

Міністерство освіти і науки України

**Співак В.М., Гуржий А.М.,
Нельга А.Т., Ітякін О.С.**

**ЗАГАЛЬНА
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
І ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОНІКИ**

Рекомендовано

**Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник
для учнів професійно-технічних училищ**

Київ, НМЦ МОНУ

2020

УДК 621.3
ББК 31.2+32.85
С 94

Гриф «Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для учнів професійно-технічних училищ», лист № від 2020 р.

Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник / Співак В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С.– Київ: КП, 2020. – 266 с., 155 рис., 10 табл., 17 бібл.

Навчальний посібник містить основні відомості зі загальної електротехніки і електроніки, а саме відомості з : постійного струму, електромагнетизму і електромагнітної індукції, однофазного і трифазного змінного струму, трансформаторів, асинхронних і синхронних електричних двигунів, машин постійного струму, електричних та магнітних елементів автоматики, електричних вимірювань та приладів, напівпровідникових приладів, випрямлячів змінного струму, електронних підсилювачів і генераторів коливальних, інтегральних мікросхем, розподілу і споживання електричної енергії та електробезпеки.

Посібник призначений для учнів професійно-технічних училищ спеціальностей 171 «Електроніка», 172 «Телекомунікації та радіотехніка» і 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за професіями 7241 «Електромонтер з ремонту та обслуговування електроустаткування», в яких електротехніка з основами електроніки є самостійною і спеціальною дисципліною, яка багаторазово використовується під час виконання професійних робіт.

Також може бути корисний здобувачам освіти споріднених спеціальностей та професій. Відповідає програмам підготовки здобувачів освіти, згідно вимог Державних стандартів України та програм професійно-технічної освіти ДСПТО 7241.В.09.90-2015 (професія: Електрослюсар (слюсар) черговий та з ремонту устаткування) і ДСПТО 7212.1D29014-2006 (професія — Електрогазозварник).

SBN

© Співак В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С.

Зміст	Стор.
Передмова	7
Вступ	9
1. Основи електростатики	11
1.1. Визначення і зображення електричного поля	11
1.2. Закон Кулона. Напруженість електричного поля	13
1. 3. Потенціал. Електрична напруга	14

1.4. Діелектрики у електричному полі. Поляризація діелектрика	17
1.5. Електроізоляційні матеріали	18
1.6. Електрична ємність. Плоский конденсатор	22
1.7. З'єднання конденсаторів. Енергія електричного поля ...	24
Контрольні запитання	26
2. Постійний струм та кола постійного струму	27
2.1. Електричне коло	27
2.2. Електричний струм	28
2.3. Електрорушійна сила і напруга	30
2.4. Закон Ома	32
2.5. Електричний опір провідність	34
2.6. Основні провідникові матеріали й провідникові вироби	37
2.7. Залежність опору від температури	39
2.8. Способи з'єднання опорів	40
2.9. Електрична робота і потужність перетворення електричної енергії в теплову	45
Контрольні запитання	48
3. Електромагнетизм	49
3.1. Характеристики магнітного поля	49
3.2. Магнітне поле прямолінійного струму	52
3.3. Намагнічування феромагнітних матеріалів	54
3.4. Розрахунок магнітного кола	55
3.5. Електрон у магнітному полі	59
3.6. Провідник зі струмом в магнітному полі. Взаємодія провідників зі струмом	60
3.7. Закон електромагнітної індукції	63
3.8. Електрорушійна сила індукції в контурі	64
3.9. Принцип Ленца	66
3.10. Перетворення механічної енергії в електричну	69
3.11. Перетворення електричної енергії в механічну	70
3.12. Потокозчеплення і індуктивність котушки	72
3.13. Електрорушійна сила самоіндукції. Енергія магнітного поля	75
Контрольні запитання	77
4. Змінний струм та кола змінного струму	78
4.1. Визначення, отримання і зображення змінного струму	78
4.2. Параметри змінного струму	80

Контрольні запитання	82
5. Трансформатори	84
5.1. Призначення трансформаторів та їх застосування	84
5.2. Будова трансформатора	85
5.3. Принцип дії однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації	88
5.4 Трифазні трансформатори	89
5.5. Автотрансформатори та вимірювальні трансформатори	91
5.6. Зварювальні трансформатори	94
Контрольні запитання	96
6. Електричні машини змінного і постійного струму	97
6.1. Обертове магнітне поле	97
6.2. Будова синхронного двигуна	101
6.3. Принцип дії асинхронного двигуна. Фізичні процеси, що відбуваються при розкручуванні ротора	104
6.4. Ковзання та частота обертання ротора	105
6.5. Обертальний момент асинхронного двигуна	108
6.6. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна	110
6.7. Коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності асинхронного двигуна	112
6.8. Однофазний асинхронний двигун	113
6.9. Синхронний генератор	115
6.10. Синхронний двигун	119
6.11. Будова електричних машин постійного струму	121
6.12. Принцип роботи машини постійного струму	124
Контрольні запитання	128
7. Електричні та магнітні елементи автоматики	129
7.1. Електромагнітне реле і магнітокеровані контакти	129
7.2. Схеми керування навантаженням в електричних колах	133
7.3. Твердотільне реле	137
Контрольні запитання	140
8. Електричні вимірювання та прилади	141
8.1. Сутність електричних вимірювань	141
8.2. Основні одиниці електричних та магнітних величин у міжнародній системі одиниць	141
8.3. Похідні та кратні одиниці	144
8.4. Основні методи електричних вимірювань. Похибки вимірювальних приладів	145

