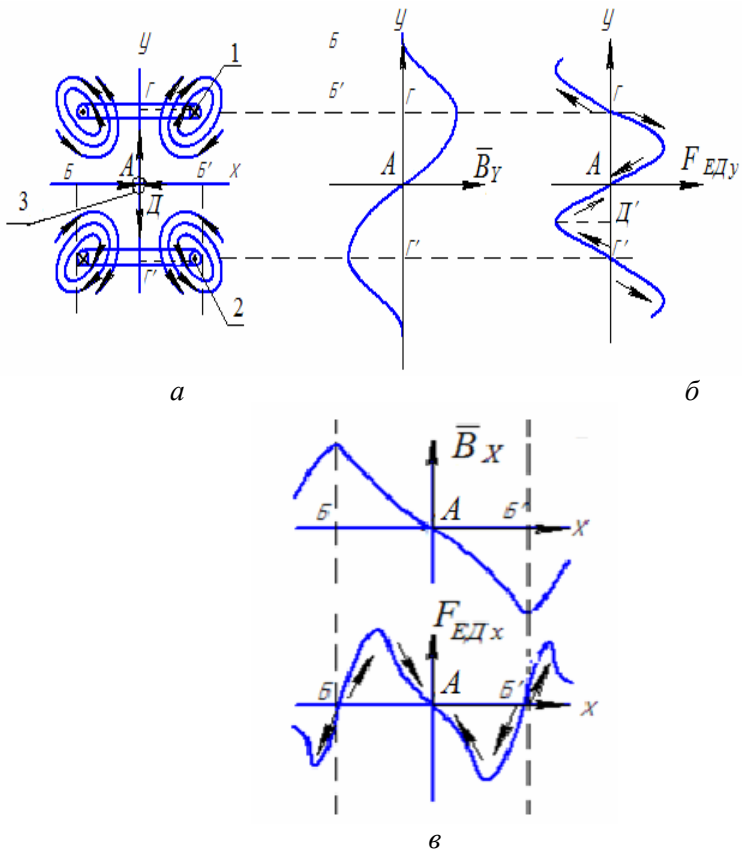


Рисунок 4.2 – Система з витків електромагнітних опор

Розглянемо індукційний підвіс зі стійкою рівновагою вздовж вертикальної вісі (рис.4.3). 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.

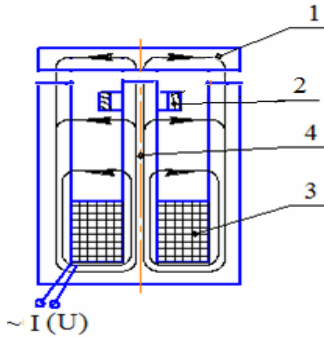


Рисунок 4.3 – Індукційний підвіс по вертикальній осі зі стійкою рівновагою

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 (ширяться), оскільки стійка рівновага диска можлива лише у вертикальній площині (вісі), а вздовж горизонталі вона обмежується центральним стрижнем магнітопроводу.

Одновісний резонансний підвіс (рис. 4.4) – 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:

$$\begin{cases} i_1 = i_0 (1 + K_1 X) \\ i_1 = i_0 (1 + K_1 X) \end{cases}; \quad \begin{cases} \Phi_1 = \Phi_0 (1 + K_2 X) \\ \Phi_1 = \Phi_0 (1 + K_2 X) \end{cases}; \quad (4.1)$$

де  $i_0$  і  $\Phi_0$  – відповідно струм і потік магнітної системи за відсутності зсуву тіла, що центрирується;

$X = \Delta x / \delta_0$  – відносне відхилення тіла, що центрирується;

$\Delta x$  – абсолютний лінійний зсув тіла, що центрирується;

$\delta_0$  – половина розміру початкового повітряного зазору;

$K_1$  і  $K_2$  – коефіцієнти посилення струму та потоку.

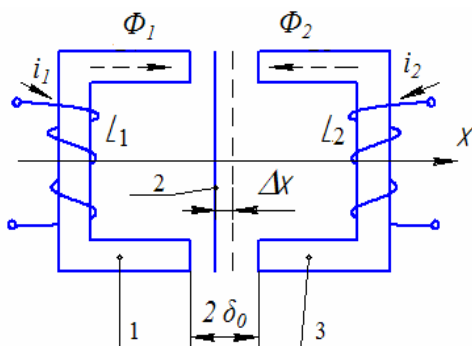


Рисунок 4.4 – Одновісний резонансний підвіс

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.

