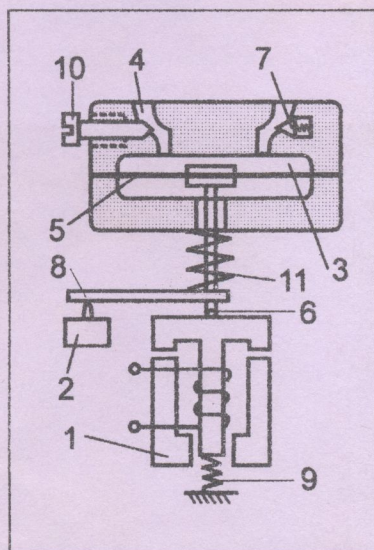


ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ
СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕХАНІЗМИ І
ВИКОНАВЧІ ПРИСТРОЇ АВТОМАТИКИ



3167-33

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.С. ВАСЮРА

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ
СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕХАНІЗМИ І ВИКОНАВЧІ ПРИСТРОЇ АВТОМАТИКИ

ЗАТВЕРДЖЕНО УЧЕНОЮ РАДОЮ ВІННИЦЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЯК НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
“СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ”. ПРОТОКОЛ №5 ВІД 28 СІЧНЯ 2000 Р.

НТБ ВНТУ



3167-33

681.51(075) В 20 2001

Васюра А.С. Електромагнітні елементи та при-

Вінниця ВДіУ 2001



Рецензенти:

Лисогор В.М., доктор технічних наук, професор

Ротштейн О.П., доктор технічних наук, професор

Хаймзон І.І., доктор технічних наук, професор

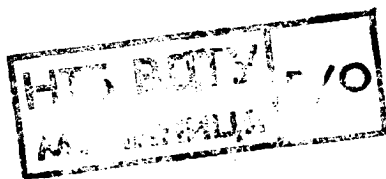
Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Васюра А.С.

В 20 “Електромагнітні елементи та пристрої систем управління і автоматики”. ч. III. “Електромагнітні механізми і виконавчі пристрої автоматики”. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 134 с. укр. мовою.

В посібнику розглянуті електромагнітні реле (нейтральні, поляризовані, спеціальні), в т.ч. магнітокеровані контакти. Окремі розділи присвячені елементам промислової автоматики (магнітним контакторам, пускачам, автоматичним вимикачам, комутаційним елементам) та електромагнітним виконавчим пристроям (силовим електромагнітам, електромагнітним муфтам, пропорційним елементам керування).

Для студентів вузів, які навчаються за спеціальністю “Системи управління і автоматики”. Може бути корисним для студентів споріднених спеціальностей та для інженерно-технічного персоналу відповідного профілю.



Зміст

Вступ	4
1. Електромагнітні реле	5
1.1. Нейтральні реле	5
1.2. Реле постійного струму	11
1.3. Реле змінного струму	22
1.4. Швидкодія електромагнітних реле	27
1.5. Поляризовані реле	32
1.6. Спеціальні реле	41
1.7. Магнітокеровані контакти (геркони)	45
2. Елементи та пристрої промислової автоматики	58
2.1. Логічні релейні елементи	58
2.2. Контактори	64
2.3. Магнітні пускачі	71
2.4. Автоматичні вимикачі	75
2.5. Комутаційні елементи	77
2.6. Електричні контактори	89
3. Виконавчі пристрої	95
3.1. Силкові електромагніти	96
3.2. Електромагнітні муфти	100
3.3. Електромагнітні пропорційні елементи керування	117
Контрольні запитання та завдання	123
Післямова	124
Література	125

ВСТУП

Серед елементів та пристроїв, що широко використовуються в технічних засобах автоматики та систем управління, значну роль відіграють електромеханічні і електромагнітні елементи та пристрої, які відрізняються такими відомими перевагами, як простота та надійність конструкції, нечутливість до збурювальних факторів зовнішнього середовища, насамперед, до радіаційного впливу; практично необмежена потужність і термін використання виконавчих пристроїв і т. ін.

В системах автоматики одним з поширених елементів є реле - пристрій, в якому при плавній зміні сигналу управління здійснюється стрибкоподібна зміна вихідного сигналу. Серед електромеханічних реле найбільш поширені електромагнітні реле. Підвищені вимоги до надійності елементів системи управління і автоматики призвели до появи герметизованих магнітокерованих контактів, які знайшли застосування не тільки в без'якірних реле, а також - в кінцевих і колійних перемикачах, давачах положень і переміщень, координатних перемикачах і т. ін. За допомогою електромагнітних реле в промисловій автоматичі створюються логічні пристрої різної складності, що збираються з елементарних логічних елементів.

Для пуску та управління електродвигунами широко застосовуються магнітні пускачі та контактори. Вмикання, вимикання, перемикання електричних кіл здійснюється комутаційними елементами, основною частиною яких, зазвичай, є електромагніт. Для приведення в дію різноманітних регулювальних органів, що безпосередньо впливають на об'єкти управління, широко використовуються виконавчі електромагнітні пристрої (силові електромагніти, електромагнітні муфти, гальма і т. ін.).

За останні роки досягнуті значні успіхи у виробництві електромеханічних і електромагнітних пристроїв, але для подальшого удосконалення конструкцій та розробки нових типів елементів і пристроїв необхідно продовжувати дослідження як в області теорії і проектування електромагнітних механізмів, так і в сфері розробок нових технологій їх виготовлення.

Електромагнітні механізми і виконавчі пристрої автоматики

1. Електромагнітні реле

1.1. Нейтральні реле

В системах автоматики одним з поширених елементів є *реле* – пристрій, в якому при плавній зміні сигналу управління (вхідного) здійснюється стрибкоподібна зміна (перемикання) вихідного сигналу.

В електромеханічних реле зміна (перемикання) вихідного сигналу здійснюється за допомогою контактів, а зусилля, яке переміщує контакти, створюється електромеханічним перетворювачем електричної енергії в механічну. Найпростішим з цих перетворювачів є електромагніт. Тому серед електромеханічних реле найпоширеніші – електромагнітні реле.

Нехай вхідний сигнал $x_{вх}$ змінюється в часі безперервно (тобто може приймати будь-які значення) від нуля до деякого значення, а потім також безперервно зменшуватись, як показано на рис. 1.1, а. Спочатку, при малих значеннях $x_{вх}$, вихідний сигнал $x_{вих}$ дорівнює нулю. Але коли вхідний сигнал збільшується до деякого значення $x_{вих.спр}$, вихідний сигнал стрибком приймає значення $x_{вих.спр}$ (рис. 1.1, б). При подальшому збільшенні вхідного сигналу вихідний сигнал не змінюється і дорівнює $x_{вих.спр}$. При зменшенні сигналу $x_{вх}$ значення вихідного сигналу не змінюється, але при зменшенні його до значення $x_{вих.відп}$ вихідний сигнал стрибком зменшується до нуля. При подальшому зменшенні вхідного сигналу нульове значення вихідного сигналу зберігається. Залежність вихідного сигналу від вхідного показано на рис. 1.1, в.

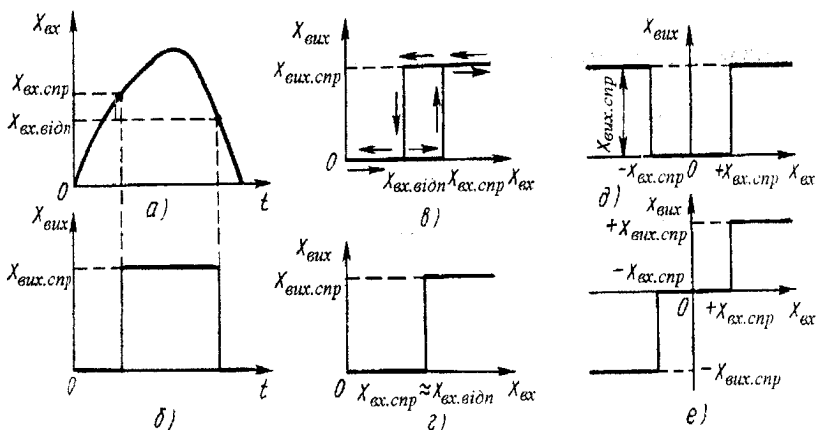


Рис. 1.1. Характеристики реле

Значення вхідного сигналу $X_{вх.спр}$, при якому вихідний сигнал стрибком змінюється від 0 до $X_{вих.спр}$, називається сигналом *спрацьовування*. Значення вхідного сигналу $X_{вх.відп}$, при якому вихідний сигнал стрибком змінюється від $X_{вих.спр}$ до 0 , називається *сигналом відпускання*. Як правило, сигнал спрацьовування більший за сигнал відпускання ($X_{вх.спр} > X_{вх.відп}$), при цьому зміна $X_{вих}$ при збільшенні $X_{вх}$ відбувається по одному графіку, а при зменшенні $X_{вх}$ – по іншому (рис. 1.1, в). В цьому випадку можна сказати, що характеристика реле має петлю гістерезису. В ряді випадків, коли значення сигналів спрацьовування і відпускання близькі, гістерезисом можна знехтувати. В цьому випадку залежність $X_{вих} = f(X_{вх})$ показано на рис. 1.1, г. Тепер розглянемо зміну вихідного сигналу при зміні полярності вхідного сигналу. Якщо полярність вхідного сигналу не впливає на полярність вихідного сигналу, то при $X_{вх} = -X_{вх.спр}$ вихідний сигнал стрибком змінюється від нуля до $X_{вих.спр}$ (рис. 1.1, д). Таку характеристику мають *нейтральні* реле. Якщо полярність вхідного сигналу впливає на полярність вихідного сигналу, то при $X_{вх} = -X_{вх.спр}$ вихідний сигнал стрибком змінюється від нуля до $-X_{вих.спр}$ (рис. 1.1, е). Таку характеристику і подібну до неї мають *поляризовані* реле.

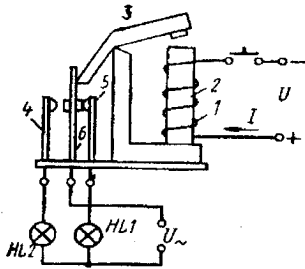


Рис. 1.2. Схема сигналізації з електромагнітним реле

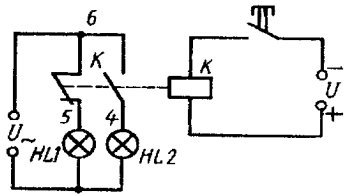


Рис. 1.3. Електрична схема сигналізації (умовне зображення)

За принципом дії розрізняють електромеханічні реле, магнітні безконтактні реле, електронні, напівпровідникові і фотоелектричні реле та ін.

Реле використовуються в схемах автоматичного управління, а також для сигналізації, захисту і блокування.

Розглянемо роботу реле на прикладі схеми сигналізації, яка показана на рис. 1.2, з використанням реле. Реле складається з обмотки 1, яка розміщена на нерухомому осерді 2, рухомого якоря 3 і контактів 4, 5, 6. Осердя з обмоткою і якорем являє собою електромагніт. Коли під дією напруги U по обмотці 1 проходить струм I , якір 3 притягує до осердя 2 і переміщує рухомий контакт 6 ліворуч. При цьому контакти 5 і 6 розмикаються, а контакти 6 і 4 замикаються. Контакт 6 розташований на плоскій пружині. Коли струм в обмотці 1 зникне, сила притягування якоря 3 до осердя 2 буде дорівнювати нулю і зусилля стисненої пружини контакту 6 примусить якір повернутись в попередній стан. При цьому знову замкнуться контакти 5 і 6 та розімкнуться контакти 6 і 4. Таким чином, головними частинами реле є електромагніт, контактний вузол і протидіюча пружина.

Схема на рис. 1.2 працює таким чином. Коли кнопка не натиснена, струм в реле не надходить і горить лампа $HL1$ (зелена), яка живиться

напругою мережі змінного струму U через замкнуті контакти 5 і 6. Лампа $HL2$ (червона) при цьому не горить, оскільки контакти 6 і 4 розімкнені. Якщо натиснена кнопка, то струм йде в обмотку реле, воно спрацьовує (тобто в електромагніті якір 3 притягується до осердя 2) і замикаються контакти 6 і 4, а контакти 5 і 6 розмикаються. Загорається лампа $HL2$ (червона), що одержує напругу через контакти 6 і 4, а лампа $HL1$ гасне. Так буде до тих пір, поки натиснута кнопка. Якщо її відпустити, то схема повернеться в початковий стан.

На рис. 1.3 показана електрична схема, яка відповідає рис. 1.2, на якій використані стандартні умовні позначення елементів. Обмотка реле позначена прямокутником. Контактні пари 5-6 і 6-4 зображені в тому стані, в якому вони знаходяться, коли струм по обмотці реле не проходить. Контакти 5-6 називаються контактами розмикання, контакти 6-4 – замикання. Зверніть увагу на те, що обмотка реле і його контакти позначені однаковими літерами K . На електричній схемі вони можуть знаходитись в самих різних місцях, але конструктивно відносяться до одного і того ж пристрою. Одне реле може мати кілька контактів замикання і розмикання, але всі вони повинні позначатись однаковими літерами (чи літерами і числами, якщо в схемі використовується декілька реле).

Струм і потужність в колі обмотки реле звичайно значно менші, ніж струм і потужність в колі навантаження, перемикання в якому здійснюється за допомогою контактів цього реле. При цьому можна говорити про ефект підсилення, який забезпечує реле. Це означає, що кнопка в колі обмотки реле може бути малопотужною. Наприклад, замість неї можна використати шляховий вимикач чи мікроперемикач. А контакти реле вже можуть бути достатньо потужними, але вони розміщені в більш сприятливих умовах, ніж контакти управління шляхового вимикача, який знаходиться безпосередньо на виробничому механізмі. Саме реле

знаходиться зазвичай в якій-небудь шафі керування, а в конструкції реле передбачені способи по захисту контактів.

Параметри і типи електромагнітних реле. До основних параметрів електромагнітних реле відносяться:

Струм спрацьовування $I_{спр}$, при протіканні якого по обмотці реле відбувається спрацьовування електромагніта і перемикання контактів.

Робочий струм I_p , при якому забезпечується надійне утримування контактів у переключеному стані. Зазвичай $I_p > I_{спр}$.

Струм відпускання $I_{відп}$, при якому електромагніт відпускає контакт і контакти повертаються в початковий стан: $I_{відп} < I_{спр}$.

Допустимий струм через контакти $I_{к доп}$.

Допустима напруга між контактами $U_{к доп}$, яка обмежується напругою пробою між розімкненими контактами.

Час спрацьовування $t_{спр}$ – проміжок часу з моменту подання напруги на обмотку реле до моменту перемикання контактів.

Час відпускання $t_{відп}$ – проміжок часу з моменту відключення напруги з обмотки реле до моменту відпускання реле.

За потужністю керування (електричною потужністю, яку споживає обмотка) реле поділяють на малопотужні ($P_{к доп} < 1$ Вт), середньої потужності ($P_{к доп} = 1-10$ Вт) і потужні ($P_{к доп} > 10$ Вт). Потужність керування визначається напругою живлення реле і струмом спрацьовування.

За часом спрацьовування електромагнітні реле поділяються на швидкодіючі ($t_{спр} < 50$ мс), нормальні ($t_{спр} = 50-150$ мс), сповільнені ($t_{спр} = 0,15 - 1$ с). Для затримки спрацьовування на час, більший секунди, служать спеціальні реле часу.

В залежності від живлення обмотки реле і способу створення магнітного поля розрізняють електромагнітні реле постійного і змінного

струму. В свою чергу, електромагнітні реле постійного струму поділяються на нейтральні і поляризовані. В нейтральних реле, незалежно від напрямку струму в обмотці, спрацьовують одні й ті самі групи контактів. В поляризованих реле при одному напрямку струму в обмотці спрацьовує одна група контактів, при другому напрямку – друга група контактів.

За характером руху якоря електромагнітні нейтральні реле поділяються на два типи: з якорем, що повертається, та з якорем, що втягується.

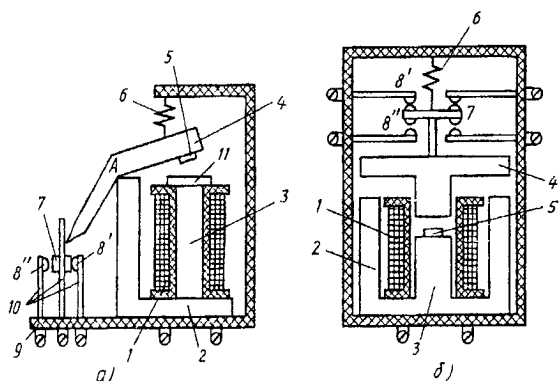
Вітчизняна промисловість випускає у великій кількості електромагнітні реле різних типів для різноманітного застосування. Для промислової автоматики останнім часом засвоєні проміжні реле серій РП 20, РП 21 і РПЛ з приставками. Реле РП 20 і РП 21 застосовуються в колах управління електроприладами з живленням від мережі змінного струму напругою до 440 В і від мережі постійного струму напругою до 220 В. Вони можуть мати пристрої для гасіння дуги і кількість контактів до 8. Реле РПЛ застосовуються для комутації кіл змінного струму напругою до 660 В і кіл постійного струму напругою до 440 В. До цих реле є приставки типу ПКЛ, які відрізняються кількістю контактів (до чотирьох – розмикання і замикання), приставки ПВЛ, які забезпечують витримку часу від 0,1 до 180 с, приставки ППЛ, що забезпечують утримування контактної системи реле у ввімкненому стані після відключення струму в обмотці реле.

Різнманітні реле використовуються для радіоелектроніки, найбільш великі з них (типів РКА, РПН, МКУ-48 та ін.) застосовуються головним чином в апаратурі зв'язку, але можуть використовуватись і в промисловій автоматичі. Найбільш малі (типу РЕС) називаються мініатюрними. Наприклад, реле РЕС 80 має масу 2г і компактні розміри 5,3x10,4x10,8 мм.

Елементи контактної вузла мініатюрних реле закріплюються безпосередньо на металевих виводах цоколя.

1.2. Реле постійного струму

Будова електромагнітних реле постійного струму показана на рис. 1.4: а – з обертовим якорем, б – з втяжним якорем. Головні деталі і вузли реле мають такі позначення: 1 – котушка на каркасі; 2 – ярмо;



3 – осердя; 4 – ярмі; 5 – штифт відлипання (немагнітна) прокладка); 6 – пружина зворотного руху; 7 – рухомі контакти; 8 – нерухомі контакти.

Магнітопровід електромагнітного механізму реле складається з

нерухомої і рухомої частин. Рухома частина називається якорем. Нерухома частина складається з осердя, що знаходиться всередині котушки реле, і ярма - частини магнітопроводу, яка охоплює котушку.

В реле з обертовим якорем (рис. 1.4, а) електромагнітний механізм і контактний вузол закріплені на спільній ізоляційній основі 9. При протіканні струму по обмотці котушки 1, ярмі 4 притягується до осердя 3 і виконує оберт відносно точки опору А. При цьому, переміщуючи рухомий контакт 7, який розмикається з нерухомим контактом 8' і замикається з нерухомим контактом 8''. Контакти закріплені на плоских пружинах 10, які служать і для підключення до зовнішнього кола. Коли струм в обмотці реле зникає, ярмі повертається в попередній стан.

В деяких реле це відбувається під дією сили тяжіння якоря, в деяких – під дією контактних пружин чи спеціальної пружини зворотного руху 6. Для того, щоб якір при відсутності струму не притягувався до осердя через залишкове намагнічування магнітопроводу, на якорі встановлюється штифт відлипання 5 – пластинка з немагнітного матеріалу, що забезпечує проміжок приблизно в 0,1 мм між якорем і осердям при спрацьовуванні реле. Часто осердя має полярний кінцевик 11 для зменшення магнітного опору робочого повітряного проміжку.

В електромагнітному реле з втяжним якорем (рис. 1.4, б) при протіканні струму по обмотці котушки 1 якір 4 втягується всередину неї до опори в осерді 3. При цьому рухомі мостові контакти 7 розмикаються з нерухомими контактами 8' і замикаються з нерухомими контактами 8". Повернення якоря 4 в попередній стан, при відсутності струму в реле, здійснюється під дією пружини зворотного руху 6. Як і в реле з обертовим якорем, для покращення якоря служить штифт відлипання 5. Для повернення якоря в початковий стан може бути використана сила тяжіння якоря.

Робота електромагнітного реле. Розглянемо послідовність роботи електромагнітного реле з моменту подачі напруги на обмотку реле до моменту відключення напруги з обмотки і повернення якоря в початковий стан. Оскільки обмотка реле має індуктивний опір, струм в ній не може змінюватись стрибком. Зміна струму (як збільшення, так і зменшення) відбувається плавно по експоненціальній кривій (рис. 1.5).

На рис. 1.5, що показує зміну струму обмотки реле в часі, можна виділити чотири проміжки.

Проміжок 1 характеризує спрацьовування реле. Він починається з моменту подачі напруги на обмотку реле (точка *O*) і закінчується в момент надійного замикання контактів (точка *A*). На цьому проміжку відбувається

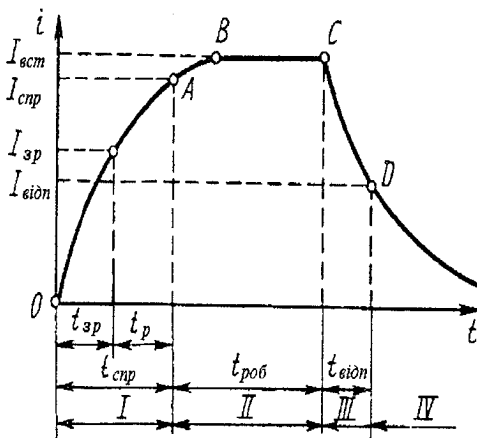


Рис. 1.5. Графік зміни струму в обмотці реле

спрацьовування реле і його тривалість називається часом спрацьовування $t_{спр}$. Відразу після подачі напруги струм в обмотці реле збільшується достатньо швидко, оскільки стала часу відносно мала. Стала часу котушки, яка має опір R і індуктивність L , дорівнює відношенню L/R , а поки якір не почав наближуватись до осердя, магнітне коло має великий проміжок δ , виходячи з цього, індуктивність мала. Коли струм в обмотці реле досягає значення $I_{зр}$, при якому якір починає рух, проміжок починає зменшуватись, індуктивність буде збільшуватись, а швидкість наростання струму буде зменшуватись. Час спрацьовування складається з часу зрушення $t_{зр}$ і часу руху якоря t_p ($t_{спр} = t_{зр} + t_p$). В точці A струм має значення $I_{спр}$. Струм спрацьовування більший за струм зрушення, оскільки за час t_p продовжувалось його наростання.

В точці A закінчився рух якоря. Починається проміжок II , що характеризує реле в робочому стані. Тривалість цього проміжку $t_{роб}$. На початку цього проміжку струм продовжує збільшуватись. В точці B зростання струму зупиняється, його значення визначається відношенням напруги на обмотці U до активного опору обмотки R . Це струм, що

встановився $I_{вст}=U/R$. Проміжок AB необхідний для того, щоб забезпечити надійне притягування якоря до осердя, виключаючи вібрацію якоря при струсах реле. Відношення струму, що встановився $I_{вст}$ до струму спрацювання $I_{спр}$ називається коефіцієнтом запасу реле по спрацюванню $K_{зап}=I_{вст}/I_{спр}$; $K_{зап}=1,5-2$. В цей самий час $I_{вст}$ повинен бути обмеженим з міркувань щодо нагрівання.

Проміжок III починається з моменту зняття напруги з обмотки реле. В точці C починається зменшення струму, і в точці D якір починає відходити від осердя. В цій точці струм $I_{відп}$ не забезпечує таку силу притягування, яка перевищувала б силу протидії пружини. Час відпускання складається з часу зрушення і часу руху якоря до розімкнення контактів: $t_{відп}=t_{зр}+t_p$. Відношення струму відпускання до струму спрацювання називається коефіцієнтом повернення: $K_n=I_{відп}/I_{спр}$; $K_n=0,4-0,8$.

На проміжку IV якір повертається в попередній стан і залишається в ньому до тих пір, поки не буде знову подана напруга на обмотку реле.

Характеристики електромагнітного реле. Переміщення якоря електромагнітного реле виконується під дією двох сил: сили тяжіння, обумовленої електромагнітним полем, і сили протидії, зумовленої пружною деформацією пружин. Дві ці сили залежать від переміщення якоря, тобто від величини зазору δ між якорем і осердям.

Залежність між електромагнітною силою тяжіння F_e і величиною проміжку називається *силовою характеристикою* $F_e=f(\delta)$. Залежність між силою протидії F_m і величиною зазору називається *механічною характеристикою*: $F_m=f(\delta)$.

Розглянемо спочатку силову характеристику електромагнітного механізму реле. До обмотки реле, що має активний опір R і кількість витків

w , прикладено напругу u . Під дією цієї напруги по обмотці протікає струм i і створюється магнітний потік Φ .

Рівняння рівноваги напруги в процесі спрацьовування реле записується у відповідності з другим законом Кірхгофа і законом електромагнітної індукції:

$$u = Ri + w d\Phi/dtAC. \quad (1.1)$$

Перемножимо вираз (1.1) почленно на idt і проінтегруємо його за часом від 0 до t , протягом якого магнітний потік зростає від 0 до Φ :

$$\int_0^t u idt = \int_0^t i^2 R dt + w \int_0^{\Phi} id\Phi. \quad (1.2)$$

Ліва частина рівняння (1.2) – це вся енергія, яка отримується від джерела живлення. Перший доданок в правій частині – це енергія, що витрачається на нагрівання обмотки. Другий доданок в правій частині – це енергія, яка збережена в магнітному полі реле:

$$W = w \int_0^{\Phi} id\Phi. \quad (1.3)$$

Даний інтеграл може бути зображений графічно як площа фігури, що міститься між кривою намагнічування і віссю ординат (рис. 1.6). Енергія магнітного поля складатиметься з енергії, яка зосереджена в повітряному зазорі (заштрихована площа $Ob\Phi$ на рис. 1.6,а, і енергії, що розподілена в сталених частинах магнітопроводу (заштрихована площа Oab на рис. 1.6,а). Магнітопровід реле, як правило, не насичений, тобто робота реле проходить на прямолінійному проміжку кривої намагнічування.

Оскільки повітряний зазор має порівняно велику величину, можна знехтувати другою частиною енергії (площею Oab). Магнітну енергію, що збереглась в повітряному зазорі, наближено визначаємо як площу всього трикутника $Oa\Phi$:

$$W_{\delta} \approx Iw\Phi/2. \quad (1.4)$$

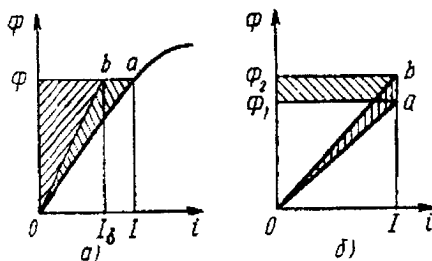


Рис. 1.6. Графічне зображення енергії, яка збереглась в магнітному полі реле

Тепер розглянемо процес зміни енергії магнітного поля при переміщенні якоря, вважаючи струм в обмотці незмінним: $I = \text{const}$. При переміщенні якоря зменшується зазор, а магнітний потік збільшується від Φ_1 до Φ_2 . Відповідно, зміну енергії ΔW можна наближено визначити як площу прямокутника $\Phi_1 ab \Phi_2$ на рис. 1.6, б:

$$\Delta W = Iw (\Phi_1 - \Phi_2). \quad (1.5)$$

До початку руху якоря енергія поля визначалась площею трикутника $Oa\Phi_1$, після переміщення якоря на δ , енергія поля визначалась площею трикутника $Ob\Phi_2$. Різниця цих площ і дасть нам зміну енергії в повітряному зазорі:

$$\Delta W_{\delta} = Iw \Phi_2/2 - Iw \Phi_1/2 = Iw (\Phi_2 - \Phi_1)/2. \quad (1.6)$$

Зміна енергії ΔW за рівнянням (1.5) проходить за рахунок надходження енергії з мережі. Половина її, як видно із рівняння (1.6), пішла на зміну енергії в повітряному зазорі. Куди ж була використана друга половина енергії ΔW , яка чисельно приблизно дорівнює ΔW_δ ?

Ця друга половина енергії (на рис. 1.6,б вона відповідає площі трикутника Oab) витрачається на виконання механічної роботи $A_{\text{мех}}$ при переміщенні якоря під впливом електромагнітної сили F_e :

$$A_{\text{мех}} = F_e \delta \approx \Delta W_\delta \quad (1.7)$$

Підставляючи в (1.7) вираз (1.6), одержуємо:

$$A_{\text{мех}} = I w (\Phi_2 - \Phi_1) / 2, \quad (1.8)$$

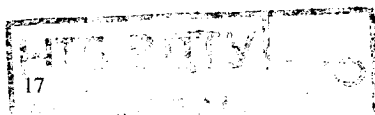
звідки

$$F_e = I w (\Phi_2 - \Phi_1) / (2\delta). \quad (1.9)$$

Магнітний потік в повітряному зазорі створюється за рахунок магніторухливної сили (МРС) $(Iw)_\delta$ і пропорційний магнітній провідності зазору G_δ .