8.5. Класифікація електровимірювальних приладів. Умовні позначення на шкалі	148
8.6. Електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки	149
8.7. Прилади магнітоелектричної системи	152
8.8. Прилади електромагнітної системи	155
8.9. Прилади електродинамічної системи	156
8.10. Цифрові прилади	158
8.11. Вимірювання напруги, струму та потужності	160
8.12. Розширення меж вимірювання приладів безпосередньої оцінки	163
Контрольні запитання	165
9. Напівпровідникові прилади	167
9.1. Провідники, ізолятори та напівпровідники	167
9.2. Напівпровідникові діоди	170
9.3. Система позначення діодів	176
9.4. Біполярний транзистор	181
9.5. Польові транзистори	185
9.6. Тиристори	188
9.7. Області застосування транзисторів та тиристорів	192
Контрольні запитання	194
10. Випрямлячі змінного струму	195
10.1. Загальні відомості про випрямлячі	195
10.2. Однонапівперіодний випрямляч	196
10.3. Двонапівперіодний випрямляч	197
10.4. Випрямляч на тиристорі. Стабілізатор напруги	199
10.5. Фільтри, що згладжують. Випрямлення з помножувачем напруги	202
Контрольні запитання	206
11. Електронні підсилювачі	207
11.1. Загальні відомості	207
11.2. Зворотний зв'язок у підсилювачах	211
11.3. Схемні рішення підсилювальних каскадів	213
11.4. Операційні підсилювачі	218
11.4.1 Загальні відомості	218
11.4.2. Масштабні підсилювачі	221
11.4.3. Проблема дрейфу нуля і її вирішення	225
Контрольні запитання	226
12. Електронні генератори коливань	227

12.1. Загальні відомості	227
12.2. Транзисторний автогенератор типу LC	227
12.3. Транзисторний автогенератор типу RC	228
12.4. Генератори напруги, що змінюється лінійно	229
12.5. Мультивібратор	233
Контрольні запитання	235
13. Інтегральні мікросхеми	236
13.1. Загальні відомості	236
13.2. Гібридні інтегральні мікросхеми	237
13.3. Товстоплівкові мікросхеми	239
13.4. Тонкоплівкові мікросхеми	242
13.5. Фотолітографія	243
13.6. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми	244
13.7. Планарно-епітаксiальна технологія виготовлення ІМС	246
13.8. Елементи напівпровідникових мікросхем та їх з'єднання	249
13.9. Застосування інтегральних мікросхем	252
Контрольні запитання	252
14. Електропостачання і споживання електричної енергії. Основні відомості про електробезпеку	254
14.1. Електропостачання промислових підприємств	254
14.2. Падіння та втрата напруги у лініях електропостачання.....	255
14.3. Розрахунок дротів за допустимою втратою напруги у лініях постійного, однофазного та трифазного струму	256
14.4. Плавкі запобіжники	259
14.5. Дія електричного струму на організм людини. Визначення напруги дотику.....	260
Контрольні запитання	262
Список рекомендованої літератури	263

Передмова

Мета посібника – отримання студентами теоретичних знань з

двох взаємопов'язаних галузях науки і техніки: електротехніки та електроніки, для подальшого практичного використання їх в електронних пристроях різного призначення, системах автоматизації електричного устаткування та технологічних процесів. Таке об'єднання дозволяє глибше зрозуміти їх взаємозв'язок і більш компетентно використовувати досліджувані в електротехніці фізичні основи електромагнітних явищ і методи розрахунку електричних ланцюгів при аналізі і синтезі схем електроніки, в яких використовуються як лінійні, так і нелінійні електронні прилади, компоненти. Об'єднання двох дисциплін в одній дозволяє орієнтувати в рамках електротехніки матеріал на конкретне застосування тих завдань, які ставляться в рамках електроніки.

Процес вивчення дисципліни спрямований на формування наступних компетенцій, **знати**: поняття і визначення, що використовуються в рамках напрямку; фізичні основи і принципи роботи електротехнічних, електроенергетичних та електромеханічних пристроїв; методи розрахунку і аналізу лінійних ланцюгів змінного струму, електричних ланцюгів з нелінійними елементами, магнітних кіл; електромагнітних пристроїв і електричних машин; трансформаторів, машин постійного струму, асинхронних і синхронних машин; основи електроніки та електричних вимірювань, елементну базу сучасних пристроїв; джерела вторинного електроживлення; підсилювачі електричних сигналів, генераторні пристрої; основи цифрової електроніки; мікропроцесорні пристрої; електричні вимірювання та прилади; споживання електричної енергії та електробезпеки.

Дана дисципліна має як самостійне значення, так і є основою для ряду спеціальних дисциплін. Для освоєння дисципліни «Загальна електротехніка і основи електроніки» достатньо знань, умінь і компетенцій таких предметів як «Математика», «Фізика» та «Інформатика». Дисципліна «Загальна електротехніка і основи електроніки» необхідна для вивчення наступних дисциплін: схемотехніка, основи автоматики, радіоелектроніка, метрологія, стандартизація та сертифікація, безпека електроустановок та ін.