На рис. 4.5 до обмоток  $L_1$  і  $L_2$  двох електромагнітів 1 та 3 підключаються настроювальні конденсатори  $C_1$  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.

### 4.3 Магнітоферорідинні опори

У магнітоферорідинних опорах між двома поверхнями вводиться ферорідина (колоїдний розчин феромагнетиків) для магнітного ущільнення валу (рис. 4.6).

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.

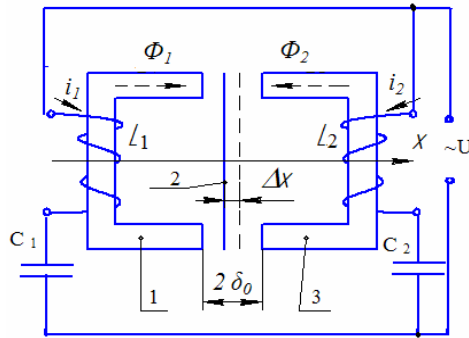


Рисунок 4.5 – Схема магніторезонансного підвісу з LC - контуром

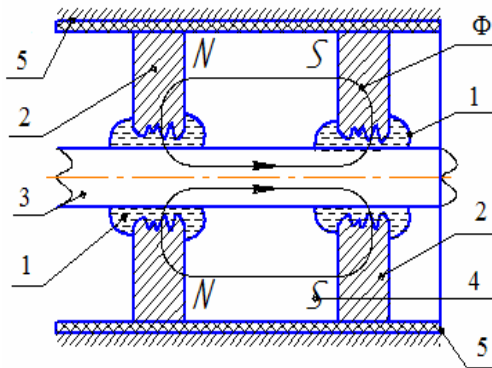


Рисунок 4.6 – Схема магнітоферорідинної опори

#### 4.4 Контрольні питання

1. Електромагнітні та магнітні підвіси. Призначення. Понде-ромоторні сили та явища левітації.
2. Дати характеристику підвісів на постійних електромагні-тах та магнітах. Підвіси з частковою компенсацією ваги підвішено-го тіла. Навести їх приклади.
3. Підвіси на постійних електромагнітах.
4. Індуктивні електромагнітні опори.
5. Одновісний резонансний підвіс.
6. Принцип дії магнітоферорідинної опори.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Агейкин, Д.И. Датчики контроля и регулирования [Текст]/ Д.И. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1985. – 509 с.
2. 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.
3. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст]/ В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 1991. – 495 с.
4. Богородский, Н. П. Электрические материалы [Текст]/ Н.П. Богородский. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 362 с.
5. 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.
6. Гордон, А. В. Поляризованные электромагниты [Текст]/ А.В. Гордон, А.В. Сливинская. – М.: Энергия, 1994. – 240 с.
7. Губкин, А.Н. Электреты [Текст]/ А.Н. Губкин. – М.: Наука, 1980. – 180 с.
8. Диковский, Я. М. Магнитоуправляемые контакты [Текст]:/ Я.М. Диковский, И.И. Капралов. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
9. Картавов, С. А. Словарь: математические термины [Текст]:/ С. А. Картавов. – Київ: Вища школа, 1988. - 295 с.
10. Кобленц, М.Г. Герметичное коммутирующее устройство на силовых герконах [Текст]/ М.Г. Кобленц . – М: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.
11. Клименко, Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Точка, 2012. – 340 с.
12. Клименко, Б. В. Електричні та магнітні пристрої, електричні аксесуари, електричні установки. Терміни, тлумачення, коментарі: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Точка, 2009. – 272 с.
13. Клименко, Б. В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Талант, 2008. – 208 с..
14. 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.