Оскільки ми прийняли $I = \text{const}$, то і МРС $(Iw)_\delta = \text{const}$, а зміна потоку $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ проходить за рахунок зміни провідності повітряного зазору ΔG_δ :

$$\Delta\Phi = (Iw)_\delta \Delta G_\delta \quad (1.10)$$



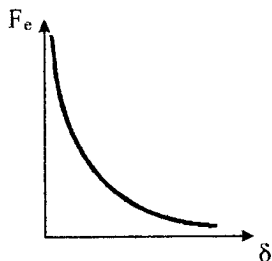


Рис. 1.7. Силова характеристика

Підставивши (1.10) в (1.9), одержимо:

$$F_e = (Iw)_{\delta}^2 \Delta G_{\delta} / (2\delta). \quad (1.11)$$

Для повітряного зазору довжиною δ між двома площинами, площа перерізу яких s_{δ} , магнітна провідність визначається за формулою:

$$G_{\delta} = \mu_0 s_{\delta} / \delta, \quad (1.12)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Підставивши (1.12) і значення μ_0 в (1.11), одержуємо електромагнітну силу при зміні зазору від δ до нуля:

$$F_e = 2\pi \cdot 10^7 (Iw)_{\delta}^2 s_{\delta} \cdot \delta^2. \quad (1.13)$$

Цю формулу можна перетворити, враховуючи, що $\Phi_{\delta} = B_{\delta} s_{\delta} = (Iw)_{\delta} G_{\delta} s_{\delta}$

$$F_e = \Phi_{\delta}^2 / (2\mu_0 s_{\delta}) \approx 4 B_{\delta}^2 s_{\delta} l 10^5. \quad (1.14)$$

З (1.13) виходить, що електромагнітне тягове зусилля прямо пропорційне квадрату МРС, тобто не залежить від напрямку струму в обмотці реле. Ця сила тяжіння обернено пропорційна квадрату довжини δ повітряного зазору.

Силова характеристика $F_e=f(\delta)$ показана на рис. 1.7. В зоні малих зазорів реальна силова характеристика відрізняється від теоретичної, побудованої за (1.13), – пунктирна крива на рис. 1.7. Згадаємо, що ми виводили рівняння сили тяжіння, приймаючи деякі припущення. При малих зазорах необхідно враховувати магнітний опір стальних ділянок магнітопроводу, якими ми знехтували.

Розглянемо тепер механічну характеристику реле. Переміщенню якоря реле в напрямку осердя протидіють сили пружних елементів. Такими пружними елементами є контактна пружина та пружина зворотного руху.

Рухомий контакт реле, як правило, розміщується на плоскій пружині, що представляє собою пружну металічну пластину, один кінець якої нерухомо закріплений, а другий може переміщуватись (див., наприклад, контакт б на рис. 1.2). Сила протидії, що створюється плоскою пружиною, визначається за формулою

$$F_m = \frac{3EJ}{\beta} x, \quad (1.15)$$

де E – модуль пружності матеріалу пружини; $J=bh^3/12$ – момент інерції пружини; b – ширина пружини; n – товщина пружини; l – відстань від місця закріплення пружини до точки прикладення сили; x – переміщення пружини в точці прикладення сили.

В початковому стані пружина не деформована, сила дорівнює нулю. Переміщення пружини x при спрацьовуванні реле буде проходити в напрямку зменшення зазору, і тому залежність $F_m(\delta)$ має вигляд:

$$F_M = \frac{3EJ}{l^3} (\delta - x), \quad (1.16)$$

В якості поворотних, зазвичай використовують звиті пружини. Залежність зусилля, що розвивається гвинтовою пружиною, від переміщення має вигляд, що аналогічний рівнянню (1.16):

$$F_M = \frac{GJ}{2\pi r^3 n} (\delta - x) + F_{поч}, \quad (1.17)$$

де G – модуль пружності при зсуві; J – момент інерції при обертанні; r – радіус витка пружини; n – число витків; $F_{поч}$ – сила початкового натягу пружини.

Графіки залежності сил протидії пружин мають вигляд прямих ліній, оскільки ці сили пропорційні деформації (переміщенню) пружини.

Розглянемо побудову механічної характеристики реле на прикладі контактної групи, що показана на рис. 1.8, а. При спрацьовуванні реле якір 1 спочатку переборює натяг гвинтової пружини 4, потім, коли кінець важеля доходить до контактної пластини 2, додається і зусилля від її деформації, а коли контакт пластини 2 замикається з контактом пластини 3, додається і зусилля від деформації цієї пластини 3. Механічна характеристика $F_M = f(\delta)$ показана на рис. 1.8, б. В початковому стані на якір діє початкове зусилля $F_{поч}$ – завчасний натяг пружини 4.

При зміні зазору δ на δ_1 буде мати місце холостий хід важеля якоря до дотику з пластиною 2; сила протидії збільшується пропорційно деформації гвинтової пружини 4 (ділянка ab). Потім нахил прямої різко збільшується, оскільки почалась деформація пластини 2 (ділянка bc). Такий нахил зберігається при зміні зазору δ на δ_2 – холостий хід пластини 2 до дотику з пластиною 3. Потім нахил прямої ще збільшується, оскільки

почалась деформація пластини 3 (ділянка cd). Зростання протидійного зусилля зупиняється, коли якір повністю притягнеться до осердя. Значення зазору при цьому дорівнює товщині штифта відлипання δ_0 . З графіка видно, що механічна характеристика має вигляд ламаної лінії, де кожен відрізок характеризує роботу якої-небудь групи пружин. В тому випадку, коли всі пружини, що створюють протидійне зусилля в контактній групі реле, мають початковий натяг, перехід з одного відрізка на другий відбувається стрибком (в точках b і c на рис. 1.8, в).

Для роботи реле необхідно, щоб силова і механічна характеристики були узгоджені. Для спрацьовування реле необхідно, щоб силова

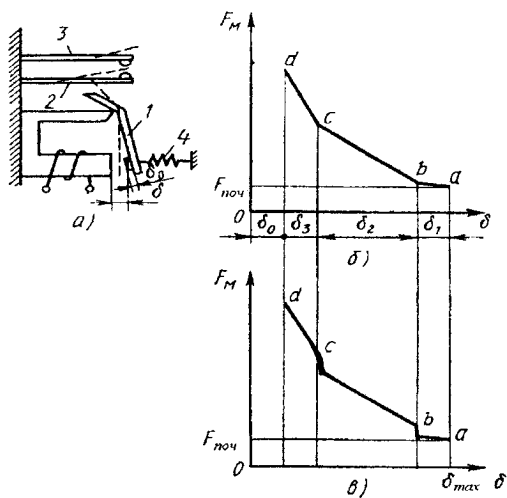


Рис. 1.8. Побудова механічної характеристики реле

характеристика, що відповідає струму спрацьовування, скрізь знаходилась вище механічної характеристики. При початковому зазорі ці характеристики мають спільну точку (точка A на рис. 1.9). Для відпускання реле необхідно, щоб силова характеристика, що відповідає струму відпускання, скрізь знаходилась нижче механічної характеристики. При

мінімальному зазорі ці характеристики можуть мати спільну точку (точка *Б* на рис. 1.9).

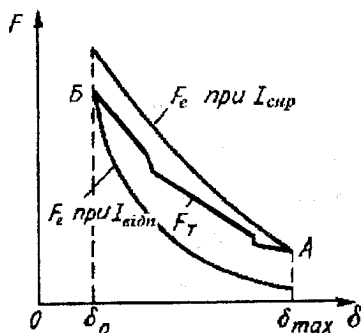


Рис. 1.9. Узгодження силової та механічних характеристик

1.3. Реле змінного струму

В попередніх параграфах розглядалась робота реле з живленням від мережі постійного струму. При подачі в обмотку реле змінного струму якір також буде притягуватись до осердя. Це пояснюється тим, що згідно з рівнянням (1.13), електромагнітне силове зусилля пропорційне квадрату МРС, а отже, і квадрату струму в обмотці. І тому, хоча змінний струм періодично змінює свій напрям, знак силового зусилля не буде залежати від напрямку струму. Таким чином, завжди буде діяти саме сила притягування, а не сила відштовхування.

Змінний струм, протікаючи по обмотці реле, створює в робочому зазорі магнітний потік:

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\delta_{max}} \sin \alpha t. \quad (1.18)$$

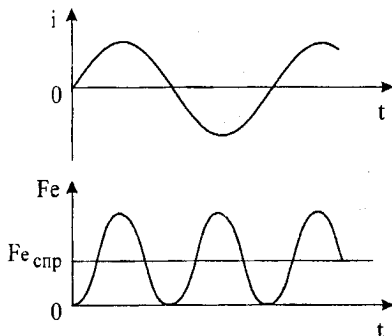


Рис. 1.10. Графіки зміни струму від силового зусилля реле змінного струму

Підставляючи (1.18) в рівняння (1.14), одержимо:

$$F_e = F_{e \max} \sin^2 \omega t, \quad (1.19)$$

де

$$F_{e \max} = \Phi_{\delta \max}^2 / (2 \mu_0 S \delta). \quad (1.20)$$

На рис. 1.14 наведені графіки залежності зміни струму i від часу в обмотці реле і електромагнітного силового зусилля F_e . Якір притягується до осердя під дією середнього значення електромагнітного зусилля, тобто його постійної складової $F_{e \text{ cpr}}$, що показана на рис. 1.14 прямою лінією. Величина $F_{e \text{ cpr}}$ визначається із рівняння (1.20), якщо замінити $\sin^2 \omega t$ на $(1 - \cos 2\omega t)/2$:

$$F_e = 0,5 F_{e \max} (1 - \cos 2\omega t) = F_{e \text{ cpr}} - 0,5 F_{e \max} \cos 2\omega t, \quad (1.21)$$

де

$$F_{e \text{ cpr}} = F_{e \max} / 2 = \Phi_{\delta \max}^2 / (4 \mu_0 S \delta), \quad (1.22)$$

а змінна складова $0,5 F_{e \max} \cos 2\omega t$ змінюється із подвійною частотою.

З рівняння (1.22) видно, що при однакових конструктивних розмірах реле і рівних значеннях максимальної магнітної індукції, середнє значення електромагнітного зусилля $F_{e\text{сер}}$ змінного струму в два рази менше, ніж у реле постійного струму. Двічі за період електромагнітне зусилля перетворюється в нуль. Отже, якір реле може вібрувати, періодично відтягуючись від осердя пружиною зворотного руху. Звичайно, через масу якоря сила інерції не дозволяє йому робити коливальні рухи. Періодична зміна сили тяжіння з'являється саме як тремтіння якоря, що супроводжується характерним гудінням на частоті 100 Гц (при живленні від мережі промислової частоти 50 Гц). В реле змінного струму для усунення вібрації якоря приймають спеціальні конструктивні заходи. Треба також відмітити, що присутність змінного потоку в магнітопроводі реле призводить до появи вихрових струмів в сталі. Ці струми нагрівають осердя, ярмо і якір реле, на що марно витрачається енергія. Для зменшення вихрових струмів і витрачання енергії магнітопровід набирається із окремих тонких (товщиною 0,5 або 0,35 мм) листів електротехнічної сталі, які ізолюють один від одного, що збільшує опір на шляху вихрових струмів, зменшує переріз сталі на цьому шляху.

Реле постійного струму отримали більше поширення, ніж реле змінного струму. Головна їх перевага – малі габарити і велика чутливість. При наявності мережі змінного струму можна включити реле постійного струму через випрямлювальні пристрої.

Реле змінного струму мають ще одну важливу особливість в порівнянні з реле постійного струму. При живленні обмотки реле від мережі змінного струму опір цієї обмотки буде мати як активну складову R , так і індуктивну складову $X_L = \omega L$, що визначається індуктивністю обмотки L . При підключенні обмотки реле до постійної напруги струм не залежить від переміщення якоря, він залишається постійним і визначається опором R .

Розглянемо три основних способи усунення вібрації реле змінного струму: застосування короткозамкненого витка, застосування багатофазної обмотки, застосування масивного якоря. Найбільш часто для вимкнення вібрації реле змінного струму використовується короткозамкнений виток, що охоплює частину осердя (рис. 1.11, а, б). В осерді робиться щілина на невелику висоту (зазвичай прорізається). В цю щілину вставляється одна сторона короткозамкненого витка, яка часто являє собою мідну штамповану прямокутну рамку.

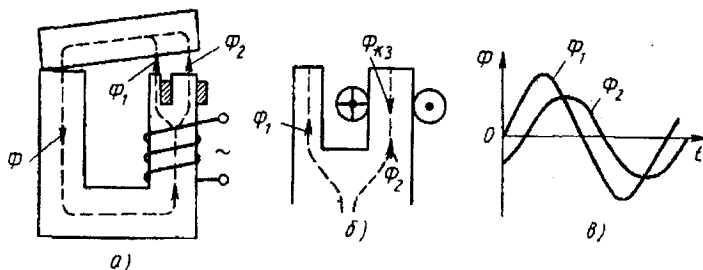


Рис. 1.11. Короткозамкнений виток в реле змінного струму

Принцип дії короткозамкненого витка. Змінний магнітний потік Φ , створений струмом в обмотці реле, проходить по осерддю і поділяється на дві частини: один потік Φ_1 проходить по сталі, не зменшуючи поверхню витка; другий потік Φ_2 проходить по сталі, наводячи у витку змінну ЕРС, як у вторинній обмотці трансформатора. Оскільки виток замкнений накоротко, то в ньому під дією наведеної ЕРС піде струм, створюючи магнітний потік $\Phi_{кз}$, що перешкоджає зміні магнітного потоку Φ_2 . Це призводить до відставання по фазі потоку Φ_2 від Φ_1 . Отже, в робочому зазорі реле змінного струму будуть діяти два зміщених в часі потоки (рис. 1.11, в). І тому електромагнітна тягова сила в жоден з моментів часу не буде дорівнювати нулю. Коли магнітний потік Φ_1 рівний нулю, то сила створюється ще не рівним нулю потоком Φ_2 , а коли цей потік Φ_2 стане

рівний нулю, вже потік Φ_1 збільшиться і забезпечить створення тягової сили. За допомогою короткозамкненого витка вдається забезпечити відставання магнітного потоку Φ_2 від Φ_1 на $60^\circ - 70^\circ$. Але за рахунок зустрічного потоку Φ_k , величина Φ_2 виходить менша, ніж Φ_1 .

Рівність потоків Φ_2 і Φ_1 та зсув їх по фазі на 90° можна забезпечити за допомогою двофазного реле. Таке реле має два осердя з розділними обмотками і спільний ярів. В коло однієї з обмоток включається конденсатор, який забезпечує зсув по фазі струмів в обмотках на 90° . При такому зсуві фаз та рівності магнітних потоків підсумкова сила притягання ярця буде мати постійне значення. При наявності трифазної мережі електромагнітний механізм реле може бути виконаний у вигляді Ш-подібного осердя з трьома обмотками (на кожному стержні – одна обмотка) і плоского ярця. Обмотки, зазвичай, з'єднуються зіркою та включаються в трифазну мережу. Три магнітних потоки в трьох робочих зазорах будуть створювати постійне силове зусилля на ярці. Однак точка прикладення цього зусилля буде переміщуватись по ярцю, тому що спочатку ярів сильніше притягується до крайнього стержня, потім до середнього, далі до другого крайнього і т.д.

Ставши важким, ярів, завдяки великій інерції, не може вібрувати з подвоєною частотою (2ω), оскільки не встигає відходити від осердя в ті моменти часу, коли струм в обмотці реле проходить через нуль і силове зусилля дорівнює нулю. Однак застосування важкого ярця призводить до збільшення розмірів реле і зменшення чутливості. Цей спосіб застосовується рідко, наприклад, коли виконавчий механізм, пов'язаний з ярцем реле, має велику інерцію.

При підключенні обмотки реле до змінної напруги струм буде змінюватись в залежності від переміщення ярця. Дійсно, електромагнітний механізм реле схожий на електромагнітний давач переміщення: його індуктивність L збільшується із зменшенням

повітряного зазору. Отже, при притягуванні якоря до осердя індуктивний опір буде збільшуватись, а струм – зменшуватись. І тому зусилля реле змінного струму, на відміну від реле постійного струму, мало збільшується чи взагалі не збільшується із зменшенням повітряного зазору.

1.4. Швидкодія електромагнітних реле

В 1.1 в числі головних параметрів електромагнітних реле були відмічені параметри, які характеризують швидкодію реле: час спрацювання $t_{спр}$ і час відпускання $t_{відп}$. Ці параметри визначаються при аналізі перехідних процесів, які проходять при вмиканні і вимиканні реле. Розглянемо ці процеси по відношенню до обмотки реле постійного струму.

Коло обмотки реле можна зобразити у вигляді послідовного з'єднання активного опору R і індуктивності L . Перехідний процес при вмиканні реле можна розглядати як відомий із електротехніки випадок вмикання котушки індуктивності на постійну напругу (рис. 1.12). З моменту замикаання ключа K виникає перехідний процес, під час якого струм в обмотці реле збільшується від нуля до деякого встановленого значення $i = I_{вст}$, змінюється і напруга u_R і u_L . Електричний стан кола по схемі (рис. 1.12, а) в довільний момент перехідного процесу характеризується рівнянням:

$$U = u_R + u_L = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (1.23)$$

Розв'язок цього рівняння відносно струму має вигляд:

$$i = I_{вст}(1 - e^{-t/T}), \quad (1.24)$$

де $I_{вст} = U/R$; $T = L/R$ – стала часу кола.

Графік залежності $i = f(t)$ представляє собою експоненту (штрихова крива 1 на рис. 1.12, б). Формула (1.24) отримана з припущенням, що

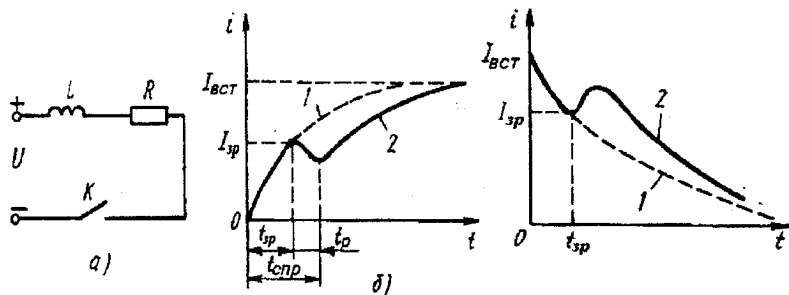


Рис. 1.12. Перехідні процеси при вмиканні і вимиканні реле постійного струму

індуктивність L обмотки постійна. В дійсності в процесі руху якоря до осердя індуктивність L збільшується (аналогічно роботі електромагнітного індуктивного давача переміщення, розглянутого в розд. б). Зміна індуктивності починається з того моменту часу, коли струм в обмотці досягає значення струму зрушення ($i = I_{zp}$). Початкове збільшення індуктивності призводить до збільшення сталої часу $T = L/R$. Отже, зростання струму сповільнюється. Крім того, швидке зростання магнітного потоку викликає збільшення проти-ЕРС, тобто напруги на індуктивності u_L . Це призводить навіть до зменшення на деякий час струму в колі (див. суцільну криву 2 на рис. 1.12, б). Як тільки якорь притягнеться до осердя, індуктивність обмотки перестає збільшуватись і струм знову збільшується по експоненті, але з меншою швидкістю, ніж на початковій ділянці, оскільки збільшилась стала часу.

Час спрацьовування реле $t_{спр}$ визначається двома складовими (рис. 1.12, б): часом зрушення $t_{зр}$ і часом руху t_p , тобто

$$t_{спр} = t_{зр} + t_p \quad (1.25)$$

Величину часу зрушення отримаємо, підставляючи в (1.24) значення

$$I_{зр} = I_{всм} (1 - e^{-t_{зр}/T}), \quad (1.26)$$

звідки

$$t_{зр} = T \ln \frac{I_{всм}}{I_{всм} - I_{зр}}. \quad (1.27)$$

Час руху t_p залежить від механічної інерції електромагнітного механізму реле. Воно може бути визначене на підставі другого закону Ньютона $a=F/m$, де a – прискорення, m – маса. Для зменшення часу руху необхідно намагатися зменшувати масу якоря. Для даного типу реле можна вважати величину t_p приблизно постійною. І тому головним фактором, який впливає на час спрацьовування реле $t_{спр}$, є стала часу $T=L/R$.

Розглянемо способи прискорення спрацьовування реле постійного струму, які основані саме на зміні тривалості перехідного процесу. Послідовно з обмотками реле вмикається додатковий активний опір $R_{доd}$ (рис. 1.13), а напруга живлення підвищується на величину ΔU , яка обирається таким чином, щоб встановлене значення струму залишилось незмінним, тобто

$$I_{всм} = \frac{U + \Delta U}{R + R_{доd}} = \frac{U}{R}. \quad (1.28)$$

Тепер стала часу зменшилась ($\frac{L}{R + R_{\text{доп}}} < \frac{L}{R}$) і збільшення струму буде

проходити по більш крутій експоненті (крива 2 на рис. 1.13, б), ніж без додаткового опору (крива 1 на рис. 1.13, б).

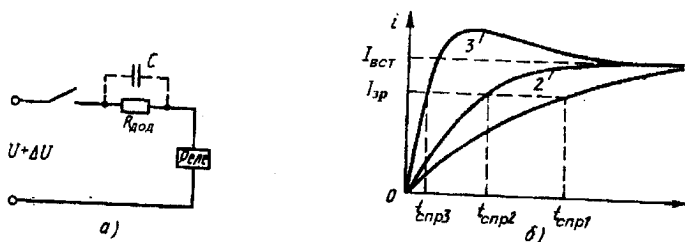


Рис. 1.13. Способи прискорення спрацьовування реле постійного струму

Ще більше прискорення спрацьовування реле можна одержати підключивши паралельно до додаткового опору $R_{\text{доп}}$ конденсатор ємністю C (на рис. 1.13, а таке включення показане штрихом). При замиканні ключа K струм перехідного процесу проходить через ємність в обхід $R_{\text{доп}}$, тому що до замикання ключа напруга на конденсаторі дорівнювала нулю, а стрибком вона змінитись не може. Тому в перший момент часу вся збільшена напруга прикладена саме до котушки реле. В колі з'являється значний струм, але він безпечний для обмотки, оскільки діє протягом малого часу. По закінченні перехідного процесу струм зменшується до встановленого значення, оскільки він проходить через $R_{\text{доп}}$ (через конденсатор постійний струм не проходить). Ємність конденсатора (в мкФ) обирається з умови:

$$C = \frac{L}{R + R_{\text{доп}}} 10^6. \quad (1.29)$$

Тепер розглянемо перехідний процес при вимиканні реле. При розмиканні ключа K (рис. 1.12, а) струм в обмотці реле зменшується від

значення $I_{вст}$ до нуля. Енергія, яка запаслась в магнітному полі обмотки реле, підтримує деякий час струм за рахунок дугового розряду між контактами ключа K . Рівняння струму перехідного процесу отримаємо, розв'язавши диференційне рівняння (1.23) при $U=0$:

$$i = I_{вст}e^{-t/T}, \quad (1.30)$$

де $T=L/R$; L - індуктивність обмотки реле при притягнутому якорі.

Графік залежності $i=f(t)$ показано на рис. 1.12, в у вигляді експоненти (штрихова лінія 1). Крива 2 показує реальну зміну струму в обмотці при відключенні. Сплеск струму на цій кривій пояснюється

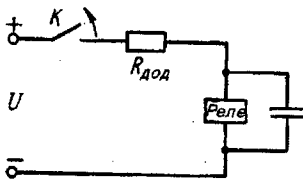


Рис. 1.14. Схема для сповільнення часу спрацьовування

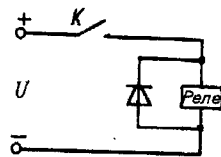


Рис. 1.15. Схема вмикання реле з шунтувальним діодом

зміною індуктивності обмотки при русі якоря (аналогічно сплескові струму при вмиканні реле).

До схемних методів сповільнення часу спрацьовування і відпускання відноситься метод шунтування обмотки реле конденсатором (рис. 1.14). При вмиканні реле струм в його обмотці буде збільшуватись повільніше за рахунок процесу зарядки конденсатора. Час спрацьовування може бути збільшено приблизно до 1 с, а, при вмиканні без конденсатора, він становить приблизно 50 мс. При відключенні реле, навпаки, конденсатор буде розряджатись на обмотку реле, сповільнюючи в ній струм. Додатковий опір $R_{дод}$ необхідний для обмеження струму, який споживається від джерела живлення.

Ефективним схемним методом сповільнення часу відпускання є підключення паралельно до обмотки реле діода (в непровідному, по відношенню до напруги живлення, напрямку). В цьому випадку (рис. 1.15) ЕРС самоіндукції, що виникає в обмотці реле при відключенні, створює струм, який протікає через обмотку і реле та утримує якір деякий час в притягнутому положенні. Підключення діода використовується і для захисту обмотки реле від пробоя під дією перевантаження при вимиканні.

Сповільнення роботи забезпечується і за допомогою короткозамкненого витка (чи обмотки) на шляху магнітного потоку.

На рис. 1.16 приведені схемні варіанти зміни часових параметрів електромагнітних реле. До конструктивних методів зменшення часових параметрів реле відносяться зменшення руху якоря, зменшення вихрових струмів за рахунок застосування шихтованого (набраного з окремих пластин) магнітопроводу. Потрібно також згадати, що реле постійного струму є більш швидкодієвим, ніж реле змінного струму.

Електромагнітне реле як дискретний елемент у першому наближенні можна розглядати в якості ланки частого запізнювання з передаточною функцією:

$$W(p) = U_{вих}(p)/U_{вх}(p) = ke^{p t_{спр}}, \quad (1.31)$$

де $U_{вих}(p)$ і $U_{вх}(p)$ – зображення за Лапласом відповідно функцій $U_{вих}(t)$ і $U_{вх}(t)$;

$k = U_{вих}/U_{вх}$ – коефіцієнт передачі реле; $t_{спр}$ – час спрацьовування реле.

1.5. Поляризовані реле

В автоматичних системах досить часто вимагається, щоб елементи, в тому числі і електромагнітні реле, реагували не тільки на значення, але й на полярність струму на вході. Наприклад, в системі автоматичного

регулювання температури, при температурі, яка перевищує те значення, що вимагається, повинен включатись охолоджувач (наприклад,

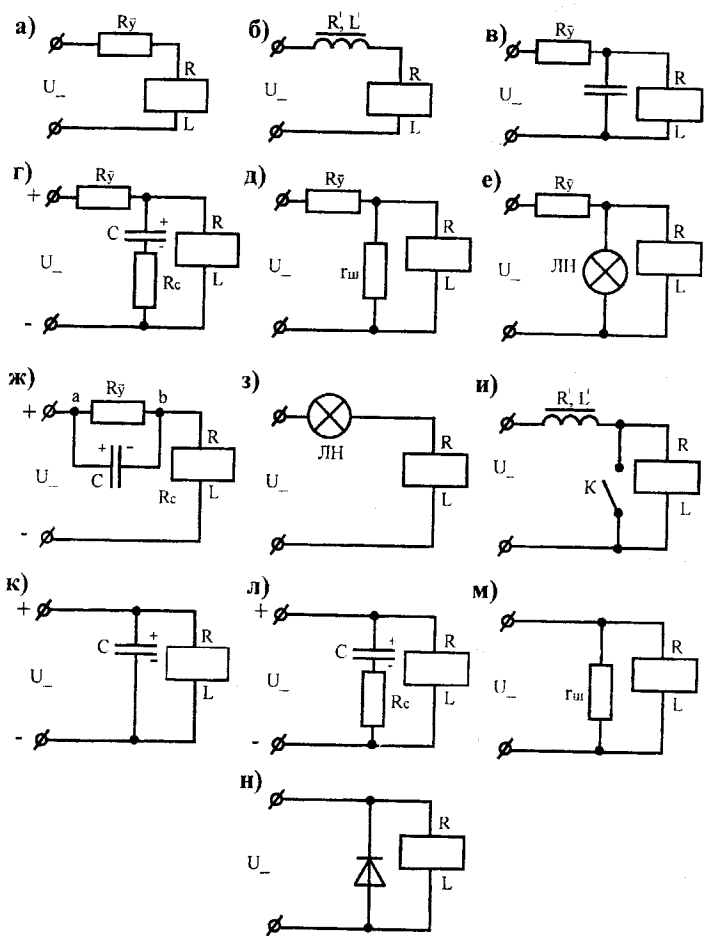


Рис. 1.16. Зміна часових параметрів електромагнітних реле

вентилятор), а при температурі нижче значення, що вимагається, повинен включатись нагрівач. Отже, реле при одній полярності вхідного сигналу повинно включати одну групу контактів, а при іншій полярності – іншу. Як відомо з електротехніки, при пропусканні струму по котушці з осердям,

створюється магнітне поле і на сталеві деталі, що знаходяться в цьому полі, буде діяти сила притягання. Напрямок струму або знак індукції магнітного поля не впливають на напрямок сили. Це завжди сила притягання, а не відштовхування. В попередній главі наведені формули для електромагнітної сили (1.13) і (1.14). В цих формулах значення струму або магнітного потоку взято в квадраті, що і математично доводить незмінність напрямку електромагнітної сили при модифікації знаку струму або потоку.