Посібник складено на основі вивчення багатьох підручників з цієї тематики, а також матеріалів лекцій дисциплін, пов'язаних з загальною електротехнікою і основами електроніки, включених у навчальний процес підготовки молодших спеціалістів, фахівців і здобувачів освіти як в Економічному коледжі (ЕК) Дніпровського державного технічного університету (ДДТУ), так і в ряді професійно-технічних училищ електротехнічного напрямку.

Користуючись нагодою, ми дякуємо рецензентів за цінні зауваження, які автори врахували при доопрацюванні рукопису.

Автори висловлюють щире подяку співробітникам кафедри «Електроніки» ДДТУ, особисто завідувачу кафедри, доктору технічних наук, професору Мещанінову С.К., який раптово и передчасно пішов із життя, за зауваження, що були висловлені при обговоренні змісту посібника, за доброзичливість при обговоренні окремих його розділів, критичні зауваження та постійну підтримку при роботі над рукописом.

Вступ

З електричними явищами люди були знайомі давно, але практичне використання їх почалося лише в кінці 19 століття, після створення Дж. К. Максвеллом класичної електродинаміки. Винахід радіо А.С. Поповим і Р. Марконі — одне з найважливіших застосувань принципів нової теорії. Вперше в історії людства наукові дослідження передували технічних застосувань. Якщо парова машина була побудована задовго до створення теорії теплоти (термодинаміки), то сконструювати електродвигун або здійснити радіозв'язок виявилось можливим лише після відкриття і вивчення законів електродинаміки. Тоді в Європі з'явилися перші електричні дзвінки, електричні праски і т. і.

Основоположником електротехніки вважають М.В.Ломоносова. Він створив першу лабораторію з вивчення електричних явищ, передбачив можливість передачі електричної енергії на відстань. Чимало відкриттів на рахунку наших співвітчизників, учених і інженерів. П.Н. Яблочков створив генератор змінного струму, трансформатор - М.О. Доливо – Добровольський.

Життя сучасного суспільства уявити собі без застосування пристроїв електричної енергії неможливо, а, приблизно 100 років тому, електротехніка тільки зароджувалася.

Дисципліна «Загальна електротехніка і основи електроніки» є базовою для вивчення тем, пов'язаних з електричними апаратами, електронними пристроями, електричними машинами. Електроніка — галузь науки і техніки, що пов'язана з створенням і описом фізичних принципів роботи нових електронних приладів і пристроїв або електронних схем на їх основі. Широке поширення в сучасній

промисловості та побуті електрична енергія отримала завдяки її перевагам перед іншими видами енергії.

А. С. Попов здійснив першу радіопередачу хвиль на відстань; А.Н. Лодигін винайшов першу електричну лампочку і т. д. У процесі вивчення електротехніки студенти познайомляться з роботами цих учених і багатьох інших. Важливу роль у відкритті законів і явищ електротехніки належать зарубіжним вченим: А. Амперу, Ш. Кулону, Р. Ому, Н. Теслі, Р. Кірхгофу і т. д., імена яких носять основні закони електротехніки та одиниці виміру головних електричних величин.

Запропонований в даному підручнику матеріал, відтворений конспектом лекцій, що викладаються в ЕК ДДТУ.

Для глибокого вивчення матеріалу теоретичні знання підтримуються рішеннями практичних завдань та виконанням лабораторних робіт.

Глава 1. Основи електростатики

1.1. Визначення і зображення електричного поля

Електричні властивості тіл пояснюються присутністю у них заряджених часток. Такі частки, як електрон і протон, мають рівні за абсолютним значенням заряди, при цьому заряд електрона негативний, заряд протона позитивний. Вказані частки разом з нейтронами входять у склад атомів речовини, однак вони можуть знаходитись і у вільному стані. Якщо тіло заряджене, то у ньому переважають позитивні або негативні заряди; якщо число тих і інших зарядів однакове, то тіло в електричному відношенні є ідеальним.

Тіла з однойменними зарядами відштовхуються, тіла з різнойменними зарядами притягаються. Електрично заряджене тіло нерозривно пов'язане з оточуючим його електричним полем, через яке і здійснюється взаємодія електрично заряджених тіл.

Електричне поле – одна з двох сторін електромагнітного поля, яка характеризується впливом на електрично заряджену частинку з силою, пропорційною заряду частки і не залежної від її швидкості.

З визначення електричного поля свідчить, що воно є силовим і векторним. Для виявлення і вивчення електричного поля використовуються пробні нерухомі точкові заряджені тіла з дуже малим позитивним зарядом q . Лінійні розміри точкових заряджених тіл дуже малі порівняно з відстанню до точок, у яких розглядається їх електричне поле. Через малість лінійних розмірів і значення заряду пробного тіла досліджуване електричне поле практично можна вважати неспотвореним.

У даній главі будуть розглянуті електростатичні поля, тобто такі, які створюються нерухомими зарядженими тілами. Для скорочення будемо називати їх просто електричними полями.

Розглянемо електричне поле відокремленого нерухомого точкового зарядженого тіла з зарядом Q (рис. 1.1, а), розташованого у довільній точці горизонтальної площини. Помістимо у точку A цієї площини пробне заряджене тіло з зарядом q . Оскільки сила відштовхування, яка діє на пробне заряджене тіло, лежить на лінії, яка з'єднує центри взаємодіючих заряджених тіл, пробне заряджене тіло буде переміщуватися у радіальному напрямку (так само, як і пробне заряджене тіло, яке поміщене у точку B). Поміщуючи пробне заряджене тіло у інші точки і продовжуючи це міркування, отримаємо картину, яка умовно зображає електричне поле за допомогою ліній, що називаються силовими (рис. 1.1, б). У приватному випадку відокремленого точкового зарядженого тіла силові лінії представляють собою прямі, що проходять через точку, у якій знаходиться це тіло. У загальному випадку вектор сили, з якою поле діє на пробне заряджене тіло у даній точці поля, співпадає з дотичною до силової лінії у цій точці.