15. Коробков, Ю.С. Электрические аппараты автоматики [Текст]:/ Ю.С. Коробков, В. Д. Флора. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 344 с.
16. Коробков, Ю.С. Электрические аппараты автоматики: сборник вопросов, задач и упражнений [Текст]:/ Ю.С. Коробков, В. Д. Флора. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 116 с.
17. Крайуберт, М.И. Электромагнитные муфты скольжения в приводе [Текст]/ М.И. Крайуберт. – М.: Информэлектро, 1970. – 73 с.
18. Красник, В.В. Термины и определения в электроэнергетике [Текст]/ В.В. Красник– М.: Энергосервис, 2002. – 355с.
19. Курбатов, П.А. Анализ силовых взаимодействий в электромагнитных системах электрических аппаратов [Текст]/ Курбатов П.А. – М.: Изд-во МЭИ, 1994 – 206с.
20. Кухлинг, Х. Справочник по физике [Текст]:/ Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1985 - 519 с.
21. Новиков, Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов [Текст]/ Ю.Н. Новиков. – М.: Энергия, 1970. – 310 с.
22. Осокин, Ю.А. Теория и применение электромагнитных подвесов [Текст]/ Ю.А. Осокин. – М.: Машиностроение, 1980. – 210 с.
23. Правила устройства электроустановок[Текст] : Седьмое издание. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2004.
24. Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии/ Аналитический обзор [Текст]:/Ю.К. Розанов, М. В. Рябчинский. – Электротехника, 1998,– №3. – С.10-17.
25. Розанов, Ю.К. Электрические и электронные аппараты [Текст] /Под ред. Ю.К. Розанова, Е.Г. Акимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 160 с.
26. Ройзен, В.З. Электромагнитные малогабаритные реле [Текст]/ В.З. Ройзен. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. - 240 с.
27. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов [Текст]/ П. В. Сахаров. – М.: Энергия, 1977. – 560с.
28. Словарь иностранных слов [Текст]:/ Под ред. Локшиной С.М., Лехина Г.В., Петрова Ф.Н. и др. – М.: Советская энциклопедия, 1984. - 785 с.
29. Софронов, Ю.В. Электромеханические аппараты автоматики [Текст]/ Ю.В. Софронов. – Чебоксари: Изд-во Чуваш.унта, 1982. – 103 с.
30. Таев, И.С. Электрические аппараты автоматики и управления [Текст]/ И.С. Таев. – М.: Высшая школа, 1975. – 16 с.
31. Харазов, К.И. Устройства автоматики с магнитными контактами [Текст]/ К.И. Харазов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 225 с.

32. Чунихин, А.А. Электрические аппараты [Текст]/ А.А.Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
33. Шоффа, В. Н. Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов [Текст]/ В. Н. Шоффа. – М.: Изд-во МЭИ. 1994. – 186 с.
34. Шоффа, В. Н. Сборник задач и упражнений по электромагнитным явлениям в электрических аппаратах [Текст]:/ В. Н. Шоффа, А. В. Савецев. – М.: Мир, 1985. – 236 с.
35. Электроника. Энциклопедический словарь. / Под ред. Колесникова В.Г. М.: «Советская энциклопедия», 1991 – 688 с.
36. ГОСТ 14312-79 Контакты электрические. Термины и определения. Введ. 16.12.79. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 22 с.
37. 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.
38. Волкова О.Г. Исследование характера механического взаимодействия рабочих поверхностей сильноточных разрывных контактов [Текст]:/ О.Г. Волкова, Л.Б. Жорняк // Электротехника і електромеханіка. – 2016. – № 1. – С. 12 – 16.
39. Жорняк Л.Б. Об оптимизации температурных режимов в электрических аппаратах [Текст] / Л. Б. Жорняк, А. Ш. Асатуриян, О. В. Бояринцева // Электротехніка та електромеханіка. – 2003. - № 1. - С. 5-10.
40. Жорняк, Л. Б. Определение коэффициента теплоотдачи при нестационарном теплообмене в шкафах низковольтных комплектных устройств [Текст] / Л. Б. Жорняк // Электротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 2. – С. 44-46.
41. Жорняк Л. Б. Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кВ [Текст] / Л. Б. Жорняк, О.С. Кобозев, О.Г. Серёда, В.В. Моргун // Электротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 79-86.
42. Снигирев В.М. К вопросу оптимального проектирования электрических аппаратов [Текст] / В.М. Снигирев, А.П. Агибалов и др. // Электротехніка та електроенергетика. – 2012. – №1. – С. 16-18.
43. Снигирев В.М. К вопросу оптимального проектирования электрических аппаратов [Текст] / В.М. Снигирев, А.П. Агибалов и др. // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №1. – С. 51-53.

*Навчальне видання*

СНІГІРЬОВ Володимир Максимович  
ЖОРНЯК Людмила Борисовна

# **ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ АПАРАТИ АВТОМАТИКИ**

*Навчальний посібник*

Комп'ютерний набір, переклад *Жорняк Л. Б.*  
Верстання *Гринь Д. В.*

Оригінал-макет підготовлено  
в редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Підписано до друку 06.11.2015 Формат 60.84 / 16. Ум. друк. арк.  
6,95.

Тираж 300 прим. Зам. № 1084

Запорізький національний технічний університет  
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64  
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2394 від 27.12.2005.