Для одержання в електромагнітному механізмі знакозмінної залежності сили тяжіння від напрямку вхідного сигналу необхідна наявність двох магнітних потоків: потоку, що створюється струмом в обмотці реле, і постійного, незмінного за величиною і напрямком, що створюється зазвичай постійним магнітом. Таким чином, при одному напрямку струму в обмотці реле магнітні потоки будуть додаватись, а при іншому напрямку струму – відніматись. Отже, модифікація напрямку струму призведе до модифікації абсолютної величини магнітного потоку, чого не було в електромагнітних нейтральних реле.

Чутливість до напрямку (поляризація) здійснюється за рахунок постійного магнітного потоку. Всі поляризовані реле основані на використанні в електромагнітному механізмі двох потоків. За конструктивною схемою магнітного кола розрізняють поляризовані реле, що побудовані за диференційною і мостовою схемами. За кількістю стійких положень якоря розрізняють двопозиційні і трипозиційні поляризовані реле. Поляризоване реле з диференційною схемою магнітного кола показано на рис. 1.17. Робочий (керувальний) магнітний потік Φ_y створюється при проходженні струму по обмотці реле, що складається з двох однакових половин l і l' , ввімкнених послідовно та узгоджено. Постійний (поляризувальний) магнітний потік Φ_n створюється постійним магнітом 2. Котушки реле l і l' розміщені на нерухомому

осерді 3. Якір 4 може обертатись відносно вісі O в робочому зазорі δ . На якорі розміщений рухомий контакт, який може замикатись з нерухомими контактами 5 або 5'.

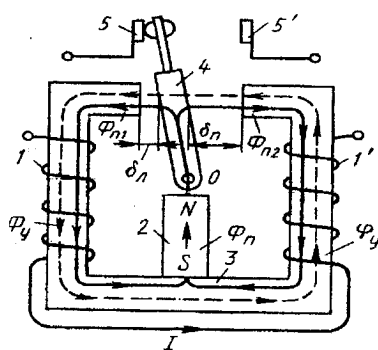


Рис. 1.17. Поляризоване реле

Шлях магнітного потоку Φ_y показаний пунктиром, а шлях магнітного потоку Φ_n – неперервною лінією. Напрямок потоку Φ_n незмінний, а напрямок потоку Φ_y залежить від напрямку струму в котушці реле.

На рис. 1.17 напрямок потоку Φ_y показаний для позначеного на цьому рисунку напрямку струму I .

Поляризувальний потік Φ_n проходить по якорю 4 і розділяється на дві частини Φ_{n1} і Φ_{n2} у відповідності з провідностями повітряних зазорів ліворуч (δ_n) і праворуч (δ_n) від якоря. В залежності від полярності струму в обмотці реле робочий потік Φ_y віднімається від потоку Φ_{n1} в зазорі ліворуч від якоря і додається до потоку Φ_{n2} в зазорі праворуч від якоря (як показано на рис. 1.17), або навпаки: потоки додаються в лівому зазорі і віднімаються в правому зазорі при протилежному напрямку струму. На якір діють дві електромагнітні сили, направлені назустріч одна одній, кожна з яких пропорційна у відповідності з рівнянням (1.14) квадрату потоку у відповідній частині зазору. Для напрямків струму і магнітних потоків, що наведені на рис. 1.17, результуюче тягове зусилля змусить якір перекинутись з лівого положення в праве. При відключенні вхідного сигналу ($I=0$) якір залишається в тому ж положенні, що він займав до вимикання сигналу. Реле, яке показано на рис. 1.17, є двопозиційним. Підсумкове електромагнітне зусилля, що діє на якір поляризованого реле,

направлене в сторону того зазору, в якому керувальний і поляризувальний магнітні потоки додаються.

Розглянемо зусилля, що діє на яркір поляризованого реле. Воно визначається у відповідності з рівнянням (1.14). В середньому положенні яркоря магнітні провідності лівого і правого зазору однакові і тому поляризувальний потік поділяється на дві рівні частини: $\Phi_{n1} = \Phi_{n2} = \Phi_n/2$. Через відсутність потоку управління на яркір будуть діяти однакові зусилля ліворуч і праворуч:

$$F_{en} = F_{en} = 4 \cdot 10^5 \cdot (\Phi_n/2)^2 \cdot 1/s_\delta = 10^5 \cdot \Phi_n^2 / s_\delta, \quad (1.32)$$

де s_δ – площа перерізу повітряного зазору.

Підсумкова сила, яка дорівнює різниці F_{en} і F_{en} при середньому положенні яркоря, буде дорівнювати нулю. Однак яркір в середньому положенні знаходиться в стані нестійкої рівноваги. Достатньо незначного зміщення яркоря від середнього положення, щоб відбувся перерозподіл потоку. Буде зменшуватись магнітний опір того зазору, в який бік змістився яркір. Отже, в той самий бік збільшиться магнітний потік, а відповідно, і сила, направлена в бік зменшення зазору. Вважаючи перетин повітряного зазору незмінним, розглянемо перерозподіл поляризувального потоку в залежності від магнітного опору, що буде в цьому випадку пропорційний величині зазору.

Відношення магнітних потоків в лівому і правому зазорі обернено пропорційне відношенню магнітних опорів цих зазорів:

$$\Phi_{n1} / \Phi_{n2} = R_{m2} / R_{m1} = \delta_n / \delta_n. \quad (1.33)$$

Враховуючи, що $\Phi_{n1} + \Phi_{n2} = \Phi_n$, а $\delta_n + \delta_n = \delta$ (рис. 1.17), після перетворень отримуємо:

$$\Phi_{n1} = \Phi_n * (\delta - \delta_N) / \delta, \quad (1.34)$$

$$\Phi_{n2} = \Phi_n * \delta_N / \delta \quad (1.35)$$

Відповідно електромагнітні сили притягання якоря, направлені ліворуч і праворуч:

$$F_{en} = 4 * 10^5 * \Phi_n^2 / s_{\delta} * (\delta - \delta_N)^2 / \delta^2, \quad (1.36)$$

$$F_{en} = 4 * 10^5 * \Phi_n^2 / s_{\delta} * \delta_N^2 / \delta^2. \quad (1.37)$$

Підсумкова сила визначається як різниця цих сил:

$$F_e = F_{en} - F'_{en} = 4 * 10^5 * \Phi_n^2 / s_{\delta} * (\delta^2 - 2\delta\delta_N) / \delta^2 = 4 * 10^5 * \Phi_n / s_{\delta} * (\delta - 2\delta_N) / \delta \quad (1.38)$$

При $\delta_n < \delta/2$ (якір ближче до лівого крайнього положення) сила тягне якір вліво.

При $\delta_n > \delta/2$ (якір ближче до правого крайнього положення) сила тягне якір вправо.

Контактний тиск вимкненого реле визначається силою при $\delta_n = 0$

$$F_{eo} = 4 * 10^5 * \Phi_n^2 / s_{\delta} \quad (1.39)$$

При подачі струму в обмотку поляризованого реле в магнітному колі виникає магнітний потік Φ_y , який (для полярності, що зображено на рис. 1.17) додається у правому зазорі до Φ_{n2} і у лівому віднімається від Φ_{n1} .

При досягненні Φ_y значення рівного Φ_n контактне зусилля буде рівним нулю. Як тільки Φ_y стане більшим за Φ_n , якір перекинеться в крайнє праве положення. Струм, при якому якір перекидається в нове положення, називається струмом спрацьовування $I_{сп}$. В новому положенні якоря відбудеться перерозподіл поляризувального магнітного потоку між зазорами. Сумарний потік в новому положенні якоря при $I_{сп}$ буде дорівнювати $\Sigma\Phi = \Phi_n + \Phi_y$. Оскільки при спрацьовуванні $\Phi_y = \Phi_n$, то $\Sigma\Phi = 2\Phi_n$, а зусилля, пропорційне квадрату магнітного потоку, зросте в чотири рази у порівнянні з зусиллям в реле, в якому відсутній струм. Таким чином, в процесі переміщення якоря з одного положення в інше відбувається значне збільшення тягового зусилля. Цим і пояснюється те, що поляризовані реле мають дуже високу швидкодію: час спрацьовування складає декілька мілісекунд. Крім того, додаткове зусилля, стискаючи

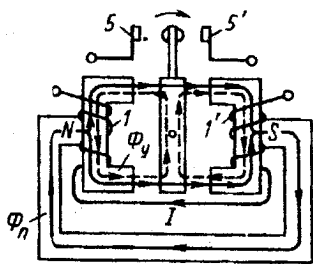


Рис. 1.18. Поляризоване реле з мостовим магнітним ланцюгом

контакти, дозволяє при дуже малому сигналі керування управляти відносно потужними електричними колами. Однак головною перевагою поляризованих реле є їх висока чутливість. Найчастіше намагаються запобігти збільшенню розривної потужності їх контактів, оскільки це вимагає збільшення ходу якоря, що

приводить до втрати чутливості. Тому високочутливі поляризовані реле виконуються малопотужними, з ходом якоря від одного крайнього положення до іншого порядку 0,1 - 0,2 мм.

Робота поляризованого реле з мостовою схемою магнітного кола (рис. 1.18) відбувається аналогічно роботі реле з диференційною схемою. Відмінністю є те, що магнітне коло для потоку управління Φ_y , що створюється обмоткою реле, виконане окремо від магнітного кола для

поляризувального потоку Φ_n , яке створюється постійним магнітом. Завдяки цьому поляризовані реле мостового типу мають більш високу стабільність параметрів і більшу стійкість до зовнішніх механічних впливів.

Побудова поляризованого реле. Окрім електромагнітного зусилля, на якір поляризованого реле впливає зусилля пружин, не показаних на рис. 1.17 і 1.18. В залежності від положення нерухомих контактів і натягу (або стиску) пружин поляризовані реле можуть настраюватись на дво- або трипозиційну роботу.

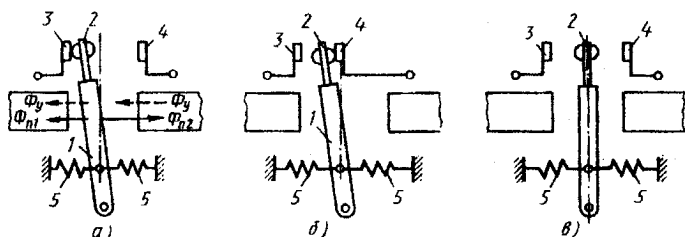


Рис. 1.19. Настроювання контактів поляризованого реле

Розглянемо настроювання контактів реле на двопозиційну роботу. Пружини з двох сторін впливають на якір з рівними зусиллями в нейтральному положенні. Якщо зусилля пружин невеликі і нерухомі контакти розміщені симетрично відносно нейтралі, то за відсутності вхідного сигналу (струму в обмотці реле) за рахунок однієї із складових поляризувального потоку (Φ_{n1} або Φ_{n2}) якір 1 залишається в тому ж положенні, в якому він знаходився до зняття вхідного сигналу. Отже, залишаються замкненими відповідні контакти реле (наприклад, контакти 2-3 на рис. 1.19, а). В цьому випадку механічне зусилля пружин 5, яке прагне повернути якір в нейтральне положення, менше за тягове зусилля потоку постійного магніту, що прагне утримати якір в притягнутому положенні. При подачі струму протилежної полярності в обмотку реле,

якір перекидається в протилежне крайнє положення, розмикаючи контакти 2-3 і замикаючи контакти 2-4. При знятті цього вхідного сигналу контакти 2-4 залишаються замкненими. Навіть якщо вхідний сигнал буде знятий у той момент, коли якір знаходиться в нейтральному положенні, таке положення буде нестійким. При найменшому відхиленні якоря від цього положення (наприклад, внаслідок незначного струсу або вібрації) зросте поляризувальний потік в тому напрямку, куди відхилився якір, і відповідне йому електромагнітне зусилля перемістить якір до упору у тому ж напрямку.

Таким чином, при такій настройці якір реле займає тільки два стійких симетричних положення (позиції): крайнє ліве (замкнені контакти 2-3) або крайнє праве (замкнені контакти 2-4).

Можливе настроювання на двопозиційну роботу з домінуванням (пріоритетом) однієї з позицій (рис. 1.19, б). Якщо нерухомий контакт, наприклад 3, встановити з тієї ж сторони відносно нейтралі, що і другий нерухомий контакт 4, то тягове зусилля від поляризувального потоку Φ_{n1} , яке намагається утримати якір реле в крайньому лівому положенні, буде набагато меншим за тягове зусилля від поляризувального потоку Φ_{n2} , що прагне утримати якір в крайньому правому положенні. В результаті цього при знятті вхідного сигналу якір реле під дією тягового зусилля від потоку Φ_{n2} буде встановлюватись і відраховуватись в крайньому правому положенні. Таким чином, подібне настроювання забезпечує двопозиційне настроювання реле з пріоритетом однієї позиції. При подачі в обмотку реле струму відповідної полярності якір займає крайнє ліве положення (замкнені контакти 2-3), а при подачі струму протилежної полярності, або при відсутності струму в обмотці реле, якір займає крайнє праве положення (замкнені контакти 2-4).

Для настроювання поляризованого реле на трипозиційну роботу необхідні пружини 5 великої жорсткості, що забезпечують перевищення

механічного зусилля над електромагнітним зусиллям від поляризувального магніту в крайніх положеннях якоря. В цьому випадку при відсутності струму в обмотці реле його ярк буде встановлюватись в нейтральне положення при розімкнених контактах (рис. 1.19, б). Таким чином, забезпечуються три позиції (положення) якоря: 1) крайнє ліве положення (замкнені контакти 2-3) – при подачі в обмотку струму відповідної полярності; 2) крайнє праве положення (замкнені контакти 2-4) – при подачі в обмотку реле струму протилежної полярності; 3) нейтральне середнє положення (всі контакти розімкнені) – при знятті вхідного сигналу з обмотки реле.

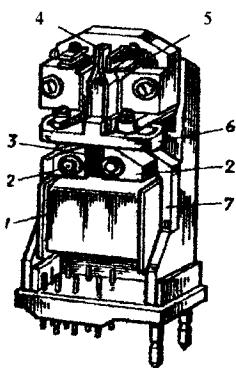


Рис. 1.1.20. Поляризоване реле типу РП-7

Вітчизняною промисловістю випускаються поляризовані реле різноманітних типів і з різноманітним настроюванням контактів.

Наприклад, реле типу РП-4 – двопозиційне (з нейтральним настроюванням); реле типу РП-5 – трипозиційне; реле типу РП-7 – двопозиційне з домінуванням. Ці реле можуть мати декілька незалежних обмоток, що розширює можливості їх застосування в системах автоматики. На рис. 1.20 приведене

поляризоване реле типу РП-7, що складається з котушки 1, полюсних кінцевиків 2, якоря 3, контактних пружин з рухомими контактами 4, нерухомих контактів 5, магніто-проводу 6, керамічної колодки 7 зі штирковими виводами, що дозволяє швидко вмикати реле в робочу схему, вставляючи його у відповідну з'єднувальну колодку.

1.6. Спеціальні реле

Найбільше розповсюдження у системах автоматики отримали реле електромагнітного типу, що були розглянуті раніше. Проте знаходять

застосування і електричні реле інших типів, в яких тягове зусилля, необхідне для перемикання контактів, створюється не за допомогою електромагніта. Сюди відносяться, насамперед, реле, аналогічні за принципом дії електровимірювальним приладам різноманітних систем: *магнітоелектричні, електродинамічні, індукційні*. Якщо в електровимірювальному приладі рухома частина переміщує по шкалі стрілку або будь-який покажчик, то в реле відповідного типу рухома частина переміщує контакти.

Для отримання значних витримок часу (тобто, проміжків часу між подачею напруги на обмотку реле і спрацьовуванням його контактів) при замиканні та розмиканні контактів використовуються спеціальні *реле часу*; деякі з них мають в основі електромагнітний механізм, але з додаванням різноманітних приладів, що забезпечують затримку спрацьовування або відпускання.

В системах автоматичного захисту обладнання від аварійних режимів використовуються спеціальні реле, що спрацьовують при певному значенні струму, напруги, швидкості, моменту, тиску і інших параметрів.

Реле часу. Для отримання більших сповільнювань при замиканні і розмиканні контактів використовуються реле часу. В цих реле зазвичай використовують електромагніт, що приводить у дію будь-який механічний прилад, що має чималу інерційність, або включає електродвигун, що переміщує контакти через понижувальний редуктор з великим передавальним співвідношенням.

Розглянемо на прикладі декілька типів реле часу.

Маятникове (годинникове) реле часу (рис. 1.21) складається з електромагніта з втяжним якорем 1, що при подачі вхідного сигналу переміщує тягу 2 і, стискаючи пружину 3, прагне перемістити важіль з зубчастим сектором 4 справа наліво. Але спускове зубчасте колесо 5 зі

скобою 6 може повертатись за кожне коливання маятника 7 лише на один зубець, завдяки чому швидкість переміщення зубчастого сектора 4 обмежується. Після того, як всі зубці сектора 4 вийдуть зі зчеплення з храповим колесом 8, спрацює мікроперемикач 9.

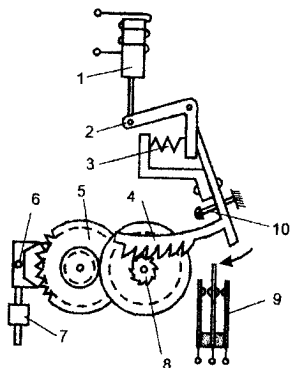


Рис. 1.21. Маятникове реле часу з електромагнітом

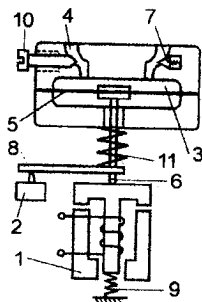


Рис. 1.22. Пневматичне реле часу з електромагнітом

При знятті вихідного сигналу з електромагніта 1 сектор 4 швидко повертається до вхідного стану під дією ваги якоря електромагніта 1 і зусилля пружини 3. Мікроперемикач вимикається без затримки часу. Таким чином, забезпечується затримка часу тільки при спрацьовуванні реле, але не при відпусканні.

Груба настройка часу спрацьовування регулюється гвинтом 10, що обмежує довжину зчеплення сектора 4 з храповим колесом 8. Точне настроювання часу спрацьовування регулюється переміщенням вантажу маятника 7. Маятникове реле забезпечує витримку часу до десятків секунд.

Пневматичне реле часу (рис. 1.22) також має електромагніт 1 і пневматичну приставку з мікроперемикачем 2. Герметична камера 3 пневматичної приставки з'єднується з атмосферою через вузький отвір 4. Камера 3 перегороджена еластичною плоскою мембраною, що виготовлена з силіконової гуми. Мембрана з'єднана зі штоком 6, що спирається на ярір електромагніту.

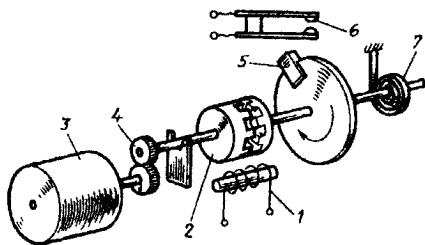


Рис. 1.23. Моторне реле часу з електромагнітом

При подачі сигналу керування якір електромагніту 1 втягується. Шток 6, позбавлений опори, під дією пружини 11 поволі опускається донизу в міру заповнення порожнини приставки повітрям через отвір 4. В кінці ходу штока важіль 8 спричиняє перемикання контактів мікроперемикача 2. Повернення реле у вхідне положення відбувається при знятті вхідного сигналу з електромагніту під дією пружини 9. При цьому повітря з пневматичної камери миттєво витісняється крізь зворотний клапан 7. Отже, повернення контактів реле, відбувається без затримки часу. Якщо зворотний клапан 7 розміщений не у верхній, а в нижній камері, то відповідно з уповільненням буде відбуватись не спрацювання реле, а відпускання. Для регулювання витримки часу в реле використовується гвинт 10, що змінює перетин дроселювального отвору 4. Пневматичні реле забезпечують затримку часу до декількох хвилин.

Для отримання триваліших затримок часу (десятки хвилин і години) використовують електродвигунні (моторні) реле часу. На рис. 1.23 показано схему приладу такого реле. При подачі сигналу керування на обмотку електромагніту 1 вмикається муфта зчеплення і обертання синхронного мікроелектродвигуна 3, що через редуктор 4 передається кулачкові з упором 5, який після повороту на деякий кут ввімкне мікроперемикач 6. Після зняття сигналу керування муфта зчеплення роз'єднує кінематичне коло від електродвигуна до кулачка, а сам кулачок

під дією пружини 7 повертається у початкове положення, вимикаючи при цьому мікроперемикач 6. Точне настроювання часу спрацювання електродвигунного реле забезпечується зміною початкового становища кулачка з упором, а грубе – зміною передавального відношення редуктора.

Існують багатоколові реле такого типу, в яких на валу встановлено в різних положеннях декілька кулачків, що забезпечують незалежні затримки часу спрацювання і вимкнення відповідної кількості контактних груп. За допомогою таких приладів (інколи їх називають командоапаратами) забезпечується програмне (за часом) управління комплектними електроустановками.

1.7. Магнітокеровані контакти (геркони)

Підвищені вимоги до надійності елементів автоматики призвели до появи герметизованих магнітокерованих контактів (*герконів*). Магнітокеровані контакти (МКК) знаходять широке застосування не тільки в без'якірних реле, але і в якості кінцевих і колійних перемикачів, давачів положень і переміщення, координатних перемикачів і т.п.

Найпростіші МКК (рис. 1.24) являють собою скляну трубочку (колбочку) 1 з впаяними в неї пермалоевими пластинками – контактами 2, між кінцями яких залишений робочий зазор 3. Тут робочий зазор магнітної системи сполучений із зазором контактів. Зовнішні контакти 4 служать для приєднання до керованого електричного ланцюга. Для зменшення і стабілізації перехідного опору контактів їхні поверхні дотикання покриваються сріблом, золотом, родієм та ін. Таким чином, у МКК електроди виконують функції магнітопроводу, що розмикають пружини і електричні контакти. Для зменшення електричної ерозії контактів порожнина колбочки заповнюється інертним газом: азотом, аргоном, аргон-гелієвою сумішшю і т.п.

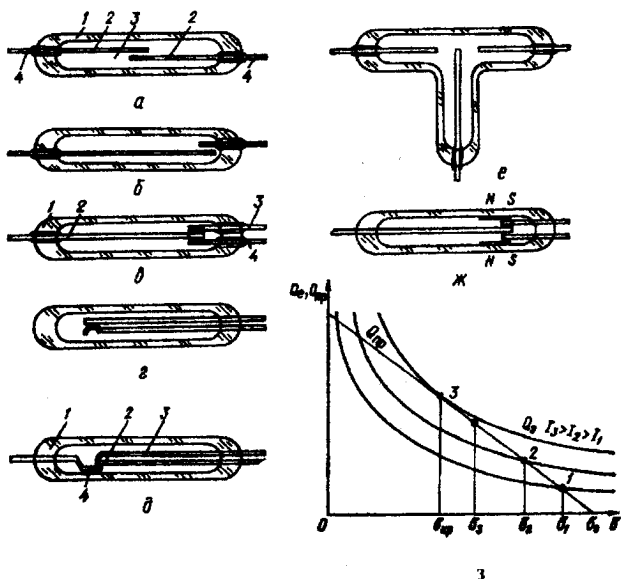


Рис. 1.24. Магнітокерванні контакти (геркони)

Під впливом зовнішнього магнітного поля на електродах виникає тягове зусилля. Вони наближуються і замикають електричний ланцюг. Зазвичай зовнішнє магнітне поле створюється обмоткою, що живиться постійним струмом. Можливе керування і полем постійного магніту 3 (рис. 1.24, б, в). В останньому випадку спрацювання контактів здійснюється в залежності від взаємного переміщення геркона і постійного магніта 3. Зміна магнітного поля, яке впливає на контакти, може здійснюватись і за рахунок зміни параметрів магнітного кола при переміщенні феромагнітного екрана 4 (рис. 1.24, в).

Процес спрацювання МКК відрізняється від спрацювання електромагнітів. Рух електродів МКК починається з появою струму в обмотці, що створює магнітне поле. Із збільшенням струму в обмотці електроди, переміщуючись, займають положення $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots$, обумовлені рівністю тягового F_c і протидійного F_{np} зусиль на електродах (точки 1, 2, 3

на рис. 1.24, з). При критичному зазорі $\delta_{кр}$ силова характеристика $F_c = (\delta)$ наближується до механічної $F_{пр} = f(\delta)$; при цьому закінчується попереднє зближення електродів.

При зазорах, менших від критичного ($\delta < \delta_{кр}$), тягове зусилля F_c буде більшим від протидійного $F_{пр}$: силова характеристика навіть при незмінному струмі $I = I_{кр} = \text{const}$ у котушці всіма своїми точками лежить вище від механічної, і електроди переміщуються до повного замикання.

Магнітокеровані контакти можуть мати *послідовну, рівнобіжну, змішану, диференційну* або *мостову* магнітні системи.

Послідовна магнітна система (рис. 1.24, а–в) відрізняється простотою конструкції і технології, невеликими розмірами і характеризується послідовним розташуванням магнітних опорів магнітного ланцюга; електродів R_n і робочого повітряного зазору R_δ .

Рівнобіжна магнітна система МКК (рис. 1.24, г) має рівнобіжне вмикання магнітних ділянок. При наявності зовнішнього поля обидва електроди намагнічуються в одному напрямку і, відштовхуючись один від одного, розмикаються. Така система зручна для контактів, що розмикаються, а розташування виводів з однієї сторони колбочки забезпечує зручність монтажу.

Змішана магнітна система (рис. 1.24, д) застосовується як у контактах, що замикаються, так і в тих, що перемикаються. Вона має як послідовні, так і рівнобіжні ділянки і найменшу МРС спрацьовування, оскільки рухомий електрод 2 відчуває зусилля, що відштовхує його від електрода 3 і притягує до електрода 4.

Диференційна система (рис. 1.24, е) має два робочих зазори, а на середній електрод діє різниця двох зусиль. Перемикання здійснюється у бік дії більшого зусилля. Така система використовується в диференційних і поляризованих реле.

Мостова система (рис. 1.24, ж), як і диференційна, відрізняється

двома робочими зазорами, але має два повздовжні постійні магніти. Мостова система застосовується в РП.

Нейтральні МКК (рис. 1.24, а–д) спрацьовують практично при будь-якій орієнтації зовнішнього магнітного поля. У поляризованих МКК чутливість до напрямку струму в обмотці (полярності зовнішнього магнітного поля) забезпечується полем постійних магнітів (див. рис. 1.24, ж).

Реле з МКК відрізняються різноманітністю конструктивних виконань. Проте, найбільше поширення отримали реле з МКК, розташованими всередині котушки електромагніту постійного струму (рис. 1.25) із зовнішнім магнітопроводом або без нього. Внутрішнє розташування МКК доцільне при їх кількості до 7 шт. При більшій їх кількості збільшення розмірів котушки викликає підвищену витрату міді.

На рис. 1.25 показане проміжне реле на МКК типу РПГ. У ньому чотири МКК 2 розташовані всередині обмотки 1, що виконана на пластмасовому каркасі. Позиціонування МКК всередині котушки здійснено за допомогою гумових чопів 3 і пластмасових копилів 4. Останні закріплені в прорізах скоб 7, які виконані із конструкційної сталі. Ці скоби є частинами зовнішнього магнітопроводу. Основною частиною магнітопроводу є зовнішній, відносно обмотки, магнітний екран 6. За допомогою скоб 7 всі елементи реле кріпляться до пластмасової підставки 8, обладнані пластинчастими виводами. Елементи реле захищені пластмасовим кожухом 5.

У багатоконтактних реле МКК спрацьовують неодноразомно не тільки через різницю їх механічних характеристик, але і тому, що перший МКК, що замкнувся, шунтує магнітні системи інших МКК, спрацьовування яких буде відбуватись при великих МРС.