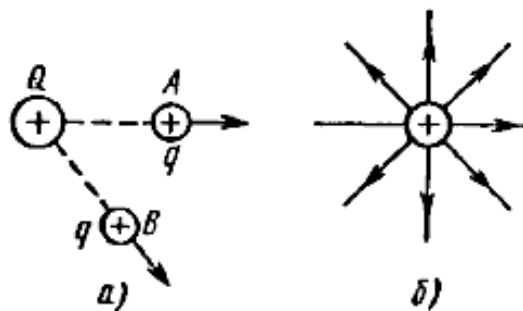


Рис. 1.1. Електричне поле відокремленого зарядженого тіла

1.2. Закон Кулона. Напруженість електричного поля

Взаємодія точкових заряджених тіл описується законом Кулона.

Сила взаємодії F між точковими зарядженими тілами Q і q , розташованими у даному середовищі на відстані R один від одного (рис. 1.2, а), прямо пропорційна добутку зарядів цих тіл і зворотно пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F = Qq/(4\pi\epsilon_r\epsilon_0R^2), \quad (1.1)$$

де Q і q – значення зарядів, Кл (1 Кл = $6,3 \cdot 10^{18}$ зарядів електрона); ϵ_r - відносна діелектрична проникність середовища, яка показує, у скільки разів сила взаємодії у даному середовищі менша чим у вакуумі (величина безрозмірна); $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична стала.

Введемо силову характеристику поля – напруженість:

$$E = F/q.$$

Напруженість електричного поля у даній точці визначається силою, яка діє на поміщене в цю точку пробне тіло, що володіє одиничним позитивним зарядом.

Одиниця напруженості:

$$[E] = \text{Н/Кл (Ньютон на Кулон)}.$$

Дія поля відокремленого точкового зарядженого тіла на основі закону Кулона:

$$E = Q/(4\pi\epsilon_r\epsilon_0R^2). \quad (1.2)$$

Розглянемо у якості прикладу електричне поле відокремленого точкового металевого шару з зарядом Q (рис. 1.2, б), де напруженість поля всередині металевого шару при статичному заряді дорівнює

нулю. Насправді, при наявності електричного поля у провідному середовищі електрони завдяки взаємному відштовхуванню придуть у рух і, відповідно, статичний стан встановиться тільки тоді, коли напруженість поля всередині шара стане рівною нулю. Таким чином, надлишковий електричний заряд розподілиться тільки на його поверхні.

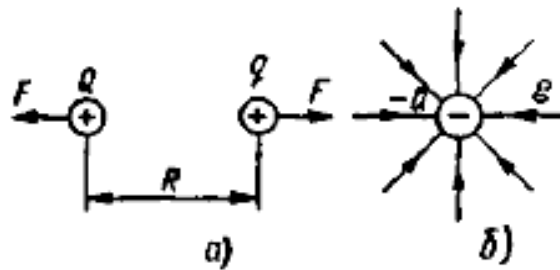


Рис. 1.2. Взаємодія двох однойменно заряджених тіл (а), електричне поле зарядженого шару (б)

Напруженість поля поза шаром і на його поверхні знаходять, вважаючи, що заряд Q – зосереджений у центрі шару.

1.3. Потенціал. Електрична напруга

Нехай відокремлене нерухоме точкове заряджене тіло з зарядом Q розташоване у довільній точці горизонтальної площини (рис. 1.3). Якщо у точці A опиниться пробне заряджене тіло з зарядом q , то під дією сили F_A воно стане переміщуватися. При цьому за рахунок енергії поля зарядів Q і q буде виконуватись певна робота. Оскільки сила $F_R = Qq/(4\pi\epsilon_r\epsilon_0R^2)$ безперервно змінюється, для знаходження роботи, яку здійснює поле, переміщуючи пробне заряджене тіло з

даної точки у нескінченність, розіб'ємо увесь шлях на елементарні ділянки так, що у межах кожної такої ділянки силу F_R можна вважати незмінною. Тоді елементарна робота цієї сили $\Delta A = F_R \Delta R$.

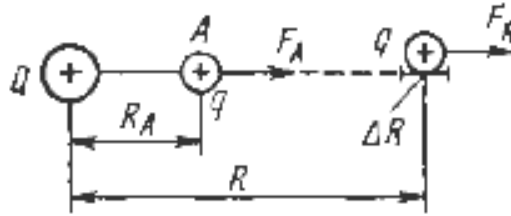


Рис. 1.3. До визначення потенціалу електричного поля

Для визначення всієї роботи A необхідно просумувати елементарні роботи ΔA на ділянці шляху від R_A до нескінченності. Тоді $A \approx \sum \Delta A = \sum F_R \Delta R$. Точне значення цієї роботи

$$A = \int_{R_A}^{\infty} F_R dR = Qq / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0 R_A)$$

Робота виражається у Джоулях (Дж).

Введемо енергетичну характеристику поля потенціал φ .

Потенціалом електричного поля заряду у даній точці називають величину, кількісно рівну роботі, яку здійснює поле, переміщаючи пробне тіло, що володіє одиничним позитивним зарядом з даної точки у нескінченність:

$$\varphi_A = A_A / q = Q / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0 R_A). \quad (1.3)$$

Одиниця потенціалу:

$$[\varphi] = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл} = 1 \text{ В.}$$

Одиниця напруженості поля:

$$[E] = \text{В/м (вольт на метр)}.$$

Визначивши потенціал електричного заряду Q у точках A і B (рис.1.4), знайдемо їх різницю, яку називають *електричною напругою* між двома точками поля:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B. \quad (1.4)$$

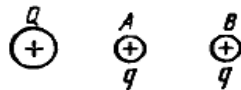


Рис. 1.4. До визначення різниці потенціалів електричного поля

Таким чином, електричною напругою або різницею потенціалів між двома точками поля називають величину, що кількісно дорівнює роботі, яку здійснює поле, переміщаючи між цими точками пробне тіло, яке володіє одиничним позитивним зарядом.

З'ясуємо, як змінюється потенціал точок всередині і поза металевих пластин.

На практиці часто доводиться мати діло з однорідним полем, у якого напруженість у всіх точках однакова. Таке поле виникає, наприклад, між двома рівномірно зарядженими металевими пластинами на достатньому керуванні від їх країв (рис. 1.5). При цьому електрична напруга однорідного поля:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = El. \quad (1.5)$$

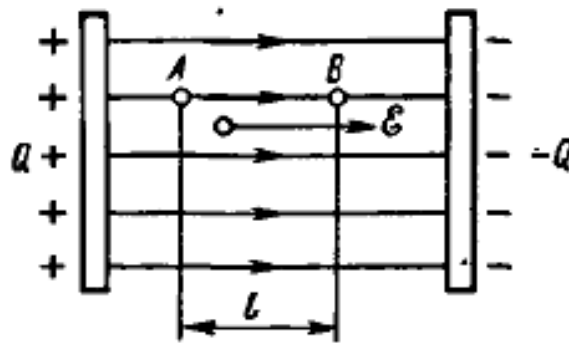


Рис. 1.5. Однорідне електричне поле

1.4. Діелектрики в електричному полі.

Поляризація діелектрика

Діелектрики характеризуються присутністю мізерного числа вільних електронів. Електрони діелектрика пов'язані в основному з позитивно зарядженим ядром і рухаються по деяких орбітах навколо нього.

Підвищуючи напруженість електричного поля, у якому розташований діелектрик, можна досягти такого стану, коли орбітальні електрони почнуть зриватися з орбіт полем, відбудеться місцеве руйнування діелектрика, або його пробій. Напруженість поля $E_{пр}$, при якій настає пробій діелектрика, називається *пробивною*.

Напруженість поля $E_{доп}$, яка допускається у діелектрика при його роботі в електропристроях, називається *допустимою*. Для надійної роботи електропристрою напруженість діелектрика повинна бути не вище допустимої. Значення $E_{доп}$ повинно бути у декілька разів нижче значення $E_{пр}$.

Необхідно помітити, що внутрішнє поле у діелектрика існує тільки при наявності зовнішнього поля і у багатьох випадках зникає при знятті останнього.

Однак є діелектрики, які, будучи поляризованими зовнішнім електричним полем, зберігають остаточну поляризацію, тобто внутрішнє поле залишається при зникненні зовнішнього (сегнетоелектрики та електрети). Відносна діелектрична проникність таких діелектриків сильно залежить від напруженості зовнішнього поля і, отже, не постійна, причому максимальне значення досягає декількох тисяч. Конденсатори із сегнетоелектриком застосовуються у пристроях автоматики. Електрети представляють собою джерела постійного електричного поля і використовуються у електричних вольтметрах, елементах електричної пам'яті, для світлового запису інформації на діелектричну плівку та інше.

1.5. Електроізоляційні матеріали

Електроізоляційними називаються матеріали, призначені для розподілу струмопровідних елементів, які знаходяться під різними потенціалами під час роботи електро- і радіоустановок. У якості електроізоляційних матеріалів використовуються газоподібні, рідкі та тверді діелектрики.

Особливу групу створюють матеріали, які твердіють: лаки, клеї, компаунди.

Газоподібні діелектрики. Найбільш розповсюдженим газоподібним діелектриком є повітря. Повітря ізолює дроти ЛЕП, оголені струмопровідні частини електро- і радіоапаратури та інше.

Достатньо широке поширення має елегаз – газоподібний діелектрик з пробивною напруженістю у 2,5 рази більшою, чим у повітря. Водень, азот, інертні гази також використовуються у якості газоподібних діелектриків.

Рідкі діелектрики. До таких діелектриків відносяться нафтові електроізолюючі маса та синтетичні рідкі діелектрики. Нафтові масла є продуктом перегонки нафти і представляють собою суміш різноманітних вуглеводнів. Найбільше розповсюдження у електротехніці знаходить трансформаторне масло. Воно використовується для заливки силових трансформаторів і заповнення баків високовольтних вимикачів. Конденсаторне масло застосовується для просочення паперової ізоляції у конденсаторах, кабельне масло для просочення паперової ізоляції кабелю. Синтетичні рідкі діелектрики найбільш широко представлені. Рідше застосовуються кремнійорганічні та фторорганічні рідкі діелектрики.