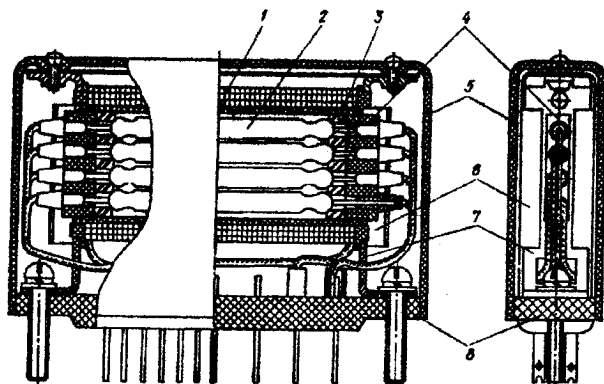


Рис. 1.25. Проміжне реле на МКК типу РПП

Визначимо МРС спрацьовування для нейтрального реле з МКК. Електромагнітна сила на електродах МКК визначається

$$F_e = -\frac{1}{2}(Iw)^2 \frac{dG_M}{d\delta}, \quad (1.40)$$

де I , w - струм в обмотці і її число витків; G_M - сумарна магнітна провідність ланцюга; δ - довжина робочого зазору. Сумарна провідність магнітного ланцюга реле з МКК:

$$G_M = \frac{G_\delta G_{CT}}{G_\delta + G_{CT}}, \quad (1.41)$$

де G_δ - магнітна провідність робочого зазору; G_{CT} - сумарна провідність магнітопроводу з врахуванням неробочих зазорів. У багатоконтактних реле магнітна провідність робочих зазорів з припущенням рівномірності магнітного поля в них і відсутності потоків випучування:

$$G_{\delta} = \frac{n\mu_0 S_{\delta}}{\delta} = \frac{n\mu_0 b l_{\delta}}{\delta}, \quad (1.42)$$

де n - кількість МКК у реле; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна проникність повітря; $S_{\delta} = b l_{\delta}$ - площа робочого зазору, м²; δ - довжина робочого зазору, м. Вважаючи $G_{CT} = \text{const}$, з врахуванням (1.41) знаходимо:

$$\frac{dG_M}{d\delta} = \frac{G_{CT}^2}{(G_{\delta} + G_{CT})^2} \frac{dG_{\delta}}{d\delta}, \quad (1.43)$$

а з врахуванням (1.42) отримуємо:

$$\frac{dG_{\delta}}{d\delta} = -n\mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta^2}. \quad (1.44)$$

Формула (1.40) для одного контакту багатоконтактного реле з МКК має вигляд:

$$F_{e.k} = \frac{(Iw)^2}{2n^2} \frac{dG_M}{d\delta}, \quad (1.45)$$

або з врахуванням (1.43) і (1.44):

$$F_{e.k} = \frac{(Iw)^2}{2n} \frac{G_{CT}^2}{(G_{\delta} + G_{CT})^2} \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta^2}. \quad (1.46)$$

Протидійна сила деформації електрода, закріпленого одним кінцем,

$$F_{np} = C(\delta_0 - \delta) K_c, \quad (1.47)$$

де $C = 3EjL^3 = 2Ebh^3(2l - l_\delta)^3$ - жорсткість однорідного електрода з рівномірним перетином ($b \times h = \text{const}$) вздовж довжини l ; l_δ - довжина перекриття електродів; $L = l - l_\delta/2$ - плече прикладання сили; E - модуль пружності матеріалу електродів, Па; $j = bh^3/12$ - момент інерції перерізу електродів; $(\delta_0 - \delta)$ - переміщення кінця електрода; K_c - коефіцієнт симетрії, що дорівнює 0,5 для симетричних МКК (див. рис. 1.24, а) і 1 для несиметричних МКК (див. рис. 1.24, б).

З огляду на те, що спрацьовування контактів відбувається при $F_{e.k} = F_{np}$, прирівнюючи (1.46) і (1.47), знайдемо:

$$(Iw)_{серед} = \delta_{кр} \frac{G_{кр} + G_{СТ}}{G_{СТ}} \sqrt{\frac{2nC(\delta_0 - \delta)K_c}{\mu_0 S \delta}}, \quad (1.48)$$

де $\delta_{кр}$ - критична довжина робочого зазору, м; $G_{кр}$ - його магнітна провідність, Гн.

З (рис. 1.48) випливає, що для зменшення МРС спрацьовування в реле з МКК необхідно збільшувати магнітну провідність зовнішнього магнітопроводу (G_{cm}).

Реле з МКК мають такі переваги: високу надійність і тривалий термін служби (до 10^9 спрацьовувань), високу швидкодію (час спрацьовування - $0,5 \pm 1$ мс, час відпускання - $0,3 \pm 0,5$ мс); добру вібростійкість (до 35 г при частоті до 200 Гц). Автоматизація виробництва МКК забезпечує їх низьку вартість.

До недоліків МКК можна віднести: невисоку комутаційну спроможність і чутливість (МРС спрацьовування порядку 20 - 80 А); незначну кількість контактів в одному МКК; наявність брязкоту контактів при спрацьовуванні (призводить до нечіткості моменту замикання

ланцюга); наводку переход у слабкострумових ланцюгах, що комутуються.

Фериди. У ряді пристроїв автоматики, зв'язку і вимірювання необхідні комутаційні елементи з пам'яттю. У зв'язку з цим були розроблені МКК з елементами магнітної пам'яті (ЕМП) – *фериди*. Якщо МКК обладнаний зовнішнім осердям із ППГ або його електроди містять ділянки, виконані з матеріалу з ППГ, то при подачі на його обмотку

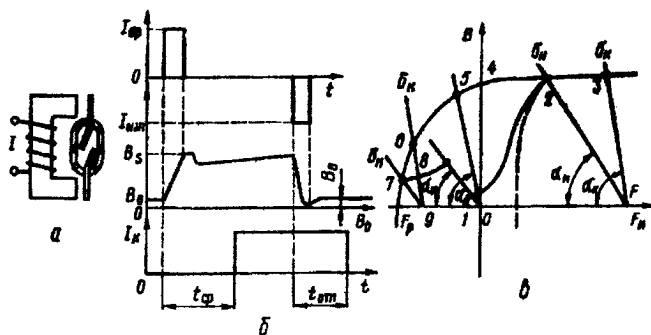


Рис. 1.26. Фериди

імпульсу струму (рис. 1.26, а) МКК спрацює і під дією потоку залишкового магнетизму залишиться в замкненому стані до подачі імпульсу зворотної полярності (рис. 1.26, б). ЕМП можуть розташовуватись поза колбочкою МКК. Такі фериди відносяться до групи з зовнішньою пам'яттю. Якщо окремі ділянки електродів МКК виконати з матеріалів із ППГ і високим значенням H_c , то вони будуть відігравати роль ЕМП. Такі фериди відносяться до групи з внутрішньою пам'яттю і називаються *герконами* (герметизовані контакти, що запам'ятовують).

Використовуючи статичну петлю гістерезису $\Phi=f(I)$ ЕМП, побудовану з врахуванням магнітних опорів осердь, електродів МКК і немагнітних зазорів, можна показати роботу найпростішого ферида

(рис. 1.26, в). При цьому припустимо, що тривалість процесу повного перемагнічування ЕМП менша від часу переміщення контактів при вмиканні і вимиканні.

Процес повного намагнічування ЕМП протікає при початковому робочому зазорі $\delta_{p.n}$. Цьому зазору відповідають прямі, проведені під кутом α_n ($\text{tg}\alpha_n \equiv G_n$). При кінцевому зазорі прямі проходять під кутом $\alpha_{до}$ ($\text{tg}\alpha_k \equiv G_k$). При дії МРС керування F_n ЕМП намагнічується по окремій петлі гістерезису (ділянки 1-2-3 на рис. 1.26, в) і відбувається замикання контактів МКК. Після закінчення дії імпульсу F_n стан ферида визначається точкою 5.

Процес розмагнічування під дією F_p відбувається при замкнутих контактах і характеризується переходом із точки 5 у точку 6, а після розмикання контактів – у точку 7. При знятті поля F_p стан ЕМП визначається точкою 8. Ця точка визначає вихідний стан ЕМП при наступному спрацьовуванні ферида.

МРС спрацьовування $F_{спр}$ і відпускання $F_{відп}$ ферида можна визначити по сполучених силових і механічних характеристиках. Для визначення силової характеристики $F_{e.k} = f(\delta)$ при деякій МРС (F_n) обмотки треба з точки F_n (див. рис. 1.26, в) провести ряд прямих під кутами:

$$\alpha_i = \arctg G_{\delta_i} \frac{m_F}{m_\phi}, \quad (1.49)$$

де G_{δ_i} - магнітна провідність i -го робочого зазору; m_F , m_ϕ - масштаби по відповідних вісях. Точки перетину прямих із вихідною гілкою окремого циклу петлі гістерезису визначають значення потоку для кожного робочого зазору. Після цього за (1.37) знаходять електромагнітні сили $F_{e.k}$ МКК і будують силові характеристики $F_{e.k} = f(\delta)$. Потім за (1.47) будують сполучену з силовими механічну характеристику $F_{np} = f(\delta)$. Силова

характеристика, дотична до механічної, дозволяє визначити значення критичного зазору $\delta_{кр}$ (див. рис. 1.24, з). Після цього за (1.48) визначають МРС спрацьовування.

МРС відпускання контактів ферида знаходять виходячи із наступного. Відпускання контактів відбувається при рівності тягового $F_{е.к}$ і протидійного $F_{пр}$ зусиль, що діють на контактах МКК, при мінімальному значенні їх робочого зазору δ_x , тобто

$$F_{е.к} = 39,8 \cdot 10^4 \Phi_{відн}^2 / S_\delta = C (\delta_0 - \delta_x) K_c, \quad (1.50)$$

звідки потік відпускання:

$$\Phi_{відн} = \sqrt{\frac{S_\delta C (\delta_0 - \delta_x) K_c}{39,8 \cdot 10^4}}. \quad (1.51)$$

За значенням $\Phi_{відн}$ на ділянці розмагнічування петлі гистерезису (див. рис. 1.26, в) знаходять точку 6, через яку під кутом α_k проводять пряму 6 - 9. Точка 9 перетину прямої із віссю абсцис визначає значення МРС відпускання, тобто $F_p = F_{відн}$.

Найпростіший ферид (див. рис. 1.26, а), що управляється різнополярними імпульсами, потребує точно визначеного значення МРС відпускання. У випадку його перевищення ЕМП перемагнітиться в протилежному напрямку і контакти залишаться замкненими. Для запобігання цього фериди виконуються з *послідовною* або *рівнобіжною* системою ЕМП або застосовується *диференційне* керування. Для керування феридом із послідовною системою ЕМП (рис. 1.27, а,б) останній забезпечується двома обмотками w_1 і w_2 , по яких протікають відповідно робочий I_p і поляризувальний I_n струми. Умови спрацьовування такого ферида визначаються $I_{р.л} w_1 + I_{н.л} w_2 \geq F_{срацл}$ (див. рис. 1.27, б), а умова

відпускання – $-I_{p,p}w_1 + I_{II}w_2 \leq F_{\text{відт}}$ (див. рис. 1.27, а). Зазвичай $w_1 = w_2 = I_{p,II} = I_{p,p} = I_p$; тоді умови спрацьовування і відпускання приймуть вигляд: $2I_p w \geq F_{\text{спрац}}$ и $0 \leq F_{\text{відт}}$, тобто такий ферид може працювати на “напівструмах” імпульсів управління. Цей спосіб керування називається *адитивним* або *сумувальним*.

Принцип роботи ферида з рівнобіжною системою ЕМП зрозумілий із рис. 1.27, в, г. Тут при роботі струм I_{II} не змінює свого напрямку, тому ця частина може бути замінена постійним магнітом.

Найбільше поширення отримали фериди з диференційним керуванням (рис. 1.27, д, е). Тут на кожній половині магнітопроводу ЕМП розташовані дві обмотки з різною кількістю витків: основна – із Kw витками ($K > 1$) і додаткова – із w витками. Обмотки Kw і w різних половин включені попарно-зустрічно і обтікаються струмом I_p і I_{II} . Для зменшення опору потоку при відпусканні ферида посередині встановлений магнітний шунт. Кожний із струмів створює МРС

$$F_p = I_p Kw - I_p w = I_p w(K-1); F_{II} = I_{II} Kw - I_{II} w = I_{II} w(K-1). \quad (1.52)$$

Сумарна МРС, що діє в ЕМП:

$$F_{\Sigma} = F_{II} \pm F_p = w(K-1)(I_{II} \pm I_p). \quad (1.53)$$

Якщо струми I_{II} і I_p рівні, то при цьому сумарна МРС:

$$F_{\Sigma} = w(K-1)(I_{II} \pm I_p) = \begin{cases} 2w(K-1)I_p & \text{при } I_p = I_{спр} \\ 0 & \text{при } I_p = -I_{відт} \end{cases} \quad (1.54)$$

Таким чином, спрацьовування ферида з диференційним управлінням відбувається під дією струму в робочій обмотці, що створює магнітний

потік, який збігається з потоком Φ_n у робочому зазорі (див. рис. 1.27, е). При зміні напрямку струму I_p , змінює напрямок і Φ_p . Останній, діючи назустріч потокові Φ_n , послаблює сумарний потік і контакти ферида розмикаються.

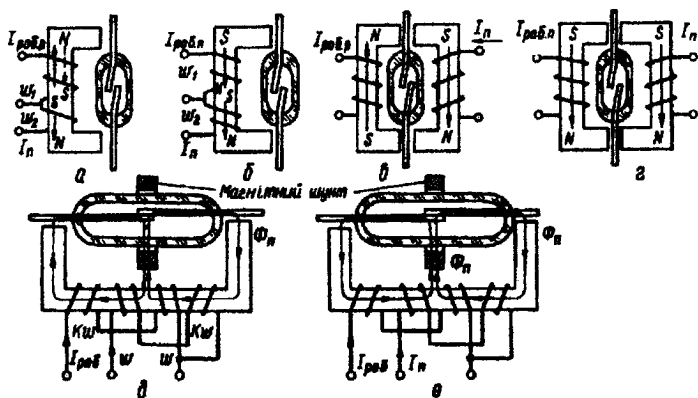


Рис. 1.27. Способи керування феридом

Диференційне управління не потребує стабілізації струмів I_p і I_n , якщо їх зміна відбувається в одному напрямку.

Застосування магнітокерованих контактів. На основі магнітокерованих контактів випускаються високонадійні проміжні електромагнітні реле з кількістю контактних груп до десяти. В таких реле всередині спільної котушки управління міститься декілька пар контактів (рис. 1.28). Як вже відзначалось, в порівнянні зі звичайними електромагнітними реле, герконові мають більшу швидкодію та більшу надійність. Однак їм властиві і деякі недоліки. Вони мають в 2-3 рази менші значення питомих струмових навантажень на контакти, більш критичні до перехідних процесів у комутованому колі. Наприклад, при 3-5-кратному збільшенні струму в порівнянні з номінальним можливе зварювання контактів.

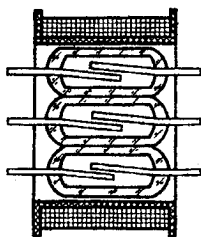


Рис. 1.28. Герконове реле

В колах з ємностями можливі значні стрибки струму, тому застосування герконових реле для комутації таких кіл не рекомендується.

Необхідно зазначити і характерний для герконових реле недолік — вібрація контактів при спрацьовуванні. Це явище називається “бряжчання” контактів. Після подачі сигналу керування контакти спочатку замикаються, але відразу ж розмикаються під дією сил пружності. Таких циклів замикання-розмикання може бути декілька. Після цього відбувається декілька коливань контактів без розмикання; при цьому відбувається зміна контактного опору. Час вібрації контактів може складати половину повного часу спрацьовування. Для боротьби з “бряжчанням” контактів застосовують спеціальні конструктивні і схемні рішення.

На основі магнітокерованих контактів можуть бути побудовані різноманітні шляхові і кінцеві вимикачі, реле різноманітних неелектричних величин. В якості прикладу на рис. 1.29 показані термоелектричні реле (а) з біметалевою пластиною і реле тиску (б) з пружним елементом у вигляді сильфона (гофрованої пружної склянки з фосфористої бронзи). При зміні температури або тиску постійний магніт наближується до геркону і його контакти спрацьовують.

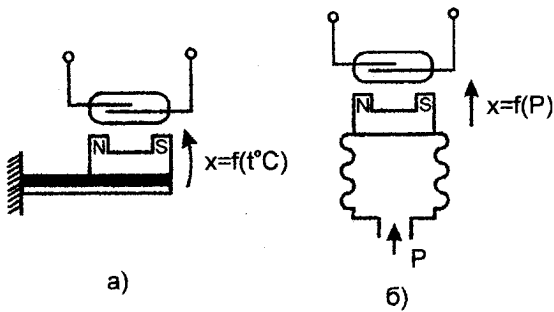


Рис. 1.29. Герконові реле температури і тиску

Магнітокервані контакти спеціальної конструкції починають застосовуватись і для перемикання в силових колах з потужністю до декількох сотень Ват. В таких приладах використовується більш масивне жорстке рухоме контактне осердя, закріплене на зворотній пружині. При цьому за рахунок зниження електричного опору контактної системи і поліпшення тепловіддачі вдається підвищити струм через контакти. Для цієї ж мети можливе застосування рідинно металевих контактів всередині балону, що герметизується, струмопровідні деталі яких частково або повністю змочені ртуттю.

2. Елементи та пристрої промислової автоматики

2.1. Логічні релейні елементи

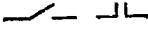

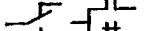




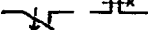


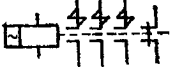

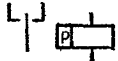
В схемах автоматичного та програмного управління різними виробничими процесами, в пристроях сигналізації та блокування в якості елементів дискретної дії з двома станами входу та виходу широко використовують електромагнітні реле. В залежності від посдання сигналів, які надходять від вхідних пристроїв (пускові кнопки, кінцеві та прохідні вимикачі), такі схеми дозволяють отримувати необхідну

послідовність вмикання виконувальних пристроїв (електроприводів, тягових електромагнітів, електропневматичних і електрогідравлічних клапанів та ін.). По суті, такі схеми втілюють логічні операції тієї чи іншої складності, які складаються з елементарних логічних операцій *I*, *АБО*, *НЕ*. При цьому проходження по обмотці реле струму, достатнього для спрацьовування, приймається за “1” на вході реле, відсутність струму в обмотці чи його зменшення до струму відпускання – за “0” на вході. Замкнений стан контактів приймається за “1”, розімкнений – за “0”, як на виході реле, так і на його вході, якщо обмотка вмикається контактами попереднього реле.

Логічні операції за допомогою реле можливо здійснити або шляхом комбінації вмикання декількох обмоток в багатообмоточних реле, або шляхом комбінації вмикання контактів реле.

Перший спосіб вимагає наявності у реле стількох обмоток, скільки вхідних величин має логічний зв'язок. В цьому випадку струми та кількість витків окремих обмоток повинні бути розраховані так, щоб намагнічувальна сила (НС) спрацьовування чи відпускання реле досягалася тільки при потрібній логічній комбінації вхідних сигналів (струмів) в окремих обмотках реле. Найбільш придатним для цієї мети є поляризоване реле з декількома обмотками.

Наприклад, для здійснення операції *I* на *n* входів реле потрібно мати *n* обмоток, кожна з яких повинна створювати намагнічувальну силу, яка дорівнює $1/n$ НС спрацьовування. В цьому випадку реле спрацьовує тільки при наявності всіх *n* сигналів на вході. При цьому, для відпускання реле при відсутності хоча б одного сигналу необхідно, щоб НС $n-1$ обмоток була менша НС відпускання. Звідси очевидний основний недолік цього способу, який полягає в необхідності особливої стабільності струмів в обмотках.

Умовне позначення	Найменування
	Контакт замикання (КЗ)
	Контакт розмикання (КР)
	Контакт перемикання (КП)
	Контакт ввімкнення
	Контакт розімкнення
	Вимикач (ключ)
	КЗ з витримкою часу при відпусканні
	КР з витримкою часу при спрацьовуванні і відпусканні
	Контакт теплового реле з підігрівом
	Обмотка реле, контактора і магнітного пускача
	Контактор змінного струму з трьома контактами замикання з гасінням дуги і одним блок-контактом розмикання
	Обмотка реле з затриманням при відпусканні
	Трипозиційне поляризоване реле з однією обмоткою

Найбільш зручний та розповсюджений другий спосіб – виконання логічних операцій на однообмоточних реле шляхом різних вмикань контактів.

Розглянемо різні схемні рішення з реле, на яких здійснюються деякі логічні операції і які використовують в пристроях автоматичного управління. Для креслення схем використовують умовні позначення, частина яких приведена в таблиці 2.1. Часто позначення обмоток та контактів одного і того ж самого реле віднесені на кресленні далеко один від одного. В таких випадках зручне таке цифрове маркування: обмотку реле позначають буквою P , а контакти – K з двома числами, перше з яких означає номер реле, а друге, відділене дефісом, – номер обмотки чи контакту. Наприклад, $K12-4$ – четверті контакти дванадцятого реле, $P5-2$ – друга обмотка п'ятого реле і т.п. Буквами $KВ$ позначають кінцевий, а $PВ$ – прохідний вимикачі.

Схему 1 на n входів виконують шляхом послідовного вмикання контактів замикання n реле. На рис. 2.1, а приведена така схема на три входи. Напруга на виході схеми з'являється тільки при розмиканні всіх контактів A, B, C , тобто при поданні сигналів (струмів) в обмотки всіх трьох реле.

$$P = A * B * C.$$

На контактах розмикання цих реле, які під'єднані послідовно (рис. 2.1,б), здійснюється операція $АБО$ з запереченням:

$$P = \overline{A + B + C}.$$

Логічну операцію $АБО$ на n входів виконують паралельним вмиканням контактів замикання n реле. На рис. 2.1, в приведено схему на три входи A, B, C . Напруга на виході з'явиться при замиканні будь-якого з контактів, тобто

$$P = A+B+C.$$

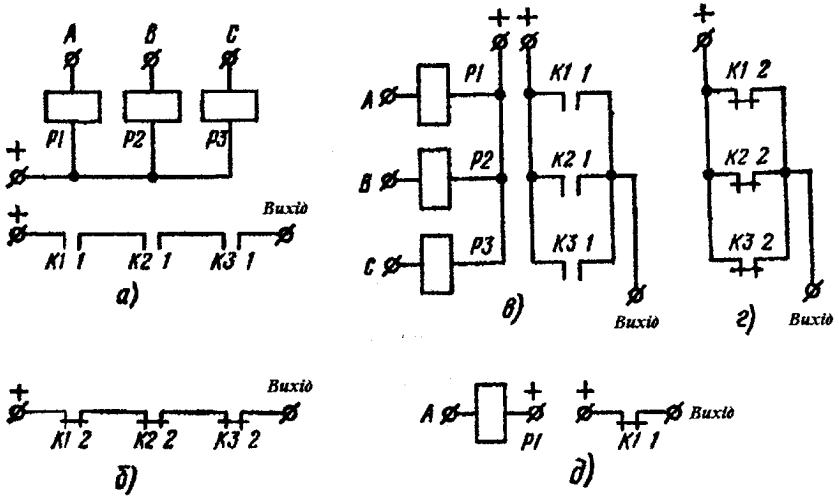


Рис. 2.1. Логічні релейні елементи

На контактах розмикання цих реле може бути здійснена операція / з запереченням, якщо вмикати ці контакти паралельно (рис. 2.1, в):

$$P = \overline{A} + \overline{B} + \overline{C} = \overline{ABC}.$$

Операцію *НЕ* виконують за допомогою контакту розмикання реле, який увімкнено послідовно з виходу (рис. 2.1, г):

$$P = \overline{A}.$$

При складанні схем простіших логічних операцій методом, який ми розглянули, мінімальне число реле дорівнює числу вхідних величин та, як правило, не залежить від кількості операцій, що виконуються, оскільки

майже завжди вдається підібрати реле, що має достатньо велику кількість контактів замикання та розмикання.

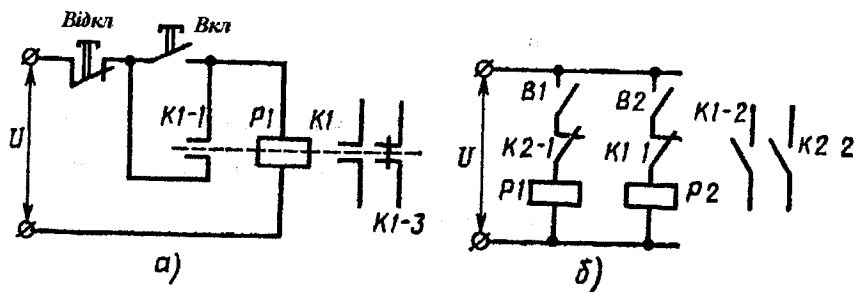


Рис. 2.2. Елементи релейних схем

Логічна схема, яка здійснює операцію *ПАМ'ЯТЬ*, являє собою реле з самоблокуванням. Її широко використовують для кнопкового управління будь-яким пристроєм (рис. 2.2, а). При натисканні кнопки *Вкл.* замикається коло обмотки реле $P1$, і воно спрацьовує, замикаючи блок-контакт $K1-1$. Після відпускання кнопки *Вкл.*, коло обмотки залишається замкненим через $K1-1$ до тих пір, доки воно не буде перерване короткочасним натисканням на кнопку *Відкл.* При цьому реле приходиться в нормальний стан.

Якщо за вхідну величину A прийняти стан кнопки *Вкл.*, а за величину B – кнопки *Відкл.*, за вихідну величину P схеми прийняти стан контактів замикання $K1-2$ цього реле, то поведінку схеми можливо описати виразом:

$$P = (A + C) * \overline{B},$$

де за C прийнято стан блок-контакту $K1-1$.

Взаємоблокування (рис. 2.2, б) використовують для попередження спрацьовування одного реле, якщо в цей момент часу вже спрацьовало

друге реле. Одночасне спрацьовування двох реле може призвести до виходу системи з ладу (наприклад, одночасна передача на двигун напруг лівого та правого обертання). Для здійснення взаємоблокування контакти розмикання одного реле, наприклад $K1-1$, вмикають в коло обмотки другого реле.

При включенні $B1$ спрацьовує реле $P1$ і контактами $K1-1$ розмикає коло реле $P2$, тому при включеному $B1$ замикання вимикача $B2$ не може призвести до спрацьовування реле $P2$. Аналогічно діють контакти $K2-1$ в колі обмотки реле $P1$.

2.2. Контактори

Найбільш розповсюдженим споживачем електричної енергії є електродвигун. Приблизно $2/3$ всієї електроенергії, що виробляється в країні, споживається електродвигунами. Основним комутаційним апаратом, що здійснює підключення електродвигуна до мережі живлення, є *контактор*. Електромагнітний контактор являє собою вимикач, що приводиться в дію за допомогою електромагніту. По суті, це потужне електромагнітне реле, контактний вузол якого здатний замикати і розмикати силові кола з струмами в десятки і сотні ампер при напругах в сотні вольт. При таких електричних навантаженнях необхідно прийняти спеціальні заходи для гасіння дуги. Тому у порівнянні із звичайними електромагнітними реле електромагнітні контактори мають дугогасні прилади і більш потужні електромагнітні і контактні вузли. Окрім силових (потужних) контактів в колах управління використовуються блокувальні контакти. Розрізняють контактори постійного і змінного струму. Для автоматичного пуску, зупинки і реверсу електродвигунів застосовують *магнітні пускачі*. Вони являють собою комплектні електричні апарати, що включають в себе електромагнітні контактори, кнопки управління, реле

захисту і блокування.

Контактори і магнітні пускачі використовуються і для ввімкнення інших потужних споживачів електроенергії: освітлювальних і нагрівальних пристроїв, перетворювального і технологічного електричного обладнання.

До цієї ж групи електричних силових апаратів слід віднести *автоматичні вимикачі*, що також призначені для під'єднання до мережі живлення потужних електроспоживачів. Замикання їх контактів проводиться не за допомогою електромагніту, а вручну. Автоматично вони виконують лише відключення навантаження, захищаючи його від перевантаження за струмом. Якщо контактори і магнітні пускачі здатні працювати при частих ввімкненнях і вимкненнях, то автоматичні вимикачі зазвичай застосовують при ввімкненні на тривалий час. В типові схеми електроприводу, зазвичай, входять автоматичний вимикач (який надає живлення і силовим, і керувальним колам) і магнітний пускач (що здійснює безпосередню комутацію для пуску, зупинки і реверсу електродвигуна).

Побудова і особливості контакторів. Принцип дії контакторів такий самий, як і у електромагнітних реле. Тому і будова їх багато в чому подібна. Головна відмінність полягає в тому, що контакти контакторів комутують більші струми. Тому вони виконуються більш масивними, вимагають більших зусиль, між ними при розриванні виникає дуга, яку необхідно загасити.

Основними вузлами контактора є електромагнітний механізм, головний (силовий) контактний вузол, дугогасна система, блокувальний контактний вузол.

Електромагнітний механізм здійснює замикання і розмикання контактів. При поданні напруги на втягувальну котушку електромагніту,

якір притягується до осердя, а механічно пов'язані з ним рухомі контакти замикають силове коло і виконують необхідні перемикання в колі управління.