Тверді діелектрики. До цього класу діелектриків відносяться:

1) Діелектрики на основі волоконних органічних матеріалів. Це різноманітні електроізоляційні папери (конденсаторний, кабельний, телефонний та ін.), картон, фібра (тонкий папір, оброблений розчином хлористого цинку), природні (бавовняні тканини, натуральний шовк) і синтетичні (віскозний та ацетатний шовк), текстильні матеріали. Застосовуються також текстильні матеріали, що просочені електроізоляційними лаками (лакотканини).

2) Природні мінеральні матеріали (слюда, азбест). Слюда використовується у якості діелектрика у конденсаторах, а також для виготовлення міканіту – листового або рулонного матеріалу, склеєного з окремих пелюсток слюди за допомогою лаку або смоли, азбест – для ізоляції нагрівальних елементів, які працюють при високих температурах.

3) Пластмаси, які складаються з двох компонентів: сполучного та наповнювача. Сполучний компонент – це органічний полімер, який володіє здатністю деформуватися під тиском; наповнювач – порошкоподібна, волоконна або листовая речовина (кам'яне борошно, дрібна тирса, бавовняні, азбестові або скляні волокна). Поширений представник пластмас – гетинакс – шаруватий пластик, який отримується шляхом гарячого пресування паперу, просоченого бакелітом.

4) Еластомаси – матеріали, отримані на основі каучуку та близьких до нього за властивостями речовин. Широке застосування отримали гума та ебоніт.

5) Скло – неорганічні аморфні речовини на основі оксиду кремнію. Скло використовується для виготовлення ізоляторів, балонів електронних ламп та склотканин;

б) Кераміки. Найбільш поширеним є фарфор. Зокрема, у радіотехніці використовується радіофарфор.

Діелектрики, які твердіють. До них відносяться смоли, лаки, компаунди. До природніх смол відносяться шелак та каніфоль. Велике застосування мають синтетичні смоли (полістирол, поліетилен, полівінхлорид). Епоксидні смоли у чистому вигляді є

термопластичними матеріалами, розчиняються у різних розчинниках, можуть зберігатися довгий час, не змінюючи своїх властивостей. При додаванні певних фіксаторів епоксидні смоли досить швидко твердіють.

Компаунди представляють собою суміші смол, віскоподібних речовин та бітумів з різними додаванням. Параметри деяких ізоляційних матеріалів дані у табл. 1.1.

Електроізолюючі лаки застосовуються для просочування волоконної ізоляції, що призводить до збільшення пробивної напруги, зменшенню гігроскопічності, створенню ізолюючої плівки на поверхні предметів, які покривають лаком.

Таблиця 1.1. Параметри деяких ізоляційних матеріалів

Діелектрик	$E_{пр} \cdot 10^3$, В/см	ϵ_r	Діелектрик	$E_{пр} \cdot 10^3$, В/см	ϵ_r
Повітря	30	1,0	Полівініл-хлорид	325	3,2
Трансформаторне масло	50-180	2-2,5	Гума	150-200	3-6
Совол	150	5,3	Скло	100-150	6-10
Папір, просочений маслом	100-250	3,6	Слюда	500-1000	5,4
Гетинакс	100-150	4-7	Фарфор	150-200	5,5
Міканіт	150-400	5-6	Електрокартон	80-120	3-5

Ці термопластичні матеріали, які плавляться перед застосуванням. Розплавлені компаунди застосовуються для

отримання товстого прошарку при покритті, просочуванні обмотки трансформаторів та інше.

1.6. Електрична ємність. Плоский конденсатор

Потенціал металевого відокремленого тіла зі збільшення повідомленого йому заряду зростає. При цьому заряд Q і потенціал φ пов'язані між собою співвідношенням:

$$Q = C\varphi, \quad (1.6)$$

звідки:

$$C = Q/\varphi. \quad (1.7)$$

Тут C – коефіцієнт пропорційності або електрична ємність тіла.

Таким чином, електрична ємність C тіла визначає заряд, який потрібно передати тілу, щоб викликати підвищення його потенціалу на 1 В. Одиницею ємності, що виникає з формули (1.7), є Кулон на Вольт, або Фарада:

$$[C] = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В} = 1 \text{ Ф}.$$

На практиці користуються більш малими одиницями – мікрофарадою ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$) або пікофарадою ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

У техніці для отримання ємностей використовують конденсатори – пристрої, які складаються з двох металевих провідників, розділених діелектриком, і призначених для використання їх ємності. Умовне зображення конденсатора показано на рис. 1.6, а. Загалом, плоский конденсатор складається з двох паралельних пластин, відстань між якими мала порівняно з їх розмірами (рис. 1.6, б). При підключенні до джерела постійної

напруги відбувається зарядка конденсатора, вільні електрони пластини, з'єднаної з позитивним полюсом джерела, переходять через джерело на пластину, з'єднану з його негативним полюсом.

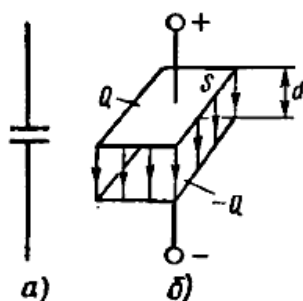


Рис. 1.6. Плоский конденсатор: а – умовне позначення;
б – конструкція

Цей процес закінчиться, коли різниця потенціалів між пластинами буде рівною напрузі між затискачами джерела. У результаті одна пластина конденсатора отримує заряд $+Q$, а друга $-Q$. При цьому заряд і напруга між пластинами пов'язані співвідношенням $Q = CU$, звідки:

$$C = Q/U. \quad (1.8)$$

Тут C – електрична ємність конденсатора.

Таким чином, електрична ємність конденсатора визначає заряд, який потрібно надати одній з його пластин, щоб викликати підвищення напруги між пластинами на 1 В.

Для знаходження заряду Q при заданій напрузі необхідно знати ємність конденсатора. У випадку плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 S/d, \quad (1.9)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність діелектрика, який роз'єднує пластини конденсатора; ε_0 - електрична стала; S - площа однієї пластини, m^2 ; d – відстань між пластинами, м.

Промисловість випускає конденсатори різної ємності - від 1 пФ до декількох тисяч мікрофарад на різні номінальні напруги (від одиниць вольт до сотень кіловольт), різного призначення та конструкції. За типом діелектрика конденсатори поділяються на паперові, слюдяні, керамічні та інші.

Конденсатори знаходять широке застосування у електротехніці та радіотехніці.

1.7. З'єднання конденсаторів. Енергія електричного поля

На практиці потрібну ємність отримують, прибігаючи до різних способів з'єднання стандартних конденсаторів.

Паралельне з'єднання. При паралельному з'єднанні конденсатора потенціал пластин, з'єднаних з позитивним полюсом джерела, однаковий та дорівнює потенціалу цього полюса (рис. 1.7). Відповідно потенціал пластин, з'єднаних з негативним полюсом, дорівнює потенціалу цього полюса. Отже, напруга, прикладена до конденсаторів, однакова. Загальний заряд $Q_{\text{заг}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$.

Так як, згідно з (1.8), що $Q = CU$, то $Q_{\text{заг}} = C_{\text{заг}}U$; $Q_1 = C_1U$; $Q_2 = C_2U$; $Q_3 = C_3U$ і $C_{\text{заг}}U = C_1U + C_2U + C_3U$. Таким чином, загальна або еквівалентна, ємність при паралельному з'єднанні конденсаторів дорівнює сумі ємностей окремих конденсаторів:

$$C_{\text{заг}} = C_1 + C_2 + C_3. \quad (1.10)$$

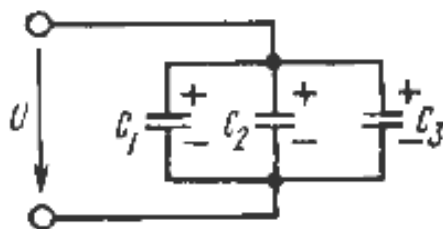


Рис. 1.7. Паралельне з'єднання конденсаторів

З формули (1.10) слід, що при паралельному з'єднанні однакових конденсаторів загальна ємність

$$C_{\text{заг}} = nC. \quad (1.11)$$

Послідовне з'єднання. При послідовному з'єднанні конденсаторів (рис. 1.8) на пластинах будуть однакові заряди.

На зовнішні електроди заряди поступають від джерела живлення. На внутрішніх електродах конденсаторів C_1 і C_3 утримується такий самий заряд, як і на зовнішніх. Але оскільки заряди на внутрішніх електродах отримані за рахунок розділення зарядів за допомогою електростатичної індукції, заряд конденсатора C_2 має таке саме значення.

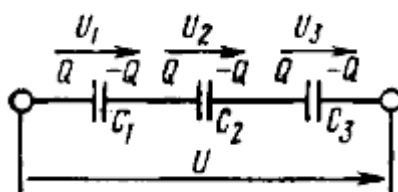


Рис. 1.8. Послідовне з'єднання конденсаторів

Знайдемо загальну ємність для цього випадку. Так як $U = U_1 + U_2 + U_3$, де $U = Q/C_{\text{заг}}$; $U_1 = Q/C_1$; $U_2 = Q/C_2$; $U_3 = Q/C_3$, то $Q/C_{\text{заг}} = Q/C_1 + Q/C_2 + Q/C_3$. Після скорочення, отримаємо

$$1/C_{\text{заг}} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3. \quad (1.12)$$

При послідовному з'єднанні двох конденсаторів, використовуючи (1.12), знайдемо:

$$C_{\text{заг}} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (1.13)$$

При послідовному з'єднанні однакових конденсаторів на основі (1.12) загальна ємність:

$$C_{\text{заг}} = n/C. \quad (1.14)$$

При зарядці конденсатора від джерела живлення енергія цього джерела перетворюється у енергію електричного поля конденсатора:

$$W_c = CU^2/2, \quad (1.15)$$

або з урахуванням того, що $Q = CU$:

$$W_c = QU/2. \quad (1.16)$$

Фізично накопичення енергії в електричному полі відбувається за рахунок поляризації молекул або атомів діелектрика.

При замиканні пластин конденсатора провідником відбувається розрядка конденсатора і у результаті енергія електричного поля перетворюється у теплову, яка виділяється при проходженні струму через провідник.

Контрольні запитання

1. Надайте визначення і зображення електричного поля.
2. Поясніть сутність закону Кулона.
3. Що таке напруженість електричного поля?
4. Що таке потенціал, електрична напруга?
5. Що таке електроізоляційні матеріали?
6. Що таке електрична ємність? Плоский конденсатор.

Глава 2. Постійний струм та кола постійного струму

2.1. Електричне коло

Електричним колом називають сукупність приладів, призначених для отримання, передачі, перетворення і використання електричної енергії.