Магнітні системи контакторів, в залежності від характеру руху якоря і конструкції, поділяються на поворотні і прямохідні. Магнітопровід контактора поворотного типу влаштований аналогічно клапанному реле. Для того, щоб усунути залипання якоря використовують немагнітні прокладки. Для замикання силових контактів потрібні значно більші зусилля, ніж ті, що розвиваються в реле. Тому електромагнітний механізм контактора виконується більш потужним та масивним. При спрацьовуванні контактора відбувається досить значний удар якоря по осердю. Частково цей удар приймає на себе немагнітна прокладка; крім того, магнітну систему амортизують пружиною, що також зменшує вібрацію контактів.

Магнітопровід контактора прямохідного типу має, зазвичай, Ш-подібну форму. В цьому випадку для усунення залипання якоря роблять зазор між середніми стержнями осердя і якоря.

Втягувальна котушка зазвичай забезпечує вмикання і утримання якоря в притягнутому стані. Але інколи використовують дві котушки: потужну, що вмикає і менш потужну утримувальну. В цьому випадку контактор у ввімкненому стані споживає меншу кількість електроенергії, оскільки котушка вмикання знаходиться під струмом тільки короткий час. Розімкнення контактів відбувається за рахунок пружини розімкнення при зніманні напруги з котушки контактора. Втягувальна котушка повинна забезпечувати надійне спрацьовування контактора при зниженні напруги до $0,85 U_{ном}$. При нагріванні котушка повинна витримувати підвищення напруги до $1,05 U_{ном}$.

В контакторах з поворотним якорем найбільше розповсюдження отримали лінійні контакти, які перекочуються. В прямохідних контакторах

застосовуються мостові контактні системи. Контактний міст має невелику масу і виконується таким, що сам встановлюється, і це знижує вібрацію контактів. Для запобігання вібрації контактна пружина створює попереднє натискання, рівне приблизно половині кінцевої сили натискання.

У контакторів для тривалого режиму роботи на поверхню мідних контактів зазвичай напаюється металокерамічна або срібна пластинка. Контакти інколи можуть виконуватися з міді, якщо плівка окису, що утворюється на робочій поверхні контактів, періодично знімається самоочисткою.

Дугогасна система контакторів постійного струму, зазвичай, виконується у вигляді камери з повздовжніми щілинами, куди дуга витісняється за допомогою магнітної сили. Дугогасна система контакторів змінного струму, зазвичай, має вигляд камери зі сталевими дугогасними пластинами і подвійним розриванням дуги в кожній фазі.

Блокувальні або допоміжні контакти застосовуються для перемикачів в колах управління і сигналізації, тому вони мають таке саме конструктивне виконання, як і контакти реле.

Як правило, вид струму в колі управління, що живить котушку контактора, збігається з видом струму головного кола. Тому контактори постійного струму, які призначені для вмикання двигунів постійного струму, мають електромагнітний механізм, що живиться постійним струмом. Відповідно контактори змінного струму, які призначені для вмикання двигунів (або іншого навантаження) змінного струму, мають електромагнітний механізм, що живиться змінним струмом. Бувають і винятки. Відомі, наприклад, випадки, коли котушки контакторів змінного струму отримують живлення від кола постійного струму.

Будова контактора постійного струму показана на рис. 2.1. Електромагнітний механізм поворотного типу складається з осердя 1 з котушкою 2, якоря 3 і повертальної пружини 4. Осердя 1 має полюсний

наконечник, необхідний для збільшення магнітної провідності робочого зазору електромагніту.

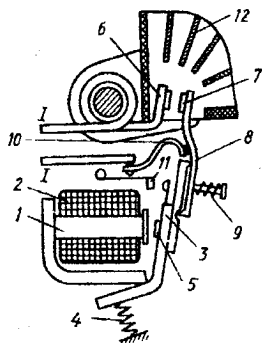


Рис. 2.1. Контактор постійного струму

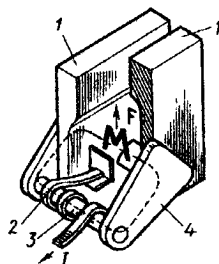


Рис. 2.2. Дугогасна камера з електромагнітним видуванням

Немагнітна прокладка 5 служить для передбачення залипання якоря. Силовий контактний вузол складається з нерухомого 6 і рухомого 7 контактів. Контакт 7 шарнірно закріплений на важелі 8, зв'язаному з якорем 3 і притисненим до нього пружиною 9. Підведення струму до рухомого контакту 7 виконане з гнучкої мідної стрічки 10. Замикання головних контактів 6 і 7 відбувається з прослизанням і перекочуванням, що забезпечує очистку контактних поверхонь від окисів і нагару. При спрацюванні електромагнітного механізму окрім головних контактів перемикаються допоміжні контакти блокувального контактного вузла II. При розімкненні головних контактів 6 і 7 між ними виникає електрична дуга, струм якої підтримується за рахунок ЕРС самоіндукції в обмотках електродвигуна, який вимикається. Для інтенсивного гасіння електричної дуги служить дугогасна камера 12. Вона має дугогасну решітку у вигляді тонких металевих пластин, що розривають дугу на короткі ділянки. Пластини інтенсивно відводять тепло від дуги і гасять його. Однак при великій частоті вмикання контактора пластини не встигають охолонути і ефективність дугогасіння падає.

Для витіснення дуги в сторону дугогасної решітки можна використати електромагнітну силу, так зване магнітне видування. На рис. 2.2 показана дугогасна камера з вузькою щілиною і магнітним видуванням. Щілинна камера утворена двома стінками 1, виконаними із ізоляційного матеріалу. Система магнітного видування складається з котушки 2, ввімкненої послідовно з головними контактами і розміщеної на осерді 3. Для підведення магнітного поля в зону утворення дуги використовуються феромагнітні щоки 4. В результаті взаємодії електричного струму дуги з магнітним полем з'являється сила F , що розтягує дугу і витісняє її в щілинну камеру між стінками 1. За рахунок посиленого відводу теплоти стінками камери дуга швидко гасне.

При послідовному вмиканні головних контактів і котушки магнітного видування напрямок сили F залишається постійним при будь-якому напрямку струму в силовому колі, оскільки сила F пропорційна квадрату струму (адже магнітне поле створюється цим самим струмом). Тому магнітне видування можна використати і в контакторах змінного струму.

Контактори змінного струму відрізняються від контакторів постійного струму передусім тим, що вони, як правило, виконуються триполюсними. Основне призначення контакторів змінного струму – вмикання трифазних асинхронних електродвигунів. Тому вони мають три головних (силових) контактних вузли. Всі три головних контактних вузли працюють від загального електромагнітного приводного механізму клапанного типу, що повертає вал із встановленими на ньому рухомими контактами. З цим самим приводом зв'язані допоміжні контакти. Головні контактні вузли мають систему дугогасіння з магнітним видуванням і дугогасною щілинною камерою або дугогасною решіткою. В контакторах швидше всього зношуються головні контакти, оскільки вони піддаються інтенсивній ерозії (інакше кажучи, контакти вигорають). Для збільшення

загального строку служби контакторів передбачається можливість зміни контактів.

Найбільш складним і важким етапом роботи контактів є процес їх розмикання. Саме в цей момент контакти оплавлюються, між ними виникає дуга. Для полегшення роботи головних контактів при розімкненні випускаються контактори змінного струму з напівпровідниковим блоком. В цих контакторах паралельно головним контактам замикають вмикають по два тиристори (напівпровідникових діода, що керуються). У ввімкненому положенні струм проходить через головні контакти, оскільки тиристори знаходяться в закритому стані і струм не проводять. При розімкненні контактів схема управління на короткий час відкриває тиристори, які шунтують коло головних контактів і розвантажують їх від струму, перешкоджаючи виникненню електричної дуги. Такі комбіновані тиристорні контактори випускаються на струми в сотні ампер. Оскільки тиристори працюють в короткочасному режимі, вони не перегріваються і не потребують радіаторів охолодження.

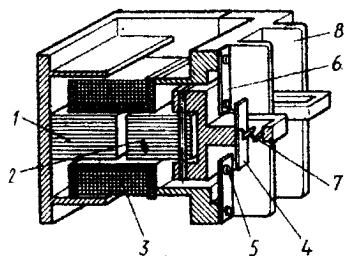


Рис. 2.3. Контактір змінного струму

Комутаційна зносостійкість комбінованих контакторів складає декілька мільйонів циклів, в той час як головні контакти звичайних контакторів постійного і змінного струму витримують зазвичай 150 – 200 тис. включень.

Для управління електродвигунами змінного струму невеликої потужності застосовують прямохідні контактори з мостовими контактними

вузлами. Завдяки дворазовому розриву кола і полегшеним умовам гасіння дуги змінного струму в цих контакторах не вимагаються спеціальні дугогасні камери з магнітним видуванням, що істотно зменшує їх габаритні розміри.

Електромагнітний привід контактора змінного струму малої потужності (рис. 2.3) має Ш-подібне осердя і ярів 2, які зібрані з пластин електротехнічної сталі. Частина полюсів осердя охоплена короткозамкненим витком, який запобігає вібрації якоря, що викликана зниженням сили електромагнітного тяжіння до нуля при проходженні змінного синусоїдального струму через нуль. Котушка 3 контактора охоплює осердя і ярів і створює намагнічувальну силу в магнітній системі контактора. На ярорі 2 закріплені рухомі контакти 4 мостового типу, що підвищує надійність відключення за рахунок дворазового розмикання. В пластмасовому корпусі встановлені нерухомі контакти 5 і 6. Пружина 7 повертає контакти 4 у вихідне положення. В трифазному контакторі три контактні пари, які відокремлені одна від одної пластмасовими перемичками 8. Головні контакти мають металокерамічні накладки і захищені кришкою. Допоміжні контакти на рис. 2.3 не показані.

2.3. Магнітні пускачі

Магнітний пускач – це комплектний пристрій, призначений головним чином для пуску трифазних асинхронних двигунів. Основною складовою частиною магнітного пускача є триполюсний контактор змінного струму. Крім того, контактор має кнопки управління і термальні реле.

Схема включення трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором показана на рис. 2.4. Для пуску електродвигуна *M* натискається кнопка *S_{B1}* ("Пуск"). Через котушку

контактора *КМ* протікає струм, спрацьовує електромагніт контактора, і замикаються всі його контакти, які на схемі позначені тими ж літерами *КМ*. Силкові контакти *КМ* підключають на трифазну напругу обмотки електродвигуна *М*.

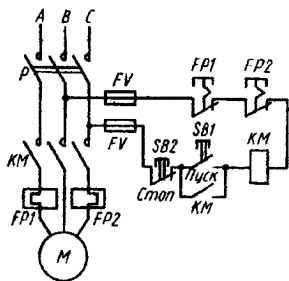


Рис. 2.4. Схеми ввімкнення трифазного асинхронного електродвигуна з магнітним пускачем

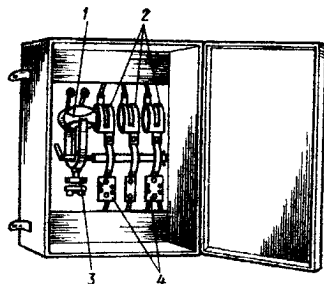


Рис. 2.5. Конструкція нереверсивного магнітного пускача

Паралельно до кнопки *SB1* підключені блокувальні контакти *КМ*. Оскільки вони замкнулись, то після відпускання кнопки *SB1* котушка контактора отримує живлення по цих контактах. Отже, для вмикання електродвигуна непотрібно весь час тримати кнопку натиснутою, достатньо її один раз натиснути і відпустити. Для зупинки електродвигуна служить кнопка *SB2* ("Стоп"), при натисканні якої розривається коло живлення контактора *КМ*. Для захисту електродвигуна від перегріву використовуються термальні реле *FP1* і *FP2*, чутливі елементи яких включаються в дві фази електродвигуна, а контакти розмикання, позначені тими ж літерами, ввімкнені в коло живлення котушки контактора *КМ*. Для захисту самої схеми управління використовуються плавкі запобіжники *FV*. На схемі також показаний перемикач *P*, що зазвичай замкнений. Його розмикають лише в тому випадку, коли збираються проводити ремонтні роботи. Подібна схема є типовою, вона застосовується в усіх випадках,

коли не вимагається зміна напрямку обертання (реверс) електродвигуна і інтенсивне (примусове) гальмування.

На рис. 2.5 показана конструкція нереверсивного магнітного пускача, який змонтований в ящику з кришкою, що відкривається. Електромагнітний механізм 1 контактора при спрацьовуванні переміщує три рухомих контакти 2, розміщених в дугогасних камерах. Водночас перемикаються блокувальні контакти 3. Послідовно з двома головними контактними вузлами ввімкнені термальні реле 4.

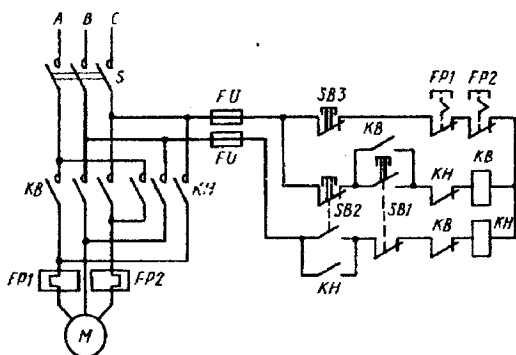


Рис. 2.6. Схема включення трифазного асинхронного електродвигуна з реверсивним магнітним пускачем

Кнопки "Пуск" і "Стоп" зазвичай знаходяться поза ящиком пускача, вони розміщені на пульті управління під рукою у робітника. Кнопка "Стоп" має червоний колір. Реверсивна схема включення трифазного асинхронного двигуна показана на рис. 2.6. Для того, щоб реверсувати (змінити напрямок обертання) трифазний асинхронний двигун, необхідно змінити порядок чергування фаз на обмотці статора. Наприклад, якщо для прямого обертання фази підключались в послідовності АВС, то для зворотного обертання необхідна послідовність АСВ. Тому в склад реверсивного магнітного пускача входять два контактора: KB для обертання вперед і КН для обертання назад. Крім того, реверсивний

магнітний пускач має три кнопки управління і термальні реле. В багатьох випадках в комплект магнітного пускача входять пакетний перемикач і плавкі запобіжники. Схема, яка приведена на рис. 2.6, працює таким чином.

Для ввімкнення електродвигуна M в прямому напрямку необхідно натиснути кнопку $SB1$ ("Вперед"). При цьому спрацьовує контактор KB і своїми силовими контактами підключає до трифазної мережі обмотки електродвигуна. Водночас блокувальні контакти KB розривають коло живлення котушки контактора KH , завдяки чому виключається можливість одночасного ввімкнення обох контакторів. Для ввімкнення електродвигуна в зворотному напрямку необхідно натиснути кнопку $SB2$ ("Назад"). В цьому випадку спрацьовує контактор KH і своїми силовими контактами підключає до трифазної мережі обмотки електродвигуна. Послідовність з'єднання фаз тепер інша, ніж при спрацьовуванні контактора KB : дві фази з трьох помінялися місцями. При спрацьовуванні контактора KH його блокувальні контакти розривають коло живлення котушки контактора KB . Легко побачити, що при одночасному вмиканні контакторів KB і KH відбулося б коротке замикання двох лінійних проводів трифазної мережі один до одного. Для того, щоб виключити таку аварійну ситуацію, потрібні блокувальні контакти, що розмикають контактори KB і KH . Отже, якщо послідовно натиснути обидві кнопки ($SB1$ і $SB2$), то ввімкнеться тільки той контактор, кнопка якого була натиснута раніше.

Для реверсу електродвигуна потрібно попередньо натиснути кнопку $SB3$ ("Стоп"). В цьому випадку блокувальні контакти готують коло управління для нового вмикання. Для надійної роботи необхідно, щоб силові контакти контактора роззімкнулися раніше, ніж відбудеться замикання блокувальних контактів в колі іншого контактора. Це досягається за допомогою відповідного регулювання положення блокувальних контактів по ходу якоря електромагнітного механізму

контактора. Для блокування кнопок *SB1* і *SB2* використовуються блокувальні контакти відповідного контактора, що замикаються, які підключені паралельно кнопці.

Необхідно виключити одночасне спрацьовування обох контакторів, для чого використовують подвійне або навіть потрійне блокування. Для цієї мети в схемі (рис. 2.6) застосовують двоколові кнопки *SB1* і *SB2*. Наприклад, кнопка *SB1* при натисканні замикає свої контакти в колі контактора *KB* і розриває свої контакти в колі контактора *KH*. Аналогічно працює двоколова кнопка *SB2*. Крім того, реверсивні магнітні пускачі можуть мати механічне блокування з перекидним важелем, що перешкоджає одночасному спрацьовуванню електромагнітів контакторів. Контакти термальних реле *FP1* і *FP2*, що ввімкнені в дві фази обмотки електродвигуна, вимикають коло живлення котушок обох контакторів при тривалому протіканні великого струму, щоб не допустити перегріву обмоток. Для захисту схеми управління служать плавкі запобіжники *FV*.

Магнітні пускачі і контактори вибирають за номінальними струмами електродвигуна з урахуванням умов експлуатації. В промисловості застосовуються магнітні пускачі серії ПМЕ і ПМЛ з прямохідними контакторами і серії ПАЕ з рухомою системою поворотного типу.

2.4. Автоматичні вимикачі

Автоматичний вимикач призначений для вмикання і вимикання електричних кіл і електрообладнання, а також для захисту від великих струмів, що виникають при короткому замиканні і перевантаженні. На відміну від магнітного пускача, автоматичний вимикач не може використовуватись для автоматичних систем, що використовують електричні керувальні сигнали. Він також не забезпечує реверса електродвигуна. Автоматичний вимикач часто використовують для

тривалого ввімкнення нереверсивних електродвигунів. Він також може використовуватися замість перемикача в схемах з магнітним пускачем (див. рис. 2.4 і 2.6).

Будова автоматичного повітряного вимикача (автомата) показана на рис. 2.7.

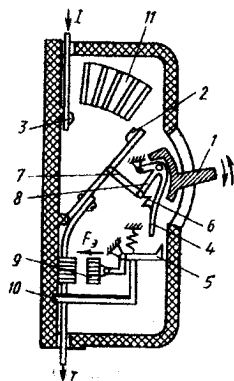


Рис. 2.7. Автоматичний вимикач

За допомогою тримача 1 відбувається вмикання і вимикання автомата. В стані, що показаний на рисунку, автомат вимкнений і рухомий контакт 2 не замкнений з нерухомим контактом 3. Для ввімкнення автомата слід звести пружину 6, при цьому тримач 1 переміщується вниз і повертає деталь 4, що своїм нижнім кінцем входить в зчеплення з зубом утримувального важеля 5. Тепер автомат готовий до ввімкнення. Для його ввімкнення тримач 1 переміщують вгору. Пружина 6 займе таке положення, що шарнірно з'єднані важелі 7 і 8 переміщуються вгору по відношенню до того положення, коли вони знаходяться на одній прямій. Автомат ввімкнеться: коло струму створюється через контакти 2 і 3, роз'єднувачі 9 і 10.

Автоматичне вимкнення автомата відбувається при спрацьовуванні роз'єднувачів. При тривалих струмових перевантаженнях спрацьовує термальний біметалевий роз'єднувач 10, вільний кінець якого

переміщується вниз, повертаючи важіль 5 за годинниковою стрілкою. Зубець важеля роз'єднується з деталлю 4, що повертається, а важелі 7 і 8 минають мертве положення. Зусилля пружини 6 направлене вниз, під його дією розмикаються контакти 2 і 3. Вимкнення при максимально допустимому струмі відбувається під дією електромагнітної сили F_e , що виводить зубець важеля 5 до з'єднання з деталлю 4. Якщо відбулося автоматичне вимкнення навантаження, то тримач 1 залишається в верхньому положенні.

Ручне вимкнення автомату відбувається при переміщенні тримача 1 вниз. Електрична дуга, що виникає при роз'єднанні контактів 2 і 3 гаситься за допомогою дугогасної ґратки 11.

Автомати можуть мати роз'єднувачі мінімальної напруги, які вимикають автомат при напрузі в мережі нижче допустимого значення. Для дистанційного управління автоматичним вимикачем можуть використовуватися спеціальні їх конструкції, доповнені електромагнітним приводом тримача 1. Автоматичні вимикачі, що випускаються промисловістю, типів АК, АП, АЕ мають від 1 до 3 пар силових контактів. Вони призначені для кіл з напругою від 110 до 500 В при струмах в десятки ампер. Час автоматичного вимкнення складає 0,02-0,04 с.

2.5. Комутаційні елементи

Комутаційні елементи призначені для вмикання, вимикання і перемикавання електричних кіл. Під комутацією розуміють виконання цих трьох операцій. Розрізняють комутаційні елементи ручного й автоматичного управління. Комутаційні елементи ручного управління спрацьовують при безпосередньому механічному впливі на їх органи управління. Автоматичні комутаційні елементи спрацьовують під впливом електромагнітних сил на їх приводні органи. Основною частиною таких

елементів, зазвичай, є електромагніт, вхідним сигналом для якого служить електричний струм або напруга. Автоматичні комутаційні елементи використовуються в системах автоматики і при дистанційному управлінні різними механізмами і пристроями. Вони розглядаються в наступних главах даного розділу.

В цій главі розглянуті комутаційні елементи з механічним приводом. Використовуються вони, зазвичай, для місцевого управління і для подачі сигналів про досягнення будь-яких проміжних і кінцевих станів. За своїм призначенням комутаційні елементи поділяються на два види: для комутації силових кіл (обмоток електродвигуна, потужних електромагнітів, трансформаторів, нагрівачів та інших споживачів) і для комутації кіл управління (обмоток релейно-контактної апаратури, пристроїв контролю, регулювання і сигналізації). Такий розподіл обумовлений різними значеннями струмів і напруг в комутуваних колах, що, в свою чергу, впливає на конструктивне виконання і габаритні розміри. Вивчення комутаційних елементів для силових кіл не входить до нашого завдання. Відзначимо лише, що найбільше розповсюдження для такої мети отримали рубильники і перемикачі рублячого типу, що забезпечують швидке розмикання і мають спеціальні пристрої для гасіння електричної дуги.

Всі комутаційні елементи, що використовуються в колах управління, обов'язково мають такі вузли: нерухомі контакти, рухомі контакти і орган управління. Окрім цього, вони можуть мати елементи фіксації, монтажу і настроювання, дугогасіння і т.і. Необхідні комутаційні елементи обираються за допустимими значеннями струму і напруги. Але найбільш важливою для практики характеристикою комутаційних елементів є їх надійність, тобто збереження працездатності при великій кількості спрацьовувань.

Комутаційні елементи розрізняють за кількістю комутованих кіл (одноколові і багатокілові) і за кількістю фіксованих станів; до того ж існують комутаційні елементи з самоповерненням в початковий стан, тобто без фіксації перемкненого стану, що може бути необхідним для ряду схем управління.

До комутаційних елементів з механічним приводом відносять кнопки управління, мікроперемикачі, тумблери, клавішні, поворотні, важільні і кулачкові перемикачі, а також кінцеві і шляхові вимикачі.

Кнопки управління і тумблери. Кнопки управління – це апарати, рухомі контакти яких переміщуються і спрацьовують при натисканні на натискач кнопки. Комплект кнопок, змонтованих на загальній панелі, являє собою кнопку станцію. Кнопки управління, які використовуються в схемах автоматики, розрізняють за кількістю і типом контактів (від 1 до 4 замикання і розмикання), формою натискача (циліндричний, прямокутний і грибоподібний), способом захисту від впливу навколишнього середовища (відчинені, зачинені, герметичні, вибухобезпечні і т. і.).

Незалежно від конструкції і габаритних розмірів кнопок (рис. 2.8, а, б) всі вони мають нерухомі контакти 1 і рухомі контакти 6, які переміщуються за допомогою натискача 3. Зовнішнє коло під'єднується до кнопки за допомогою гвинтових затискачів 7. Корпус 2 кнопки фіксується на панелі управління гайками 4 і 5.

Електричні параметри найбільш розповсюджених кнопок наведені в табл. 2.2. Кнопки управління загальнопромислового використання серій КУ і КЕ мають різне виконання і форми натискачів.

Для комутації кіл електроніки випускаються спеціальні кнопки (наприклад, типу ВК14-21). Малогабаритні кнопки управління виконуються на основі мікрОВИМКАЧА типу МП, який використовується в якості виконавчого контактного елемента в тумблерах типу МТ1 і МТ11.

Довговічність і надійність кнопок управління оцінюють комутаційною зносостійкістю, яку оцінюють через гарантовану кількість циклів вмикань-вимикань під навантаженням. Цей параметр різний для різних кнопок і умов експлуатації. Наприклад, для кнопок типу ВК14-21 з мідними контактами він складає $0,25 \times 10^6$ циклів, з біметалевими контактами – $2,5 \times 10^6$ циклів, із срібними контактами – 4×10^6 циклів. Механічна зносостійкість завжди перевищує комутаційну. Останнім часом найбільше розповсюдження отримали кнопки управління з прямокутною формою натискача – їх називають клавішами.

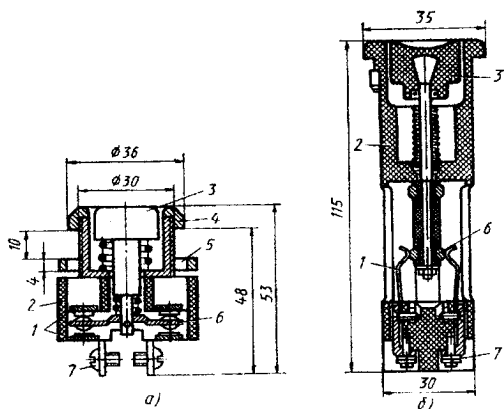


Рис. 2.8. Конструкції кнопок управління

На основі кнопок управління виготовляють кнопкові станції, які містять до 12 кнопок різноманітного виконання, що зібрані на загальній панелі або в одному корпусі. Такі комутаційні пристрої називають кнопковими або клавішними перемикачами (рис. 2.9).

Перемикач являє собою збірну панель з кнопок 1 (або клавіш), змонтованих на загальному каркасі 2 і забезпечених механізмом фіксації, який може бути незалежним для кожної кнопки (клавіші) або взаємно заблокованим. Кнопки можуть бути з поверненням в початковий стан або з чергуванням увімкненого і вимкненого фіксованих станів.

Електричні параметри кнопок управління різних типів

Найменування параметрів	Типи кнопок				
	KY O	KY1, KY2	KE	BK14-21	K20, K03
Номінальна напруга, В:					
- змінного струму	380	500	500	660	380
- постійного струму	220	440	220	440	220
Мінімальна напруга, В	24	24	24	12	-
Номінальний струм, А	2,5	5	6	10	5
Змінний струм, що розривається, А	2,5	12	9,6	16	6

Кожна кнопка або клавіша здійснює комутацію одного чи кількох кіл. Деякі типи перемикачів забезпечуються спеціальною кнопкою повернення (скидання) увімкнених кнопок в початковий стан. В цьому випадку можливий увімкнений стан декількох кнопок одночасно.

Особливістю цих перемикачів є двопозиційний стан (увімкнено, вимкнено) кожної кнопки або клавіші. Необхідний режим або програма управління задається шляхом набору увімкнених і вимкнених станів відповідних кнопок (клавіш). При цьому стан кнопок або клавіш (піднятий або опущений) грає роль покажчика. Для цієї мети використовують також

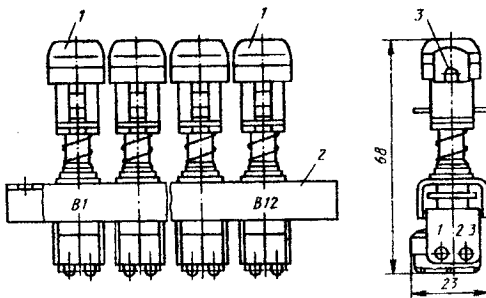


Рис. 2.9. Кнопковий перемикач

світлові сигналізатори 3 (лампи або світлодіоди), вмонтовані в корпус блоку перемикача (рис. 2.9). Закрите виконання і використання високоякісних матеріалів (біметалів, сплавів срібла і т.і.) для контактів забезпечують малі перехідні опори, що досить важливо при встановленні цих перемикачів в низьковольтних і слабкострумових колах автоматики і електроніки.

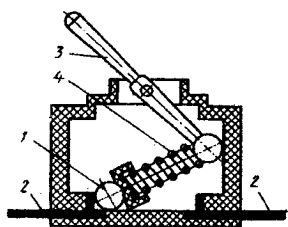


Рис. 2.10. Двопозиційний тумблер

Для більш потужних кіл автоматики використовують тумблери, які використовуються в якості вимикачів, а також дво- і трипозиційних перемикачів. На рис. 2.10 наведений пристрій двопозиційного тумблера. Мостовий контакт, виконаний у вигляді струмопровідного ролика 1, замикає одну з двох пар нерухомих контактів 2. Перемикання контактів тумблера здійснюється під впливом на важіль 3, а прискорення спрацьовування (миттєва дія) забезпечується пружиною 4. Номінальний струм тумблера 1 - 2А при напрузі 220 В, маса їх не перевищує 30 г.

Пакетні перемикачі. Для комутації декількох кіл при декількох фіксованих станах для вибору різноманітних режимів роботи використовуються пакетні перемикачі. Такий перемикач (рис. 2.11, а) складається з ряду шарів-пакетів 3 (показаний окремо на рис. 2.11, б), всередині яких знаходяться рухомий 5 і нерухомий 4 контакти. Рухомий контакт 5 закріплений на осі 2, що обертається за допомогою рукоятки 1 і має ряд фіксованих станів, в яких замикаються нерухомі контакти одного з

пакетів. Виводи 6 нерухомих контактів закріплені в корпусі перемикача. Недолік таких пакетних перемикачів – низька надійність ковзких контактів.

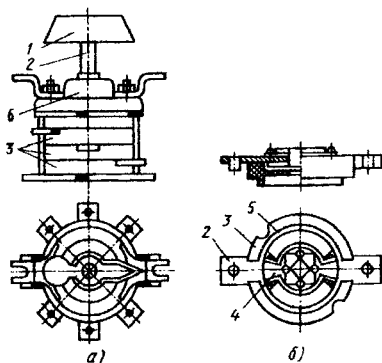


Рис. 2.11. Пакетний перемикач

Пакетні перемикачі кулачкового типу, в яких електричне коло замикається нерухомими контактами, більш надійні. Рухомими в них є діелектричні кулачки, які і замикають контакти в залежності від профілю кулачка і положення вісі.

Конструкції пакетних перемикачів, призначені для кіл управління, дозволяють отримати десятки і сотні варіантів різноманітних схем з'єднань при кількості комутованих кіл до 24 (12 пакетів) і кількості фіксованих станів до 8 (через 45, 60 або 90°).

Існують перемикачі і без фіксації стану, що перемикається - з самоповерненням в початковий стан. Особливість таких перемикачів - наявність пристрою, що замикає (на ключ), який виключає безконтрольне перемикання.

Найбільш розповсюдженими перемикачами кіл управління є апарати серій ПКУ2 і ПКУ3. Номінальний (тривало допустимий) струм перемикачів серії ПКУ2 – 6 А при напрузі 380 В змінного струму і 220 В постійного струму, а для перемикачів серії ПКУ3 – 10 А при 500 В

змінного струму. За технічними параметрами такі перемикачі придатні і для безпосереднього вмикання і вимикання достатньо потужних споживачів електроенергії, наприклад, електродвигунів потужністю в декілька кіловат.

Менші габарити мають перемикачі серій ПУ та ПЕ, які мають поворотні механізми приводу на два або три стани. Серед них є перемикачі, виконані з виймальним ключем-рукояткою. Такими перемикачами, як правило, блокують подачу напруги в схему управління, змінюють режими і способи управління. При цьому передбачена можливість запирання перемикача як у виключеному, так і в інших його станах. Номінальний струм перемикачів серій ПУ і ПЕ – 5 А при напрузі 220 В змінного струму і 1 А при 110 В постійного струму.

Системи автоматичного і програмного управління потребують досить складних перемикачів, для яких необхідні багатопозиційні і багатоколові перемикачі (при кількості кіл і станів інколи в декілька десятків). Конструктивно такі комутаційні елементи виконуються у вигляді двох, чотирьох (і більше) нерухомих секцій, змонтованих на платах, і рухомих контактів, що закріплені на загальному валі і фіксуються спеціальним пружинно-шариковим фіксатором в заданих позиціях.

На рис. 2.12 наведені найбільш розповсюджені повзункові перемикачі серії ПП однопанельного виконання на 35 колах. Перемикачі у відкритому виконанні призначені для монтажу всередині пристрою, за панеллю управління. Аналогічні щіткові перемикачі, але закритого виконання, мають від 1 до 4 секцій при кількості контактів в кожній секції від 4 до 24. Вони забезпечують надійну комутацію при струмі навантаження до 1 А кіл змінного (напругою 380 В) і постійного (напругою 220 В) струму.

В радіоелектронній апаратурі використовуються так звані галетні перемикачі, аналогічні пакетним перемикачам. Вони мають від 2 до 11

станів при кількості секцій (галет) від 1 до 4. На рис. 2.13 наведений перемикач серії ПГС на 10 станів.

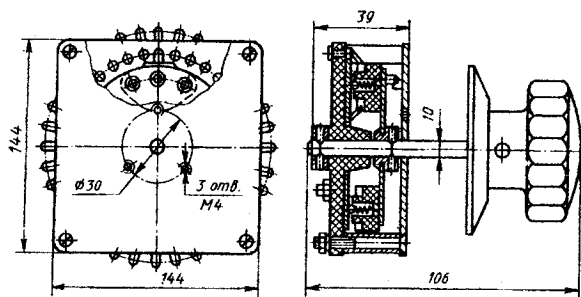


Рис. 2.12. Повзунковий перемикач

Останнім часом в США все ширше використовуються досягнення

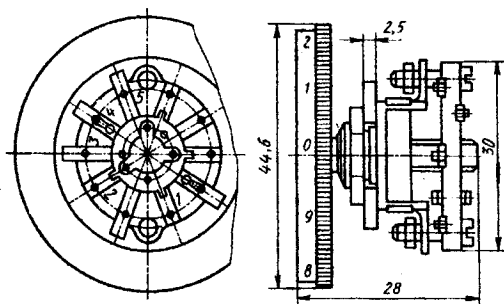


Рис. 2.13. Галетний перемикач

мікроелектроніки, наприклад, великі інтегральні схеми. Для комутації в колах, що вміщують подібні елементи, необхідні перемикачі, контакти яких забезпечували б надійне проходження дуже слабких струмів (мілі або мікроампери) при знижених значеннях напруг (до 5 В). Розглянуті в даному параграфі перемикачі, як правило, не мають таких властивостей, тому, що їх контакти мають значні (іноді в декілька Ом) перехідні опори. В цьому випадку краще використовувати клавішні перемикачі з біметалевими або срібними контактами.

Шляхові і кінцеві вимикачі. Шляхові і кінцеві вимикачі являють собою комутаційні елементи, які кінематично пов'язані з машиною і спрацьовують в залежності від переміщення її рухомої частини. Шляхові вимикачі спрацьовують у визначених проміжних точках на шляху переміщення, кінцеві вимикачі спрацьовують в крайніх точках: на початку і наприкінці шляху. Особливо широко шляхові і кінцеві вимикачі використовуються у схемах автоматизованого електропривода різних виробничих механізмів. За їх допомогою відбувається автоматичне управління приводом на окремих ділянках шляху і автоматичне вимкнення в крайніх положеннях механізму.

В залежності від пристрою, який здійснює замикання або розмикання контактів, шляхові і кінцеві вимикачі можна поділити на кнопкові (натискні), важільні, шпindelьні і ті, що обертаються. Перемикання контактів в цих вимикачах здійснюється таким чином: в кнопкових – натисканням робочого органу механізму на шток, з яким пов'язані контакти вимикача; у важільних – впливом робочого органу механізму на важіль, з яким пов'язані контакти; в шпindelьних – переміщенням гайки вздовж гвинта, який сполучений через передачі з валом механізму; в тих, що обертаються – кулачковими шайбами, що перемикаються, які сполучені з валом механізму.

В штокових вимикачах швидкість перемикання контактів визначається швидкістю переміщення виробничого механізму. При низькій швидкості взаємне переміщення рухомих і нерухомих контактів здійснюється повільно, що призводить до тривалого горіння дуги, яка виникає поміж контактами, що розмикаються, і їх швидкому руйнуванню через оплавлення і підсилення окислення. Для нормальної роботи такого вимикача швидкість переміщення механізму повинна бути не менша за 0,5 м/хв. А для забезпечення миттєвого перемикання контактів

використовуються спеціальні пружинні механізми, які звільняються за допомогою спускових механізмів (собачок). Пружини також використовуються для забезпечення необхідної сили контактного натиску.

На рис. 2.14 наведений пристрій найпростішого кінцевого вимикача. Закріплюється він таким чином, щоб упор на рухомій частині виробничого механізму знаходився навпроти штока 4. При натисканні упора на шток 4 останній тисне на пружину 3. При досягненні певної сили натискання пружина 3 перекидається ліворуч, розмикаючи контакт 2 і замикаючи контакт 1. При цьому струм піде по іншому колу управління. Зовнішні сполучення вимикача виконуються за допомогою пайки до виводів: 5 – нерухомий контакт (загальний); 6 – контакт, що розмикається 2; 7 – контакт, що замикається 1. Плоска пружина 3 виконана з трьох частин. Середня частина довша за крайні, тому вона завжди знаходиться у зігнутому стані і прагне притискати контакти в їх крайніх станах (1 або 2). Перемикач здатний працювати у колах з напругою до 380 В при струмі до 3 А. Переміщення штока складає 0,5 – 0,7 мм, необхідне зусилля для спрацьовування не більше 5 – 7 Н. Час спрацьовування 0,01 – 0,02 с при частоті увімкнень до двох разів за хвилину.

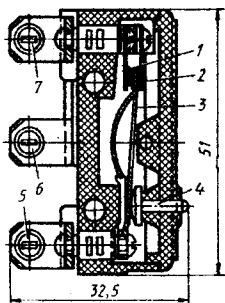


Рис. 2.14. Кінцевий мікровимикач з миттєвим перемиканням контактів

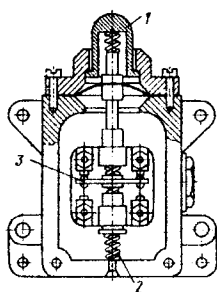


Рис. 2.15. Кінцевий вимикач типу ВК-111 з мостовими контактами

На рис. 2.15 наведений кінцевий вимикач типу ВК-111 з

мостиковими контактами. Перемикання контактів здійснюється при натисненні на шток 1, а повернення контактів в початковий стан здійснює пружина 2. Використання мостового контакту 3 зменшує імовірність виникнення дуги, оскільки коло розривається в двох точках. Такі вимикачі можуть працювати при струмі ввімкнення до 20 А і тривалому струмі 6 А. Зносостійкість вимикачів – 10^6 спрацьовувань. Допустима частота – 600 ввімкнень на годину.

На рис. 2.16 наведений вимикач з низьким часом спрацьовування (миттєвої дії). Контакти подібних вимикачів перемикаються з постійною швидкістю при визначеному стані виробничого механізму незалежно від швидкості руху. Тому вони використовуються при малих швидкостях (до 0,5 м/хв) або при необхідності підвищення точності спрацьовування (до 0,05 мм).

При натисканні упору на ролик 1, важіль 2 повертається і натискає на набір спіральних пружин 3, які миттєво діють на поводок 4. Поводок повертається, і ролик 10, стискаючи пружину 11, рухається вздовж планки 9, займаючи стан праворуч від осі обертання планки 9. При цьому собачка 6 відводиться, і контактний місток під дією пружини 11 і ролика 10 перекидається в інший стан, розмикаючи контакт 7 і замикаючи контакт 8. Після відходу упору від ролика 1, поводок 4 і контактний місток повертаються в початковий стан під дією пружини 5.

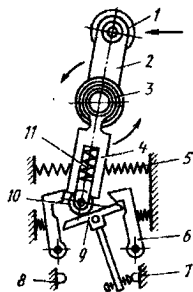


Рис. 2.16. Шляховий вимикач миттєвої дії

В деяких випадках використовуються багатопозиційні три- і п'ятиконтактні давачі, які послідовно керують декількома керованими колами. Конструкції таких давачів складніші, і вони значно дорожчі за двоконтактні.

Розглянуті шляхові і кінцеві вимикачі мають досить низьку надійність, пов'язану з підвищеною зносостійкістю контактної пари. Більш висока надійність забезпечується при використанні безконтактних давачів (наприклад, індуктивного або фотоелектричного типів), миттєвість спрацьовування яких забезпечується за допомогою електронних схем.

2.6. Електричні контакти

В комутаційних і електромеханічних елементах, які призначені для перемикання електричних кіл при ручному і автоматичному управлінні, базовим є *контактний вузол*. Саме надійність контактного вузла визначає працездатність будь-якої комутаційної апаратури.

Контактний вузол складається з рухомого і нерухомого контактів. Ці контакти можуть знаходитись у замкненому і розімкненому стані. В замкненому стані опір між контактами повинен бути мінімальним.

Цей опір називають опором контактного переходу. Здавалося б, для того, щоб забезпечити малий опір контактного переходу, потрібно збільшити площу зіткнення контактів. Однак, навіть при дуже ретельній шліфовці на поверхні контактів залишається багато мікровиступів і мікрозападин (рис. 2.17).

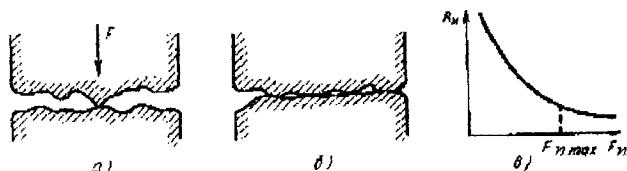


Рис. 2.17. Зміна опору контактного переходу в залежності від зусиль натиску

Тому площа поверхні, що реально контактує менша за площу контактів. Для того, щоб збільшити поверхню, що реально контактує, потрібно прикласти силу, яка притисне контакти один до одного. В першу мить при зближенні контактів вони стикаються лише в одній точці (рис. 2.17, а), площа якої дуже мала, а опір контактного переходу великий. Зусилля натиску F створює на малій площі більший тиск, що призводить до зім'ятості матеріалу контактів, збільшенню площі зіткнення і появи нових гочок зіткнення (рис. 2.17, б). Питомий тиск зменшується, і процес наближення контактів і зім'ятості їх матеріалу закінчується тоді, коли цей питомий тиск зрівнюється з межею міцності матеріалу на зім'ятість. Характер залежності опору контактного переходу R_k від питомого контактного тиску F_n (рис. 2.17, в) показує, що збільшення F_n доцільно лише до певної межі, при якій опір R_k вже достатньо близький до мінімально можливого, що визначається електропровідністю матеріалу контактів. Через замкнені контакти проходить струм I і вони нагріваються під дією теплоти, що виділяється і відповідає потужності втрат в контактному переході: $P_k = I^2 R_k$. Тому допустиме значення струму, що проходить через контакти, залежить від термічної міцності контактів і від умов тепловідводу, тобто від конструкції і розмірів контактів.

В розімкненому стані опір контактів повинен наближатись до нескінченності (практично мільйони Ом), що забезпечується ізолювальними властивостями середовища в контактному проміжку і відстанню між контактами. В розімкненому стані під дією хімічного впливу навколишнього середовища відбувається *корозія контактів*. Ця корозія полягає у виникненні оксидних (під дією кисню повітря) і сульфідних (під дією сірки повітря) плівок. В деяких матеріалах (наприклад, в міді) ці плівки мають великий опір, що призводить до збільшення опору контактного переходу при замиканні контактів.

Найбільш складний режим роботи контактів пов'язаний з

розмиканням електричного кола, оскільки при розмиканні контактів між ними виникає електрична дуга. При цьому відбувається розплавлення контактів і їх зношування, яке називається електричною *ерозією*.

Таким чином, під час роботи контакти підлягають механічному стиранню, хімічній корозії та електричній ерозії. Зменшити негативний вплив цих факторів можна при правильному виборі конструкції контактів і їх матеріалу.

Конструктивні типи контактів. За формою поверхонь, що контактують всі конструкції контактів можуть бути розділені на три основних типи: точкові, лінійні і площинні. *Точкові* контакти (рис. 2.18, а) мають вигляд конусів або напівсфер, які стикаються з площиною або напівсферою в одній точці. Такі контакти призначені для перемикання малих струмів. *Лінійні* контакти (рис. 2.18, б) мають вигляд двох циліндричних поверхонь або призми і площини, що стикаються по лінії. Вони призначені для середніх і великих струмів. *Площинні* контакти (рис. 2.18, в) мають стикання по площині і призначені для великих струмів.

Контактні вузли включають, окрім контактів, кручені або плоскі пружини, які забезпечують силу натискання між контактами.

На рис. 2.19 наведений важільний контактний вузол, який складається з двох плоских пружин з нерухомим 1 і рухомим 2 контактами.

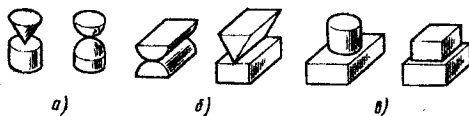


Рис. 2.18. Основні типи контактів

Пружини жорстко закріплені одним кінцем в ізоляційній основі 3. Переміщення рухомого контакту 2 відбувається під впливом упора 4. Після того, як рухомий контакт 2 переміститься на величину розхилу контактів

X_o відбудеться замикання контактів. Обидві пружини отримують додатковий прогин на величину прогину контактів X_m , оскільки рух упора 4 трохи продовжиться. За рахунок цього відбудеться прослизання контактів (його ще називають притиранням), яке необхідне для знищення пилу і оксидної плівки з поверхні контактів.

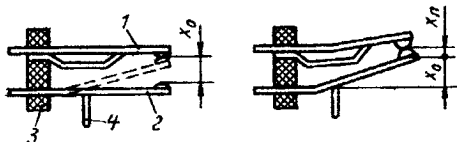


Рис. 2.19. Важільний контактний вузол

На рис. 2.20 показаний мостовий контактний вузол, який забезпечує розрив електричного кола в двох місцях, що підвищує надійність роботи. При переміщенні упора 1, місток з двома рухомими контактами 3 переміщується в напрямку двох нерухомих контактів 4 до стикування контактів. Кручена пружина 2 забезпечує зусилля притискання і можливість самовстановлення рухомих контактів відносно нерухомих, що компенсує зношування контактів і деякі неточності при їх виготовленні. Повний хід упора 1 складається з розхилу контактів X_o і провалу X_n (аналогічно контактному вузлу на рис. 2.19).

На рис. 2.21 наведений важільний контактний вузол з шарнірним закріпленням рухомого контакту 2, який торкається нерухомого контакту 3 по лінії. Контактне натискання відбувається за допомогою пружини 4.

Переміщення рухомого контакту відбувається при обертанні важеля 1 проти годинникової стрілки відносно осі O_1 . Спочатку рухомий контакт 2 переміщується на величину розхилу контакту до стикування з нерухомих контактом 3 в точці А.

Після цього рухомий контакт здійснює складний рух, обертаючись одночасно відносно осі O_2 і разом із важелем 1 відносно осі O_1 . В результаті рухомий контакт 2 перекочується по нерухомому 3. В

замкненому стані контактування відбувається в точці *B*. Перекочування сприяє очищенню контактів від окисних плівок, а головне - точка *B* не підлягає електричній ерозії під час розмикання контактів.

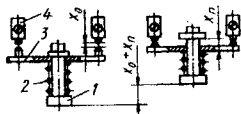


Рис. 2.20. Мостовий контактний вузол

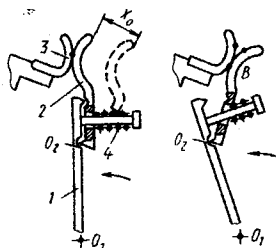


Рис. 2.21. Важільний контактний вузол з контактами, які перекочуються

Матеріали контактів. Обираючи матеріал контактів, необхідно забезпечити виконання ряду вимог: велика механічна стійкість, висока температура плавлення, добра теплопровідність і електропровідність, стійкість проти корозії та ерозії. Низька вартість бажана, але вона не відноситься до основних вимог. Основні вимоги - це ті, які забезпечують високу надійність. Відомі випадки, коли відмова лише одного контакту призводить до втрат, які в мільйони разів перевищують вартість цього контакту.

Перерахованим вище вимогам найбільшою мірою задовольняють срібло, золото, платина та їх сплави - вольфрам, мідь (табл. 2.3).

Опір контактного переходу визначається за формулою:

$$R_k = a / F^b,$$

де *a* - коефіцієнт, який залежить від матеріалу і обробки поверхні контакту; *b* - коефіцієнт форми контактів; *F* - контактне зусилля. Для точкових

контактів $b \approx 0,5$; для лінійних $b \approx 0,55-0,7$; для площинних $b \approx 1,0$.

Таблиця 2.3

Матеріали для контактів

Матеріали	Густина, г/см ³	Твердість за Вікерсом	Точка плавлін- ня, °С	Питомий опір, Ом /см·10 ⁶	Тепло- провід-ність, Вт/ (см·С, град)
Срібло	10,5	26	960	1,6	4,186
Платина	21,3	65	1770	11,6	0,71
Паладій	11,9	40	1554	10,7	0,71
Золото	19,3	20	1063	2,4	2,92
Срібло-золото (10%)	11,4	29	965	3,6	1,98
Срібло-паладій (10%)	10,6	40	1000	6,8	1,46
Срібло-мідь (10%)	10,3	62	778	2,0	3,42
Платина-іридій (20%)	21,6	120	1780	24,5	0,3
Платина-срібло(40%)	11,0	95	1290	35,8	0,312
Золото-срібло(30%)		32	1025	10,4	0,667

Коефіцієнт a для міді, наприклад, знаходиться в межах від 0,07 до 0,28, тобто може змінюватись в чотири рази. Найменше значення a (і відповідно опору R_k) забезпечується при покритті міді шаром олова (лудіння). Шар олова перешкоджає виникненню оксиду, тому для луджених мідних контактів коефіцієнт $a < 0,1$. Великі значення a отримуються для нелуджених площинних мідних контактів, тому що вони мають місця, що покриті шаром окису. Для срібних контактів $a = 0,06$. Електропровідність оксиду срібла і чистого срібла майже однакова.

Для слабких контактних зусиль у високочутливих реле використовуються благородні метали (платина, золото, платиноіридій) при контактних зусиллях $F = 0,01-0,05$ Н. Ці матеріали не окислюються і мало піддаються ерозії. При контактних зусиллях $F = 0,05-1$ Н і малій частоті

спрацьовування використовується срібло, яке має добру електропровідність, легко оброблюється, але має низьку твердість і піддається ерозії. При контактних зусиллях $F = 0,3-1$ Н і на великій частоті спрацьовування використовуються металокерамічні контакти, що отримують шляхом спікання суміші порошків двох металів: срібла з вольфрамом, молібденом або нікелем, міді з вольфрамом або молібденом. При контактних зусиллях $F > 1$ Н і на великій частоті спрацьовування використовується вольфрам.

Найдешевшим матеріалом є мідь, яка використовується для потужних контактів, що мають порівняно великі розміри і потребують великої витрати матеріалу. Контактні зусилля для міді $F > 3$ Н. Для захисту від корозії окрім лудження використовується посріблення або кадмування мідних контактів.

3. Виконавчі пристрої

Виконавчі пристрої в системах автоматики призначені для приведення в дію різноманітних регулювальних органів, що безпосередньо впливають на об'єкт керування з метою досягнення вихідним розміром цього об'єкту необхідного значення. Існує велика розмаїтість регулювальних органів: для зміни подачі рідин і газів у трубопроводах установлюються заслінки, клапани, шибери і крани; у підйомно-транспортних пристроях це різноманітні контактори, муфти, гальма, варіатори швидкості; в освітлювальних і нагрівальних електроустановках - це різноманітні комутаційні апарати.

Для впливу на регулювальні органи необхідно виконати механічну роботу: повернути заслінку або кран, з'єднати дві половинки муфти, перемістити шестерню на валу коробки передач, замкнути контакти і т.д. Вхідним сигналом виконавчого пристрою в електричних системах

автоматики є електричний струм або напруга, а вихідним сигналом - механічне переміщення.

Для перетворення електричної енергії в механічну служать електромагніти і електродвигуни. Електродвигуни є електричними машинами і вивчаються у відповідному курсі. Слід зазначити, що майже завжди, коли ставиться питання про розробку приводу для регульовального органа, постає вибір між двома варіантами: електромагніт або електродвигун. Основна перевага електромагніту - простота конструкції. У електродвигуна переваг більше: високий ККД, можливість одержання будь-яких швидкостей і переміщень. Проте ці переваги виявляються тільки в порівняно складних системах автоматики і при тривалому режимі роботи. При необхідності мати невеликі переміщення (кілька міліметрів) і зусилля (кілька десятків-сотень ньютон) електромагніти вигідніше, ніж електродвигун із редуктором.

3.1. Силові електромагніти

У попередніх главах уже розглядалися електромагніти, які використовуються як складова частина електромагнітних реле і контакторів. У даній главі будуть розглянуті загальні питання класифікації електромагнітів, їхнього розрахунку, конструювання, застосування в якості виконавчих елементів систем автоматики.

Класифікація електромагнітів. В залежності від виду струму в обмотці електромагніти поділяють на електромагніти постійного і змінного струму, від швидкості спрацьовування – на швидкодійні, нормальної і уповільненої дії. За призначенням електромагніти поділяють на приводні й утримувальні.

Приводні електромагніти служать для виконання механічної роботи. При подачі живлення вони переміщують різноманітні виконавчі пристрої: клапани, натискачі, заслінки, золотники, залізничні стрілки, також переміщують контакти реле і контакторів, друкувальні і перфорувальні пристрої. Для виконання цієї роботи електромагніти повинні бути розраховані на визначену силу і переміщення.

Утримувальні електромагніти служать не для переміщення, а лише для утримання феромагнітних деталей. Наприклад, електромагніт, який використовується при підйомі залізного металобрухту, тільки утримує його, а переміщення здійснюється піднімальним краном. В цьому випадку електромагніт виконує лише роль гака піднімального крану. У металообробці використовуються електромагнітні плити для фіксації оброблюваної деталі на верстаті. Відомі також електромагнітні замки. Оскільки утримувальні електромагніти не виконують роботу, вони розраховуються лише на визначене зусилля. У деяких випадках електромагніт має дві котушки: одна, більш потужна, використовується для переміщення якоря, а інша - лише для утримання якоря в притягнутому положенні.

Існує велика розмаїтість електромагнітів спеціального призначення. Вони використовуються для фокусування електронних пучків у телебаченні, у прискорювачах елементарних часток, у різноманітних вимірювальних приладах, у медичній апаратурі і т.д.

За конструктивним виконанням розрізняють клапанні (поворотні), прямоходові та електромагніти з поперечним рухом. *Клапанні* електромагніти мають невелике переміщення якоря (кілька міліметрів) і розвивають велике тягове зусилля.

Прямоходові електромагніти мають великий хід якоря і більшу швидкість; за розмірами вони менші, ніж клапанні. Часто - це соленоїд

(циліндрична котушка, яка втягує в себе феромагнітний стержень), тому їх іноді називають соленоїдними електромагнітами.

Різноманітні конструкції електромагнітів показані на рис. 3.1. Незважаючи на велике їхнє різноманіття (далеко не всі можливі конструкції показані на цьому рисунку), усі вони складаються з котушки 1, якоря (рухомого магнітопроводу) 2, нерухомого магнітопроводу (осердя 3 і ярма 4). Крім того, вони мають різноманітні пружини, закріплювачі, деталі, що фіксують і передають, корпус.

За конструкцією магнітного кола розрізняють електромагніти з розімкненим (рис. 3.1, г, е) і замкненим магнітопроводом (рис. 3.1, а, б, в, д, ж, з). За формою магнітопроводу розрізняють електромагніти з П-подібним, Ш-подібним і циліндричним магнітопроводом.

Магнітопроводи електромагнітів постійного струму, зазвичай, виконуються суцільними з магнітом деяких матеріалів: звичайних конструкційних сталей і електротехнічних сталей з низькою кількістю вуглецю. Високочутливі електромагніти мають магнітопровід із пермалоїв (сплавів заліза з нікелем і кобальтом). У швидкодійних електромагнітах прагнуть до зменшення вихрового струму, для чого використовують електротехнічні кремністі сталі з підвищеним електричним опором, а магнітопровід є шихтованим (зібраним).

Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід електромагнітів змінного струму збирають (шихтують) з ізольованих пластин товщиною 0,35 або 0,5 мм. В якості матеріалу використовуються гарячекатані і холоднокатані електротехнічні сталі. Окремі частини магнітопроводу, які важко виконати шихтованими, виготовляють із суцільного матеріалу товщиною 2-3 мм.

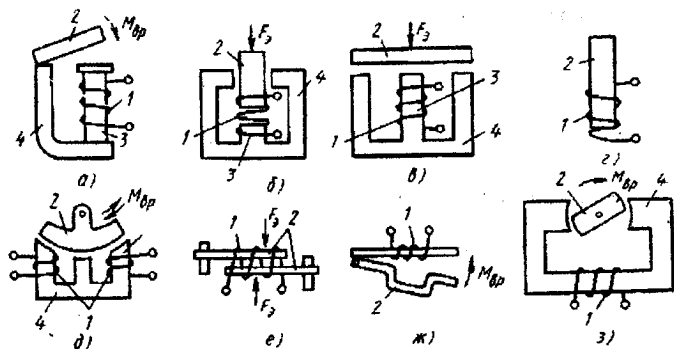


Рис. 3.1. Варіанти конструктивних схем електромагнітів

Котушки електромагнітів за своєю конструкцією бувають каркасні і безкаркасні, а за формою перетину - круглі і прямокутні. Провід каркасної котушки намотують на каркас з ізоляційного матеріалу (текстоліт, гетинакс, пластмаса). Провід безкаркасної котушки намотують безпосередньо на осердя, обмотане ізоляційною стрічкою, або на спеціальний шаблон. Для забезпечення міцності котушки, виконаної на шаблоні, її обмотують стрічкою (бандажують) і просочують компаундним лаком. Котушки, як правило, намотують мідним проводом з ізоляцією, що вибирається, виходячи з призначення й умов роботи електромагніту.

В залежності від засобу вмикання розрізняють послідовні і паралельні котушки. Паралельні котушки мають велике число витків і намотуються тонким проводом. Зазвичай, вони включаються на повну напругу мережі. Послідовні котушки мають порівняно малий опір, тому що виконуються товстим проводом і з малим числом витків. Струм такої котушки визначається не її опором, а залежністю від тих пристроїв, з якими вона включена послідовно.

Розрізняють також електромагніти, призначені для тривалої, короткочасної і повторно-короткочасної роботи.

3.2. Електромагнітні муфти

Передачу обертального моменту з ведучого вхідного валу (найчастіше валу привідного двигуна) на співосьовий, який ведеться, вихідний (вал привідного механізму, механічного завантаження) здійснюють за допомогою муфт. Класифікація муфт подана на рис. 3.2. Першою класифікаційною ознакою служить керованість муфт, потім – вид енергії керування, далі – характер зв'язку вхідного і вихідного валів і, нарешті, – принцип керування.



Рис. 3.2. Класифікація електромагнітних муфт

Для швидкого вмикання, вимикання і реверсу приводних механізмів, а також для регулювання їх швидкості і обмеження моменту, який передається, використовують різні керовані муфти. До них відноситься велика група муфт з електричним керуванням (електромеханічних), в яких для передачі механічного моменту виконавчого механізму, використовують електричний сигнал. Оскільки його потужність менша за ту, що розвивається на валу, який ведеться, то електромеханічну муфту

можна розглядати, як підсилювач з коефіцієнтом підсилення за потужністю:

$$k_p = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = M\Omega(UI),$$

де

M – електромагнітний момент муфти;

Ω – кутова частота обертання, яка встановилася;

U – напруга живлення;

I – значення струму, який встановився в котушці.

В муфті-підсилювачі електричний сигнал керує потужністю, яка передається від ведучого вала веденому.

Керовані муфти за виглядом статичної характеристики швидкість обертання веденого вала – сигнал керування бувають релейними і аналоговими. Перші після подачі сигналу керування здійснюють жорстке з'єднання валів, а другі – гнучке з'єднання, при якому швидкість веденого вала, пов'язана плавною залежністю з сигналом керування. Можливість гнучкого з'єднання дозволяє в деяких системах керування обійтись без керованих виконавчих двигунів.

Приводи з керованими муфтами мають велику швидкодію через менший момент інерції муфт у порівнянні з виконавчими двигунами.

Керовані електромеханічні муфти використовують в регулювальних приводах в діапазоні потужностей від декількох ват до десятків мегават.

Нижче приведено декілька типів електромеханічних муфт з електричним керуванням.

Фрикційні муфти. Фрикційні муфти (ФМ) в основному призначені для жорсткого з'єднання валів. Гнучке з'єднання з їх допомогою можливе лише шляхом імпульсного керування, при якому частота обертання являє собою функцію скважності імпульсів напруги, що подаються на затискачі

обмотки. Фрикційні муфти, або електромеханічні муфти сухого тертя, з механічним зв'язком (див. рис. 3.3), характеризуються більшою різноманітністю конструкцій і схем керування.

На рис. 3.3, а показана однодискова нереверсивна ФМ, яка складається з двох циліндричних напівмуфт. На ведучому валі 7 жорстко посаджена напівмуфта 4, яка є осердя і ярмом електромагніту. Його ярком служить напівмуфта 2, яка з'єднана з веденим валом 1 ковзальною посадкою і, відповідно, може пересуватися в осьовому напрямку. За допомогою кілець 6 і щіток на обмотку 5 подають управляючі напруги. Тягове зусилля, що утворюється, викликає притягнення якоря 2 до осердя 4 і щільне притягнення один до одного фрикційних дисків 3 із матеріалів з високим коефіцієнтом тертя (сталь-сталь, чавун-чавун, бронза-бронза, чавун-бронза, сталь-феродо та ін.), дякуючи чому забезпечується з'єднання валів.

Коли по обмотці не протікає струм, якорь відтягується від осердя пружиною. Основною перевагою однодискової ФМ є простота, проте з ростом обертового моменту, що передається, значно збільшуються її розміри. При інших рівних умовах вони значно менші у багатодискових ФМ.

Дійсно, муфтовий передавальний момент, який утворюється силами тертя m фрикційних дисків, визначається як

$$\begin{aligned}
 M &= (m-1) \int_{R_B}^{R_H} dN k_{mp} R = (m-1) \int_{R_B}^{R_H} (\delta_{\text{дон}} 2\pi R dR) k_{mp} R = \\
 &= (m-1) 2\pi \delta_{\text{дон}} k_{mp} \int_{R_B}^{R_H} R^2 dR = \left(\frac{2}{3}\right) \pi \delta_{\text{дон}} k_{mp} (1 - k_R^3) \cdot (m-1) R_H^3 = \\
 &= 0.26 \cdot \delta_{\text{дон}} k_{mp} (1 - k_R^3) (m-1) D_H^3,
 \end{aligned}$$

де: $\delta_{\text{доп}}$ - допустимий питомий тиск; $k_{\text{тр}}$ - коефіцієнт тертя ($\delta_{\text{доп}}$ і $k_{\text{тр}}$ для кожної пари матеріалів мають свої значення); dN - сила притягнення дисків в елементарному шарі $2\pi R dR$, $k_R = R_B / R_H$.

Відповідно, більший передавальний момент пов'язаний з необхідністю збільшувати зовнішній діаметр D_H . Якщо ж в ФМ передбачити декілька фрикційних дисків ($m > 2$), то при інших рівних умовах значення D_H суттєво зменшиться зі зростанням m :

$$D_H = \sqrt[3]{\frac{M}{0.26 k_{\text{тр}} \delta_{\text{доп}} (1 - k_R^3) (m - 1)}}$$

Одна з конструкцій багатодискових ФМ приведена на рис. 3.3, б. Фрикційні диски 12 з'єднані шліцями внутрішнього кола з ведучим валом 8, а диски 13 за допомогою шліців на зовнішньому колі - з веденим валом 15. При відключеній обмотці 11 диски 12 і 13, які чергуються, ковзають один відносно одного. Подача напруги керування забезпечує притискання дисків один до одного, внаслідок притягання до осердя 10 натискної шайби 14, яка є якорем електромагніту. Виникає з'єднання між дисками, необхідне для передачі заданого моменту M . З виразу можна визначити число фрикційних дисків m для передачі потрібного обертового моменту M валу, який ведеться, при заданому зовнішньому діаметрі D_H ФМ. Їх невелике число ($m = 6-10$), а значить надійне і швидке ввімкнення ФМ досягається при достатньо високих значеннях питомого тиску на фрикційних поверхнях порядку 7,8 - 9,8 Па.

З рис. 3.3, б, на якому штрихами показана умовна штрихова лінія верхньої половини ФМ, видно, що по відношенню до натискної шайби 14 фрикційні диски являють собою магнітні шунти, по яким замикаються потоки розсіювання, що послаблюють силу притягування. Щоб магнітний опір в радіальному напрямку став значно більшим, ніж в осьовому, в

дисках зроблені вирізи, які приводять до утворення вузьких перемичок, що легко насичуються. Таким чином вдається обмежити потік розсіювання через кожний диск в середньому до 2 - 4%.

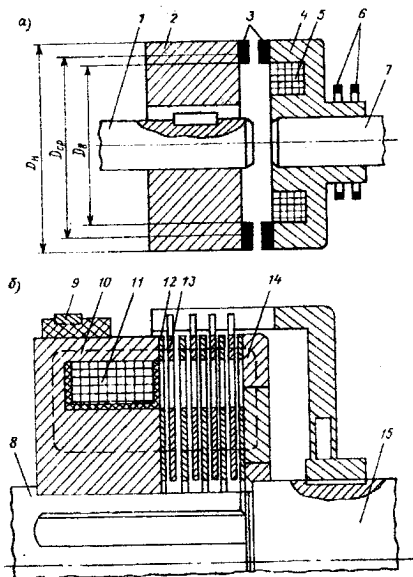


Рис. 3.3. Фрикційні муфти

Обмотку ФМ звичайно підключають до постійної напруги (або змінної напруги через вмонтований випрямляч), щоб використовувати переваги електромагнітів постійного струму. При відносно низьких напругах необхідність в другому струмопровідному кільці відпадає, оскільки один із полюсів джерела живлення подають на корпус ФМ.

Тягове зусилля, яке повинен розвивати електромагніт, можна знайти з виразу:

$$F_T = \delta_{\text{дон}} \pi (R_H^2 - R_B^2) = \delta_{\text{дон}} \pi (1 - k_R^2) R_H^2.$$

Для його створення в робочому зазорі необхідна магнітна індукція B_{δ} , значення якої можна визначити з формули Максвелла

$$B_{\delta} = 5.01 \cdot 10^{-3} \sqrt{F_T / (10s_{\delta})},$$

де s_{σ} – площа поперечного перерізу робочого зазору.

Щоб провести робочий потік через робочий зазор, у відповідності з 2-м законом Кірхгофа для магнітних ланцюгів необхідна МРС

$$F_{\delta} = H_{\delta} l_{\delta} = B_{\delta} l_{\delta} / \mu_0 = B_{\delta} l_{\delta} / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 1.6 \cdot 10^6 B_{\delta} \delta_p,$$

де $l_{\sigma} = 2\sigma_p$; σ_p – довжина робочого зазору.

Для врахування магнітного опору магнітопроводу і неробочих зазорів знайдене значення МРС збільшують на 20-30 %:

$$F = IW = (1.2 \div 1.3) F_{\delta}.$$

Площу вікна $S_{\text{вік}}$ для розміщення обмотки електромагніту знаходять із співвідношення:

$$s_{\text{ок}} k_3 j = F,$$

де k_3 – коефіцієнт заповнення вікна міддю;

j – допустима щільність потоку в обмотці.

Вікно виконують прямокутної форми зі співвідношенням розмірів h в осьовому і b в радіальному напрямках $h / b = 2.5$.

Після такого приблизного розрахунку уточнюють розміри

магнітопроводу, параметри електромагніту і дані обмотки.

Режим, який встановився в приводах з електромагнітними муфтами, настає після закінчення перехідних процесів не тільки в муфті, але й у двигуні і приводному механізмі. Тому перехідні процеси розглядають, власне, не в муфті, а в системі “двигун-муфта-приводний механізм”.

При аналізі перехідних процесів під час пуску приводу з ФМ можна виділити три основних інтервали.

Час $t_{в.л.}$ вибірки люфту, $\delta_A = \delta_0 - \delta_k$, де δ_0 – довжина повітряного зазору у відтягнутому стані якоря при $I=0$; δ_k – те ж саме в притягнутому стані, коли ярір перемістився до початку зіткнення фрикційних поверхонь. Іншими словами, цей період охоплює час $t_{зр} + t_{де1}$, де $t_{зр}$ – час зрушення якоря при подачі напруги U на затискачі котушки до початку осьового руху якоря; $t_{р1}$ – час осьового руху якоря до зіткнення фрикційних поверхонь. Час $t_{в.л.}$ визначається тільки параметрами ФМ. В цей період ведений вал, нерухомий, оскільки з'єднання напівмуфт ще немає.

Час зчеплення $t_{зч} = t_{р2}$ – від зіткнення до повного зчеплення поверхонь тертя. У цей час диски проковзують один відносно одного, поки ще не закінчився осьовий рух якоря, магнітний потік і електромагнітний момент продовжують рости. Після початку обертання веденого вала, при $M > M_c$, де M_c – момент опору, утворюваний навантаженням, частота обертання двигуна зменшується, а приведенного механізму - збільшується. Вони стають однаковими, коли настає повне зчеплення. Час $t_{зч}$ визначається параметрами не тільки ФМ, але й двигуна та приведенного механізму.

Час жорсткого розгону $t_{ж.р.}$ від моменту встановлення повного зчеплення напівмуфт до досягнення сталого значення частоти обертання. На цьому етапі процес протікає так само, як і при жорсткому з'єднанні валів, і час $t_{ж.р.}$ визначається тільки параметрами двигуна і приводного механізму.

При аналізі перехідних процесів після зняття напруги з обмотки ФМ зручно розрізнити два тимчасових інтервали:

- період розчеплення $t_{розч}$, що відповідає часу спадання магнітного потоку після зняття U і зменшення передавального моменту, до порушення рівності $M = M_c$,
- час гальмування $t_{гал}$ від початку проковзування фрикційних поверхонь до повної зупинки веденого вала, під дією моменту навантаження.

Точне дослідження другого періоду перехідних процесів при пуску значно складніше, тому часто вводять спрощення. Вважають, наприклад, що вже на початку зчеплення $M > M_c$. Це, можна вважати, відбувається при форсуванні струму в обмотці ФМ тим або іншим схемним способом (наприклад, включенням послідовно з обмоткою додаткового активного опору, шунтованого контактами або ємністю, або нелінійного активного опору при $U > U_{ном}$ – див. розд. 2) і т.ін. Тоді більшість рівнянь, що описують перехідні процеси, суттєво спрощуються.

Передаточну функцію ФМ можна подати у вигляді

$$W(p) = \frac{\Delta\Omega(p)}{\Delta U(p)} = ke^{-pt_{ср}}$$

де $k = \left(\frac{\partial\Omega}{\partial M}\right)_y \cdot \left(\frac{\Delta M}{\Delta U}\right)$ – коефіцієнт передачі ФМ, при чому $\left(\frac{\partial\Omega}{\partial M}\right)_y$ –

крутизна статичної характеристики муфти в точці сталого режиму, при заданому значенні M , Ω – кутова частота обертання на виході ФМ; $t_{ср}$ – час спрацьовування з урахуванням часу усіх трьох етапів аналогічно передачній функції елемента затримки, ланки, що запізнюється.

Наявність ковзальних контактів «струмопровідні кільця – щітки» ускладнює конструкції ФМ, знижує надійність їхньої роботи, ускладнює експлуатацію. Тому широко застосовують ФМ із нерухомими обмотками,

проте їм притаманні великі розміри (зокрема, аксиальні).

Феропорошкові муфти. Феропорошкові муфти (ФПМ) призначені в основному для гнучкого з'єднання валів, хоча можуть застосовуватися і для більш жорсткого.

Конструктивна відміна феропорошкових муфт із сухим або рідким наповнювачем і електромагнітним керуванням від розглянутих вище фрикційних муфт (ФМ) із таким самим керуванням полягає в тому, що, по-перше, напівмуфта на веденому валі посаджена жорстко і, по-друге, незмінний через це повітряний робочий зазор заповнений магнітодіелектриком. Останній являє собою або суміш феромагнітного порошку (сталь, легована хромом або нікелем, карбонільне залізо, пермалой та ін.) із сухим діелектриком (колоїдний графіт, тальк, тонкодисперсне скло і т.д.), який називається роздільником і служить для запобігання утворенню грудок і суттєвого зменшення зносу при високих температурах, або завись феромагнітного порошку (найчастіше карбонільне залізо) у рідкому діелектрику (звичайно кремнійорганічному або мінеральній олії), що захищає порошок від окислення і утворення грудок. Такі наповнювачі-магнітодіелектрики мають властивість тиксотропії, тобто здатність ставати драглистими, густішати аж до затвердіння з підсиленням магнітного поля, а при знятті його повертатися у вихідний стан. Орієнтуючись за силовими лініями поля, феромагнітні частинки утворюють ланцюги - зв'язки, що зчіплюють ведучу і ведену поверхні. Під дією ведучої поверхні починає рухатися ведена.

На рис. 3.4, а приведена схема циліндричної ФПМ з двома концентричними поверхнями 10 і 9. Кільцевий простір між ними заповнений порошковою сумішшю 8. На внутрішній, ведучій напівмуфті розташована обмотка збудження 7, що виведена на контактні кільця 2, до яких притискаються щітки 4. Кришки 5 і 14 виготовлені з немагнітного

матеріалу для того, щоб направити велику частину магнітного потоку через порошковий шар, зменшивши потік розсіювання, і знизити масу веденої напівмуфти. Виносними лініями 6 позначені деталі з феромагнітного матеріалу, 13 – підшипники, 11 – ущільнення підшипників. Штриховими лініями 1 показані шляхи основного магнітного потоку.

Лінійність залежності $M(I)$ при малих і великих значеннях струму порушується (рис. 3.4, б) через зміну щільності шару, що зчіплює, і через насичення магнітопроводу. При відсутності струму в обмотці з ведучого вала 3 на ведений 12 передається невеликий момент обертання M_0 , обумовлений силами тертя в робочому шарі й ущільненнях муфти та залишковим магнітним потоком. Характеристика $M(I)$ має магнітний і механічний гістерезис (спадна гілка показана штриховою лінією). Відношення $\Delta M / M_{max}$ коливається в межах 7-15%, а M_0 / M_{max} – в межах 3-10%.

На рис. 3.4, в приведено ескіз магнітної системи ФПМ з нерухомою обмоткою. Такі муфти називають також безконтактними через відсутність необхідності в ковзальних контактах «кільця-щітки». Тут 16 – обмотка, 17 – нерухома частина магнітопроводу, 18 – неробочий повітряний зазор, 19 – провідна частина, 20 – робочий зазор, 21 – ведена частина, 15 – магнітна силова лінія.

ФПМ мають важливу перевагу перед ФМ, тому що в них здійснюється гнучке зчеплення валів: магнітні зв'язки, що утворилися при даному струмі, витримують визначений граничний момент опору M_c , при $M < M_c$ ці зв'язки руйнуються, муфта починає просковзувати, зв'язки знову відновляються і рвуться і т.д. Через такий імпульсний вплив частоти обертання n_1 і n_2 ведучого і веденого валів нерівні, і останній обертається з ковзанням

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

відмінним від нуля. Таким чином, при гнучкому зчепленні валів $n_2 < n_1$. Просковзування обмежує передавальний момент M , що передається, аж до зупинки веденого вала ($s=1$) при значному перевищенні M_c над M .

Рис. 3.4, г ілюструє одне з найважливіших властивостей ФПМ – незалежність передавального моменту M на веденому валі від його частоти обертання при незмінному струмі збудження (керування), обмотки.

На рис. 3.4, д показана залежність $n_2(M)$ для однієї з ФПМ при $I=100\text{мА}=\text{const}$ і $n_1=500\text{ об/хв}=\text{const}$. При $M = M_{ck}$ починається ковзання, а при $M = M_m$, воно стає рівним одиниці. Для цієї ж муфти на рис. 3.4, е приведена крива $n_2(i)$ при постійному моменті навантаження $M_n=393\cdot 10^3\text{ Нм}=\text{const}$ і $n_1=500\text{ об/хв}=\text{const}$. Криву $n_2(i)$ можна побудувати за залежностями $M(i)$ і $n_2(M)$. З цієї кривої очевидно, що при достатньо великому струмі вали зчеплені жорстко ($n_2=n_1$, $s=0$). Зменшення струму до значення I_{ck} викликає просковзування, внаслідок чого n_2 стає менше n_1 . Чим менше I , тим більше s . Коли I досягне значення I_0 , ведений вал зупиняється ($n_2=0$, $s=1$). Отже, ФПМ дає можливість регулювати частоту обертання. Тепло, яке при цьому виділяється, розсіюється або за допомогою спеціальної системи охолодження, або за рахунок збільшення розмірів муфти і пов'язаного з цим недовикористанням її по M . Крім того, на майже вертикальній ділянці характеристики $n_2(i)$ підтримувати необхідну частоту обертання можна тільки за допомогою достатньо складної системи автоматичного регулювання. Отже, ФПМ дають обмежені можливості для регулювання частоти обертання в широкому діапазоні.

На рис. 3.4, ж подана залежність $P/P_{max}=f(Iw/(Iw)_{max})$ потужності,

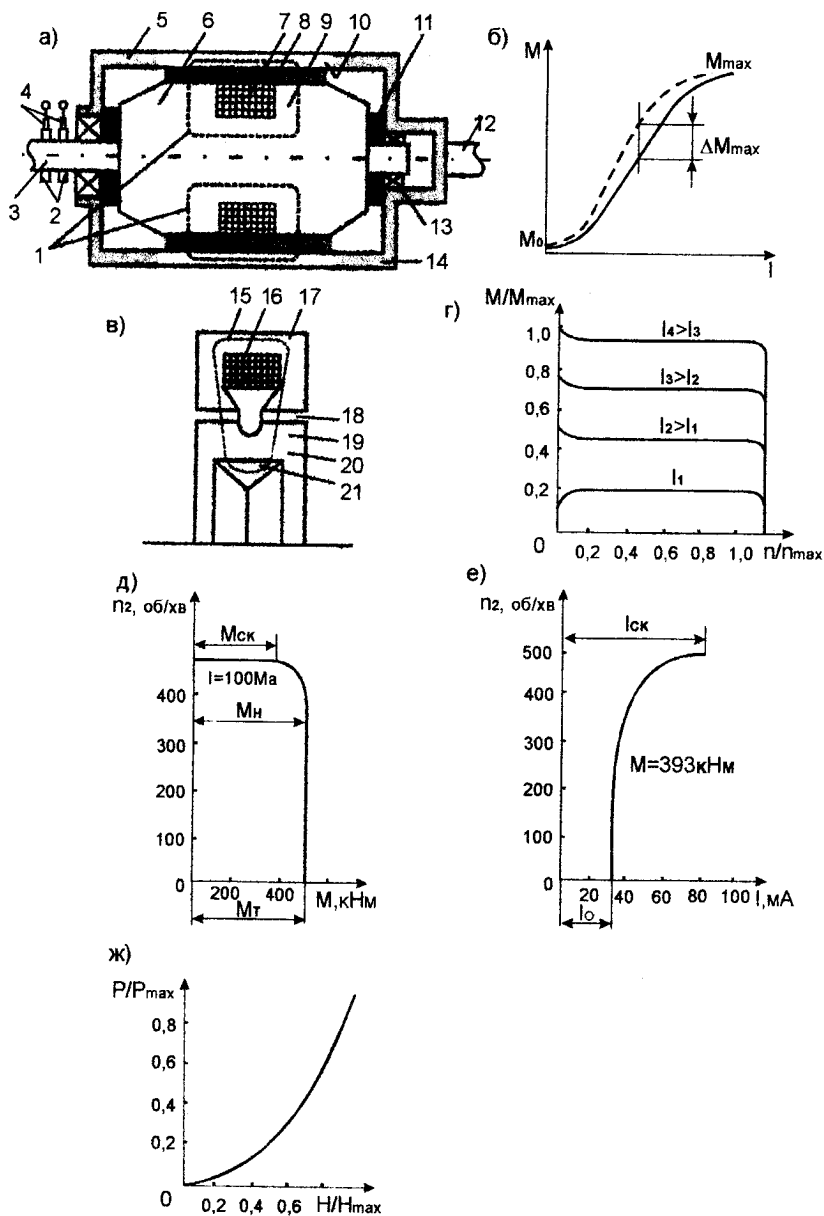


Рис. 3.4 Ферропорошкові муфти, основні залежності

що передається, від МРС обмотки муфти.

Наповнювач практично безінерційний. Отже, кожному миттєвому значенню струму відповідають визначені потік Φ і передавальний момент M .

Вважаючи індуктивність обмотки ФПМ незмінною у часі перехідного процесу і лінеаризуючи залежності $M(I)$ і $M_c(\Omega)$, приходимо до рівнянь передаточних функцій за збуренням

$$W_1(p) = \frac{\Delta\Omega}{\Delta M} = \frac{k_m}{T_m p + 1}$$

і керувальним впливом

$$W_2(p) = \frac{\Delta\Omega}{\Delta U} = \frac{k \cdot k_m}{(T_p + 1)(T_m p + 1)},$$

де $\Delta\Omega$ і ΔU – приріст відповідно кутової частоти обертання веденого вала і напруги на затискачах обмотки; $k = k_{mi}/R$, $k_{mi} = 1/(\Delta M_c/\Delta i)$; $k_m = 1/(\partial M_c/\partial \Omega)_v$ – коефіцієнти передачі муфти; T – стала часу кола обмотки; $T_m = J/(\partial M_c/\partial \Omega)_v$ – стала часу муфти; J – момент інерції електропривода з ФПМ, приведений до веденого вала; $p \equiv d/dt$.

Оскільки наповнювач збільшує магнітну проникність робочого зазору в чотири-вісім разів, потужність керування знижується приблизно вдвічі в порівнянні з ФМ. Другою перевагою ФПМ перед ФМ є на порядок -півтора більша швидкодія, обумовлена нерухомістю обох напівмуфт в осьовому напрямку і практичною безінерційністю наповнювача. Основний недолік ФПМ – більш великі розміри і маса, ніж у ФМ.

ФПМ із рідким наповнювачем принципово не відрізняються від

муфт із сухим магнітодіелектриком та мають більш складну конструкцію, тому що необхідно ущільнювати підшипники і вживати заходів, щоб олія не витікала з робочої порожнини. Вони мають значно менший ресурс роботи через старіння суспензії, малої теплостійкості, хоча і характеризуються плавністю дії, кращими умовами охолодження, великим коефіцієнтом підсилення, високою рухливістю наповнювача, здатністю захищати феромагнітні частинки від впливу кисню. У них не злежується порошок, коли частинки, ущільнюючись, втрачають здатність переорієнтування у шарі.

Часто ФПМ застосовують в якості зчіпних, запобіжних, динамометричних, гальмівних муфт і, завдяки лінійній залежності $M(I)$ -підсилювачів потужності для сервоприводів і систем, що стежать.

Феропорошкові муфти крім електромагнітного можуть мати магнітне керування (див. рис. 3.2), здійснене за допомогою постійних магнітів. Для розчеплення напівмуфт постійний магніт або обладнують обмоткою, яка розмагнічується, або механічно пересувають його чи використовують магнітні шунти. Таке керування використовують у муфтах, що служать запобіжниками від перевантаження, при якому починається просковзування, у тих випадках, коли неприпустиме розчеплення при зникненні струму збудження як, наприклад, у муфтах піднімальних механізмів та ін.

Муфти ковзання. Муфти ковзання (МК) в основному призначені для гнучкого зчеплення валів і регулювання частоти обертання веденого вала при приводному двигуні, який не регулюється. Їх називають також асинхронними, індукційними, муфтами зі зв'язком через поле з електромагнітним керуванням.

3 усієї конструктивної і функціональної різноманітності МС роздивимося призначені для вказаних вище цілей широко поширені муфти

індукторного типу з масивним якорем як найбільш прості у виготовленні й експлуатації.

Принцип дії таких МС розглянемо на прикладах конкретних виконань, приведених на рис. 3.5.

На рис. 3.5, а показана схема муфти індукторного типу з ковзальними контактами, що є струмопідвідними; основними частинами якої є ярір 4 і індуктор 6. Між двома рядами зубців 3 розміщена кільцева обмотка 5, живлення до якої підводиться за допомогою кілець 2. Таку конструкцію називають одноіменнополосною, тому що зубці кожного ряду мають однакову полярність. Індуктор за допомогою шліців з'єднується з провідним валом 1, а ярір також посаджений на веденому валі 7. При обертанні індуктора, внаслідок механічного переміщення електромагнітів, виникає обертове магнітне поле. Взаємодія наведених при цьому в якорі вихрових струмів з обертовим магнітним полем захоплює ярір убік обертання індуктора.

Виділимо на внутрішній поверхні якоря контури, що відповідають обрисам зубців N і S. При обертанні індуктора потокозчеплення з виділеними контурами зменшуються, і відповідно до закону електромагнітної індукції, в якорі наводяться вихрові струми. Відповідно до принципу Ленца їхні напрямки повинні бути такими, щоб підтримувати значення поткозчеплення, тобто щоб утворюваний ними магнітний потік був спрямований згідно з потоком обмотки, а механічні сили від взаємодії останнього з вихровими струмами викликали рух якоря слідом за індуктором. Можна сказати, що на внутрішній поверхні якоря проти кожного полюса N-індуктора виникає полюс S, а проти полюса S-індуктора – полюс N на якорі. Взаємне притягання цих полюсів протилежних полярностей змушує ведений вал обертатися в сторону ведучого.

На рис. 3.5, б подана схема магнітної системи безконтактної МС

індукторного типу. У нерухомій частині 12 магнітопроводу розміщена кільцева обмотка 13. Якір 14 складається з двох феромагнітних половин циліндричної форми, які сполучені немагнітним кільцем 10, яке

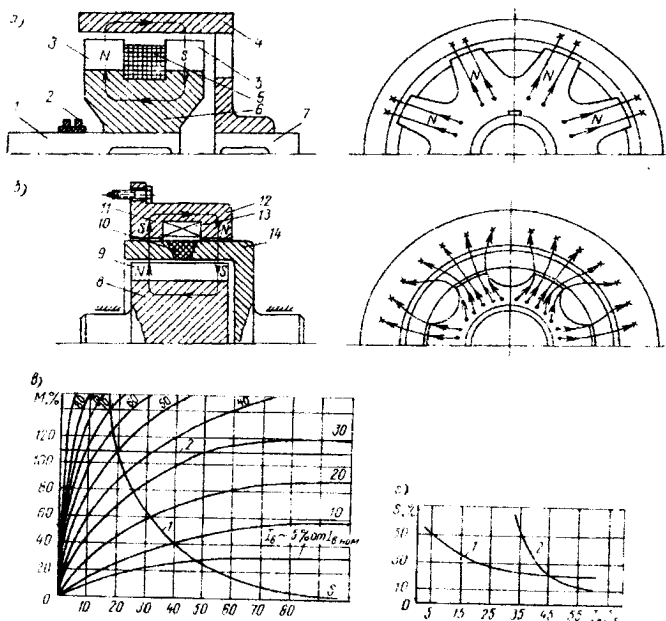


Рис. 3.5. Муфти ковзання, основні залежності

перешкоджає замиканню магнітного потоку 11 по якорю. Проходячи по індуктору 8, цей потік намагнічує зубці 9. Якщо на внутрішній поверхні якоря при обертанні індуктора магнітна індукція по колу змінюється, наводячи вихрові струми в якорі, то на зовнішній його поверхні поле близьке до однорідного, завдяки чому якір 14 практично не взаємодіє з нерухомою частиною 12. Безконтактне виконання МК збільшує її експлуатаційну надійність, проте пов'язане з підвищеною витратою міді в обмотці і великими розмірами магнітної системи. Все це пояснюється необхідністю створення великої МРС для подолання додаткового,

неробочого зазору між нерухомою частиною магнітопроводу і зовнішньою поверхнею якоря.

Для однієї з МК великої потужності, виконаних часто з якорями у вигляді білячої клітки, на рис. 3.5, в приведені механічні характеристики $M(s)$ при незмінному струмі збудження ($I_a = \text{const}$) і частоті обертання приводного двигуна ($n_1 = \text{const}$). Кожному значенню струму збудження відповідає своя механічна характеристика. З ростом I_a зменшується s внаслідок більшого зв'язку якоря з індуктором через більш сильне магнітне поле. Точніше це можна пояснити тим, що вихрові струми залежать від значення магнітного потоку обмотки і швидкості перетину ним якоря (порівняно з виразом $E = cn\Phi$ для ЕРС електромагнітної індукції); при незмінному моменті опору M_c електромагнітний момент обертання M повинен також залишатися постійним; оскільки M виникає від взаємодії поля і вихрових струмів, то останні автоматично зменшуються за рахунок зростання частоти обертання якоря, тобто зменшення s при підсиленні поля зі збільшенням I_a .

Найважливіші переваги МК – простота конструкції і керування, низька вартість, відсутність деталей, які зношуються, що обумовлює підвищений експлуатаційний ресурс і т.п. Крім відзначених вище гнучкого зчеплення і плавного регулювання частоти обертання МК їх різноманітні конструктивні виконання забезпечують обмеження моменту обертання, регулювання гальмівного зусилля за будь-яким законом, попередження поломок електропривода, пуск приводного двигуна вхолосту і з моментом опору, що перевищує пусковий момент, відсутність суттєвих труднощів при автоматизації привода та ін. Основними недоліками МК є значні розміри, маса і втрати енергії при тривалій роботі з великими ковзаннями (потужність втрат пропорційна s).

3.3. Електромагнітні пропорційні елементи керування

На відміну від електромагнітних релейних пристроїв електромагнітні пропорційні елементи керування (ЕМПЕК) відносяться до пристроїв безперервної дії, у яких вихідний параметр (переміщення) змінюється пропорційно вхідному (електричному сигналу).

Ці елементи, як і звичайні електромагнітні механізми, в залежності від характеру МРС і потоку поділяються на такі групи:

- нейтральні ЕМПЕК постійного струму, дія яких залежить від сили цього струму і не залежить від його напрямку;
- поляризовані ЕМПЕК постійного струму, напрямок переміщення виконавчого органу яких залежить від напрямку струму на його вході;
- нейтральні ЕМПЕК змінного струму, у яких потік змінюється в часі як за значенням, так і за напрямком.

В залежності від характеру руху виконавчого органу ЕМПЕК поділяються на пристрої з *лінійним* (зворотно-поступальним) переміщенням і з *кутовим* переміщенням.

В пристроях автоматики (електрогідравлічних приводах) найбільше поширення одержали ЕМПЕК постійного струму нейтрального типу з лінійним переміщенням і поляризовані з кутовим переміщенням.

На рис. 3.6, а наведено конструкцію ЕМПЕК нейтрального типу з поступальним переміщенням якоря, яку створено на базі нейтральних електромагнітних пристроїв 1 і 3, що діють на загальний якір 2. Його обмотки 7, 8 вмикаються за диференційною схемою, що забезпечує двостороннє переміщення якоря.

В нейтральному положенні якір утримується двома дисковими (павукоподібними) пружинами 4, 10 із фосфористої бронзи, що мають лінійну залежність прогину від зусиль, які діють на них, що фіксуються шайбами 5, 6.

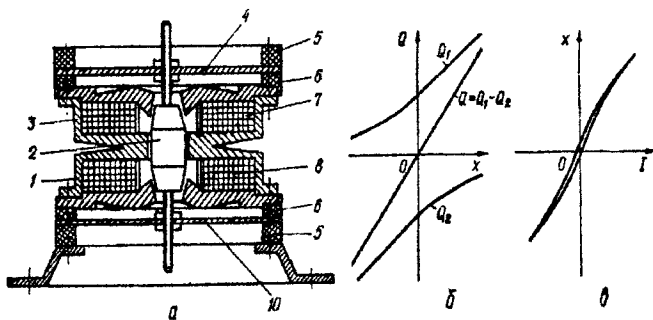


Рис 3.6. ЕМПЕК нейтрального типу

Магнітопрвід ЕМПЕК виконується із заліза “армко”. Якір до пружин кріпиться за допомогою гайок. Для узгодження силових і механічних характеристик якір на кінцях має конусність, а магнітна система - без стопа.

При відсутності вхідного сигналу керування по обмотках ЕМПЕК протікають однакові струми $I_1=I_2$, що забезпечує рівність потоків і тягових зусиль. При цьому якір залишається у початковому, нейтральному положенні.

Вхідний сигнал керування створює нерівність $I_1-I_2 \neq 0$ і нерівність тягових зусиль на торцях якоря, що переміщують якір у бік обмотки з великим струмом. В точках рівності підсумкової електромагнітної і протидійної сил якір займе нове положення рівноваги. При наявності на ЕМПЕК навантаження F_n умовою рівноваги буде:

$$F_c = F_{\text{гп}} + F_n.$$

Електромагнітним пропорційним елементам керування властиві дві статичні характеристики: *силова* (електромеханічна), тобто залежність електромагнітного зусилля (моменту) на виконавчому органі від його переміщення при різноманітних постійних значеннях сигналу керування

(рис. 3.6, б; *зовнішня*, тобто залежність переміщення рухливої частини ЕМПЕК від сигналу управління при відсутності навантаження (рис. 3.6, в). Ця характеристика має гістерезис за рахунок гістерезису намагнічування і сухого тертя. Вона визначає чутливість і лінійність ЕМПЕК.

Поляризований ЕМПЕК складається (рис. 3.7, а) з магнітопроводу 1, якоря 2, прикріпленого з одного кінця шарнірами до магнітопроводу, двох обмоток збудження 3 і 5, розташованих на стержнях магнітопроводу, котушки управління 4 із внутрішніми розмірами, що перевищують розміри якоря, щоб він міг вільно повертатись всередині неї.

При подачі в обмотки збудження струму створюються потоки збудження $\Phi_{a1} = \Phi_{a2}$, що спрямовані вздовж якоря назустріч один одному.

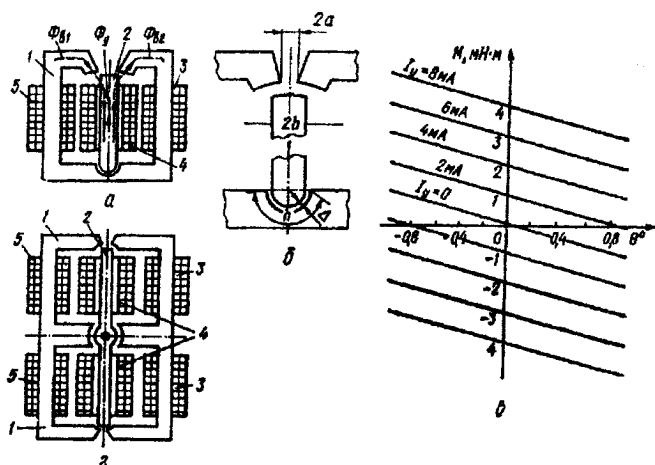


Рис. 3.7. Поляризований ЕМПЕК

Останній займає стійке нейтральне положення і має відновлювальний електромагнітний момент. При подачі в обмотку управління струму визначеного напрямку виникає потік Φ_y , що, розгалужуючись по стержнях магнітопроводу, в одному стержні збігається з потоком порушення, а в

іншому – спрямований назустріч. В результаті взаємодії всіх потоків із якорем на ньому створюються електромагнітні сили

$$F_e = \frac{I_y w_y}{2} \frac{d\Phi_\Sigma}{dx} + \frac{I_b w_b}{2} \frac{d\Phi_b}{dx},$$

де I_y , w_y – струм і кількість витків обмотки управління; I_b , w_b – обмотки збудження; Φ_Σ – сумарний магнітний потік якоря; Φ_b – потік збудження в стержнях магнітопроводу ЕМПЕК.

При малих переміщеннях якоря x від нейтралі можна прийняти

$$x = \theta r_a,$$

де θ – кут відхилення якоря від нейтралі в радіанах; r_a – радіус додатка F_e . Момент, що виникає на якорі від F_e :

$$M_e = F_e r_a,$$

і переміщує якор на деякий кут від нейтралі. Зазвичай кут повороту якоря $\theta \approx 2 \div 3^\circ$. При цьому потокозчеплення змінюється практично лінійно, тому що потоки в стержнях перерозподіляються пропорційно площі перекриття якоря полюсами магнітопроводу. Це забезпечує практично лінійні статичні характеристики поляризованого ЕМПЕК (рис. 3.7, в).

На практиці одержали поширення також *подвоєні* поляризовані ЕМПЕК, принципова схема яких показана на рис. 3.7, г. Конструкція являє собою подвоєння всіх елементів одинарних поляризованих ЕМПЕК, що розташовуються симетрично до горизонтальної осі.

Принцип дії здвоєних поляризованих ЕМПЕК, за винятком підвищення моменту обертання, нічим не відрізняється від принципу дії одинарних поляризованих ЕМПЕК.

Питання динаміки ЕМПЕК. Як показує досвід, динаміку ЕМПЕК варто розглядати у взаємозв'язку з іншими елементами системи автоматичного управління, з якими він взаємодіє. В якості джерела сигналів управління ЕМПЕК використовуються електронні, напівпровідникові або магнітні підсилювачі. При цьому їх вихідний опір визначає характер перехідного процесу і вигляд передаточної функції. Тому той самий ЕМПЕК залежно від типу підсилювача буде мати різноманітні динамічні характеристики.

При роботі ЕМПЕК від підсилювача з високоомним виходом рівняння руху має вигляд

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_e - \delta_{Tp} \frac{dx}{dt} - Cx,$$

де m - маса і переміщення якоря; F_e - тягове електромагнітне зусилля ЕМПЕК; δ_{Tp} - коефіцієнт в'язкого тертя (демпфування); C - жорсткість пружин підвіски якоря.

Тягове зусилля в ЕМПЕК прямоходового типу (див. рис. 3.6, а):

$$Q_e = K_i \Delta I + K_x x, \quad (3.1)$$

де

$$\left. \begin{aligned} K_i &= \frac{2\pi\mu_0 I_0 \omega^2}{\delta_0^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha} \left(hr_a - \delta_0^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha \right) \\ K_x &= \frac{4\pi\mu_0 I_0^2 \omega^2 hr_a}{\delta_0^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

$\Delta I = I_2 - I_1$ - управляючий сигнал; I_1, I_2 - струми в обмотках ЕМПЕК; w - кількість витків обмотки; μ_0 - магнітна проникність повітря; δ_0 - початковий робочий зазор в осьовому напрямку; r_a - радіус циліндричної частини якоря; α - кут його конусності; h - висота конічної частини якоря.

Підставивши (3.1) в (3.2), отримаємо:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \delta_{Tp} \frac{dx}{dt} + (C - K_x)x = K_i \Delta I. \quad (3.3)$$

Якщо ввести позначення:

$$\frac{m}{\delta_{Tp}} = T_1; \quad \frac{\delta_{Tp}}{C - K_x} = T_2; \quad T_1 T_2 = T^2; \quad \xi = \frac{T_2}{2\sqrt{T_1 T_2}};$$

$$\frac{x}{x_m} = \chi; \quad \frac{\Delta I}{I_m} = i; \quad \frac{K_i \Delta I_m}{(C - K_x)x_m} = K_m,$$

де ΔI_m і x_m - максимальні значення сигналу управління і ходу якоря, то рівняння (3.3) у відносних одиницях матиме вигляд:

$$T^2 \frac{d^2 \chi}{dt^2} + 2\xi T \frac{d\chi}{dt} + \chi = K_m i. \quad (3.4)$$

Використовуючи перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, останній вираз запишемо у вигляді:

$$(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) \chi(p) = K_m i(p),$$

звідси передаточна функція, за керівною дією ЕМПЕК, при його роботі від підсилювача з високоомним виходом буде мати вигляд:

$$W_{i(p)} = \frac{\chi_{(p)}}{i_{(p)}} = \frac{K_m}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$

тобто при цих умовах ЕМПЕК є аперіодичною ланкою другого порядку.

Робота ЕМПЕК від підсилювача з низькоомним виходом відрізняється істотним впливом на динаміку індуктивності його обмоток. Для даного режиму роботи ЕМПЕК рівняння електричної рівноваги має вигляд:

$$U_i = (R + R_i)\Delta I + L d(\Delta I)/dt, \quad (3.5)$$

де R , R_i - активні опори відповідно обмоток ЕМПЕК і підсилювача; $\Delta I = I_2 - I_1$ - різниця струмів в обмотках ЕМПЕК; L - індуктивність його обмоток.

Після введення позначень:

$$\frac{\Delta I}{I_m} = i, \quad \frac{U_i}{U_m} = u, \quad T_e = \frac{L}{R + R_i}; \quad K_e = \frac{U_m}{(R + R_i)\Delta I_m},$$

рівняння (3.5) прийме вигляд:

$$T_e di/dt + i = K_e u, \quad (3.6)$$

або в перетвореннях Лапласа при нульових початкових умовах ($T_e p + 1$) $i_{(p)} = K_e u_{(p)}$, звідси передаточна функція ланки "вихід підсилювача - обмотка управління ЕМПЕК"

$$W_{2(p)} = \frac{i(p)}{u(p)} = \frac{K_e}{T_e p + 1}. \quad (3.7)$$

Вираз (3.7) свідчить про те, що струм в обмотках ЕМПЕК при стрибкоподібній зміні напруги управління змінюється за експонентою.

Якщо врахувати, що в структурній схемі ЕМПЕК ланка "вихід підсилювача - обмотка управління ЕМПЕК" увімкнена послідовно з самим елементом, то передаточна функція ненавантаженого ЕМПЕК, що управляється підсилювачем із низькоомним виходом, визначиться з виразу:

$$W_{(p)} = W_{1(p)} W_{2(p)} = \frac{\chi_{(p)}}{u_{(p)}} = \frac{K_e K_m}{(T_e p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T_p p + 1)}, \quad (3.8)$$

який описує аперіодична ланка третього порядку.

Електромагнітні пропорційні елементи керування набули застосування в системах автоматичного управління електрогідравлічними приводами металорізальних верстатів.

Контрольні запитання та завдання

1. Якими формулами визначається електромагнітне зусилля при постійному і змінному струмі?
2. Як узгоджується тягова характеристика з механічною? Що таке метод критичних точок?
3. Призначення, особливості роботи контакторів, магнітних пускачів, автоматичних вимикачів.
4. Як обчислюється час спрацювання електромагніту реле через його складові?
5. Яке призначення силових електромагнітів?
6. Які способи застосовують для прискорення дії електромагніту і які засоби сповільнення застосовують в контакторах?
7. Як зменшити знос контактів в реле і контакторах?
8. Переваги герконів перед електромагнітним реле.
9. Як побудовані основні види електромагнітних муфт обертального руху?
10. Вкажіть можливі способи використання різних електромагнітних муфт.
11. Електромагнітні пропорційні елементи керування: принцип дії, призначення та застосування.

Післямова

Безупинний розвиток електромагнітної техніки нерозривно пов'язаний з успіхами фізики магнетизму, технології виробництва магнітних матеріалів з унікальними властивостями, розрахунку магнітних та електричних кіл, магнітних вимірювань. Досягнення мікроелектроніки та магнетоники безперечно приведуть до суттєвого вдосконалення електромагнітних елементів та пристроїв, що сприятиме подальшому розвитку однієї з найважливіших галузей народного господарства – автоматички і систем управління.

Автор висловлює щире подяку студентам факультету автоматички і комп'ютерних систем управління Вінницького державного технічного університету за надану технічну допомогу в оформленні навчального посібника, насамперед, *Мазур О., Демцю С., Медвідю Є.* та іншим.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Атабеков Г.И., Купаян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С.* Электротехнические основы электротехники. Ч.2 и 3. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. – М.: Энергия, 1979.
2. *Бабиков М.А., Косинский А.В.* Элементы и устройства автоматики. – М.: Высшая школа, 1975. – 464 с.
3. *Балашов Е.П. и др.* Идентификация магнитных элементов автоматики и вычислительной техники. – Л.: Энергия, 1980. – 128 с.
4. *Балашов Е.П.* Проектирование магнитных элементов и устройств электронных вычислительных машин. – М.: Высш. шк., 1966. – 344 с.
5. *Баранов В.Я., Безновская Т.Х. и др.* Промышленные приборы и средства автоматизации. – Л.: Машиностроение, 1987. – 847 с.
6. *Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А.* В мире магнитных доменов. – К.: Наукова думка, 1986. – 159 с.
7. *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электрические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
8. *Боярченко М.А., Черкашина А.Г.* Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – М.: Высшая школа, 1976. – 383 с.
9. *Васюра А.С.* Електромагнітні елементи та пристрої систем управління і автоматики. Ч.1. Електромагнітні елементи аналогових пристроїв / Навч. посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2000.
10. *Васюра А.С.* Елементи та пристрої систем управління і автоматики / Навч. посібник. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 157 с.
11. *Васюра А.С., Кривогузченко С.Г., Кулик А.Я., Компанець М.М.* Елементи локальних систем автоматики / Навчальний посібник. – Вінниця: ІЗМН – ВДТУ, 1998. – 103 с.
12. *Вашкевич Н.П., Сергеев И.П., Чижухин Г.Н.* Электромагнитная техника. – М.: Высш. шк., 1975. – 248 с.
13. *Виглеб Г.* Датчики: Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
14. *Витенберг М.И.* Расчет электромагнитных реле. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 704 с.
15. *Витенберг М.И.* Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 723 с.

16. *Волсовский С.В.* Магнетизм. – М.: Наука, 1984. – 207 с.
17. *Вышков Ю.Д., Иванов В.И.* Магнитные опоры в автоматике. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.
18. *Ганзбург Л.Б., Федотов А.И.* Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1980. – 364 с.
19. *Глебов В.А.* Магнитно-транзисторные преобразователи напряжения для питания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1981.
20. *Глузман П.Л., Миловзоров В.П., Юдин В.В.* Устройства на основе управляемых магнитных элементов. – М.: Радио и связь, 1986. – 159 с.
21. *Головко Д.Б., Рего К.Г., Скрипник Ю.О.* Автоматика і автоматизація технологічних процесів. – К.: Либідь, 1997. – 232 с.
22. *Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П.* Справочник по физике. – Киев: Наукова думка, 1986. – 557 с.
23. *Еремеев И.С., Подлипенский В.С.* Магнитная техника автоматики и кибернетики. – К.: Наук. думка, 1970. – 408 с.
24. *Ешазарян Г.А., Стафеев В.И.* Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 89 с.
25. *Жеребцов И.П.* Электрические и магнитные цепи. – М.: Высш. шк., 1987.
26. *Задержей Г.П.* Многофункциональные магнитные радиокомпоненты. – М.: Сов. радио, 1980. – 136 с.
27. *Залманзон Л.А.* Беседы об автоматике и кибернетике. – М.: Наука, 1985. – 416 с.
28. *Злобин В.А. и др.* Изделия из ферритов и магнитодиэлектриков / Справочник. – М.: Сов. радио, 1972. – 240 с.
29. *Иванов Е.Л., Степанов И.М. и др.* Периферийные устройства ЭВМ и систем. – М.: Высшая школа, 1987. – 319 с.
30. Измерение электрических и неэлектрических величин / Под ред. Н.Н. Евтихеева. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
31. *Казаков Л.А.* Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1978. – 168 с.
32. *Казаков Л.А.* Электромагнитные устройства РЭА: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с.

33. *Келим Ю.М.* Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. – М.: Высшая школа, 1991. – 304 с.
34. *Козлов Г.Д.* Коммутация магнитного потока. – М.: Энергия, 1974. – 247 с.
35. *Козлов Г.Д.* Новые бесконтактные магнитные элементы. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 80 с.
36. *Колосов В.Г.* Импульсные магнитные элементы и устройства. Основы расчета и проектирования. – Л.: Энергия, 1976.
37. *Коновалов Л.И., Петелин Д.П.* Элементы и системы электроавтоматики. – М.: Высшая школа, 1985. – 216 с.
38. *Коц Б.Э.* Электромагниты постоянного тока с форсировкой. – М.: Энергия, 1973.
39. *Кочергин В.В.* Следящие системы с гистерезисными муфтами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 128 с.
40. *Кривошеин М.И.* Датчики-преобразователи на тороидальных ферритовых сердечниках. – К.: Техніка, 1972. – 104 с.
41. *Кротов А.А., Максимов М.К.* Магнитные элементы в судовых системах автоматики. – Л.: Судостроение, 1970. – 312 с.
42. *Лаврова А.Т.* Элементы автоматических приборных устройств. – М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.
43. *Любчик М.А.* Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
44. *Мартынов Е.П.* Бесконтактные переключающие устройства. – М.: Энергия, 1970. – 176 с.
45. *Масленников И.М., Содиева Ю.Н. и др.* Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами. – М.: Химия, 1986. – 336 с.
46. *Механизмы с магнитной записью. /Л.Б. Ганзбург, Н.П. Глуханов и др.* – Л.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
47. *Миловзоров В.П.* Электромагнитные устройства автоматики. – М.: Высш. шк., 1983. – 408 с.
48. *Миловзоров В.П.* Элементы информационных систем. – М.: Высш. шк., 1989. – 440 с.

49. *Миловзорова З.И.* Электромагнитная техника в задачах, упражнениях и расчетах. – М.: Высш. шк., 1975.
50. *Митюшкин К.Г.* Расчет и анализ магнитных гистерезисных элементов телемеханических устройств. – М.: Энергия, 1972. – 207 с.
51. *Михайлов В.С.* АСУ та САПР /Введення в спеціальність. – Вінниця: МНВП ІТІ, 1994. – 149 с.
52. *Мочалов В.Д.* Магнитная микроэлектроника. – М.: Сов. радио, 1977. – 366 с.
53. *Никитенко А.Г.* Автоматизированное проектирование электрических аппаратов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1983.
54. *Орлов Д.В.* Электромагниты с замедлением. – М.: Энергия, 1970. – 96 с.
55. *Пирогов А.И., Шамаев Ю.М.* Магнитные сердечники для устройств автоматики и вычислительной техники. – М.: Энергия, 1973. – 263 с.
56. *Подлипенский В.С.* Бесконтактные логические схемы автоматики (основы построения). – К.: Наук. думка, 1965. – 216 с.
57. *Подлипенский В.С. и др.* Электромагнитная техника: Лабораторные работы. – К.: Вища шк., Головное изд-во, 1974. – 223 с.
58. *Подлипенский В.С., Петренко В.Н.* Электромагнитные и электромашинные устройства автоматики. – К.: Высш. шк., 1987. – 592 с.
59. *Подлипенский В.С., Сабинин Ю.А., Юрчук Л.Ю.* Элементы и устройства автоматики. – Санкт-Петербург: Политехника, 1995. – 472 с.
60. *Поляков В.С., Бардаш И.Д. и др.* Справочник по муфтам. – Л.: Машиностроение, 1974. – 352 с.
61. Постоянные магниты: Справочник /А.Б. Альтман, А.Н. Герберг и др.; Под ред. Ю.М. Мятиня. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
62. *Преображенский А.А.* Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. шк., 1986. – 335 с.
63. *Преображенский А.А., Шамрай Б.В.* Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники – М.: высш. шк., 1982. – 264 с.
64. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А.Н. Горский и др. – М.: Радио и связь, 1988.

65. Розенблат М.А. Магнитные датчики – состояние и тенденция развития // Автоматика и телемеханика. – 1995. - №6. – с. 3-55.
66. Розенблат М.А. Магнитные датчики электрических и неэлектрических величин. Современное состояние и тенденция развития // Измерение, контроль, автоматизация. – 1980. - №9. – с. 10-17.
67. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – М.: Наука, 1974. – 768 с.
68. Розенблат М.А. Микротроника – новое направление развития датчиков и исполнительных устройств // Приборы и системы управления. – 1996. - №12. – с. 49-56.
69. Ройзен В.З. Электромагнитные малогабаритные реле. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 252 с.
70. Русин Ю.С. Расчет электромагнитных систем. – Л.: Энергия, 1968. – 132 с.
71. Рыжков В.А., Сергеев Н.П., Раков Б.М. Внешние запоминающие устройства на магнитном носителе. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
72. Савета Н.Н. Периферийные устройства ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
73. Селезнев Ю.М., Бабилов М.А. и др. Автоматический контроль магнитных параметров. – М.: Высш. шк., 1971. – 288 с.
74. Сиаккоу М. Физические основы записи информации. – М.: Связь, 1980. – 192 с.
75. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
76. Сливинская А.Г., Гордон А.В. Электромагниты со встроенными выпрямителями. – М.: Энергия, 1970. – 64 с.
77. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 567 с.
78. Справочник по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
79. Справочник по технике магнитной записи /Под ред. О.В. Порицкого, Е.Н. Травникова. – Киев: Техника, 1981. – 319 с.

80. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Коричного, В.В. Пасынкова и др. Т.3. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – Т. 3. – 728 с.
81. *Ступель Ф.А.* Электромеханические датчики и преобразователи электрических величин. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 116 с.
82. *Танатар А.И.* Элементы промышленной автоматики и их динамические свойства. – Киев: Техника, 1975. – 232 с.
83. Теоретические основы электротехники. Т.2. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля / Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высш. шк., 1976.
84. Техническая кибернетика. Кн. 2. Усилительные устройства, корректирующие элементы и устройства. – М.: Машиностроение, 1975. – 687 с.
85. Технические средства автоматики / В.В. Кишнев, В.А. Иванов и др. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
86. *Тищенко Н.М.* Проектирование магнитных и полупроводниковых элементов автоматики. – М.: Энергия, 1979. – 471 с.
87. Устройства управления электромагнитами / Г.В. Могилевский, Б.В. Клименко и др. – М.: Информэлектро, 1981. – 51 с.
88. *Харазов К.И.* Электромагнитные устройства авиационной электроавтоматики. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
89. *Харазов К.И.* Реле с магнитоуправляемыми контактами. – М.: Энергия, 1971. – 89 с.
90. *Харазов К.И., Трофимов В.И., Нецветаев Г.Ф.* Ферриды в устройствах автоматики. – М.: Энергоиздат, 1982. – 89 с.
91. *Хасаев О.И.* Транзисторные преобразователи напряжения и частоты. – М.: Наука, 1966. – 176 с.
92. *Хрущев В.В.* Электрические микромашины автоматических устройств. – Л.: Энергия, 1976. – 384 с.
93. *Шопен Л.В.* Бесконтактные электрические аппараты автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
94. *Щетинин Т.А.* Электромагнитные муфты скольжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
95. *Щучинский С.Х.* Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

Навчальне видання

ВАСЮРА А.С.

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕЛЕМЕНТИ
ТА ПРИСТРОЇ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ І АВТОМАТИКИ**

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕХАНІЗМИ І
ВИКОНАВЧІ ПРИСТРОЇ АВТОМАТИКИ**

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено автором

Редактор С.А. Малішевська

Підписано до друку *5.04.2001р*
Формат 29.7x42 ¼ Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний Ум. друк. арк. *7.68*
Тираж 75 прим.
Зам. № *2001-075*

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького державного технічного університету
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГНК, 9-й поверх
Тел. (0432) 44-01-59