Електричне коло складається з окремих приладів – елементів електричного кола.

Джерелами електричної енергії є електричні генератори, у яких механічна енергія перетворюється у електричну, а також первинні елементи і акумулятори, у яких відбувається перетворення хімічної, теплової, світлової та інших видів енергії у електричну.

До споживачів електричної енергії відносяться електродвигуни, різноманітні нагрівальні прилади, світлові прилади та інше. Всі споживачі електричної енергії прийнято характеризувати деякими параметрами.

Параметри визначають властивості елементів споживати енергію з електричного кола і перетворювати її у інші види енергії (незворотні процеси), а також створювати особисті електричні або магнітні поля, у яких енергія може накопичуватися і при певних умовах повертатися в електричне коло. Елементи електричного кола постійного струму задаються тільки одним параметром – опором. Опір визначає властивість елемента поглинати енергію електричного кола і перетворювати її у інші види енергії.

Передавальні елементи кола пов'язують джерела і приймачі. Окрім електричних дротів у цю ланку можуть входити апарати для

увімкнення і вимкнення кола, прилади для вимірювання електричних параметрів (амперметри, вольтметри), пристрої захисту (запобіжники), перетворювальні пристрої (трансформатори) та інше.

Будь-яке електричне коло характеризується струмом, електрорушійною силою і напругою.

2.2. Електричний струм

Явище спрямованого руху носіїв заряду, що супроводжується магнітним полем, називають повним електричним струмом.

Повний електричний струм прийнято розділяти на наступні основні види: струм провідності, струм перенесення і струм зміщення.

Електричним струмом провідності називають явище спрямованого руху вільних носіїв електричного заряду в речовині або вакуумі.

Електричний струм, обумовлений спрямованим впорядкованим рухом електронів, має місце в провідниках першого роду (металах), електронних і напівпровідникових приборах. В провідниках другого роду - електролітах (водні розчини солей, кислот) - електричний струм обумовлений рухом позитивних і негативних іонів, впорядковано переміщаються під дією прикладеного поля.

Електричним струмом перенесення називають явище переносу електричних зарядів зарядженими частинками або тілами, що рухаються у вільному просторі. Основним видом електричного струму перенесення є рух в порожнечі елементарних частинок, що

володіють зарядом (рух вільних електронів в електронних лампах), рух вільних іонів в газорозрядних приладах.

Електричним струмом зміщення (струмом поляризації) називають впорядкований рух пов'язаних носіїв електричних зарядів. Цей вид струму можна спостерігати в діелектриках.

У цьому розділі буде розглянуто струм провідності.

У більшості випадків причиною упорядкованого руху електричних зарядів є електричне поле. При відсутності електричного поля вільні електричні заряди роблять тепловий безладний рух, в результаті чого кількість електрики, що проходить через будь-який перетин провідника, в середньому дорівнює нулю.

Для кількісної оцінки електричного струму служить величина, яка називається силою струму.

Сила струму кількісно дорівнює кількості електрики, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$i = \Delta q / \Delta t \quad (2.1)$$

Таким чином, сила струму характеризує витрата електрики в одиницю часу через даний перетин електричного кола. Надалі, поряд з терміном «сила струму» будемо застосовувати термін «струм». Очевидно, що струм визначається як впорядкованою швидкістю носіїв заряду (наприклад, електронів), так і їх щільністю. Одиницею сили струму є ампер (А).

Сила струму дорівнює 1 А, якщо через поперечний переріз провідника за 1 с проходить електричний заряд в 1 Кл:

$$[I] = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ с} = 1 \text{ А}. \quad (2.2)$$

Струм, що незмінний у часі за значенням і напрямком, називають постійним:

$$I = q/t \quad (2.3)$$

За позитивний напрямок струму беруть напрямок, в якому переміщаються позитивні заряди, тобто напрям, протилежний руху електронів. Поряд з силою струму важливе значення має щільність струму J , що рівна кількості електрики, що проходить за 1 с через одиницю струму перпендикулярного перетину провідника. В однорідному провіднику струм рівномірно розподіляється по перетину, так що:

$$J = I/S. \quad (2.4)$$

Щільність струму дозволяє охарактеризувати провідник з точки зору здатності витримувати те чи інше навантаження.

2.3. Електрорушійна сила і напруга

Розглянемо найпростіше електричне коло (рис. 2.1) з джерелом електричної енергії E і споживачем R . Припустимо, що в джерелі перетворюється будь-який вид енергій в електричну. Це відбувається за рахунок так званих сторонніх (неелектричних) сил, які виробляють всередині джерела поділ зарядів. Якщо коло виявляється замкнутим через споживача, то розділені заряди під дією виниклого електричного поля прагнуть об'єднатися. Внаслідок руху зарядів в ланцюзі виникає струм і в споживачі витрачається енергія, запасена джерелом. Для кількісної оцінки зазначених енергетичних

перетворень у джерелі служить величина, яка називається електрорушійною силою (ЕРС).

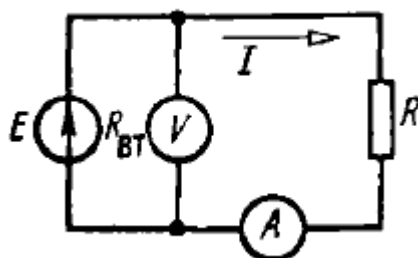


Рис. 2.1. Схема найпростішого електричного кола

ЕРС E кількісно дорівнює роботі, яку здійснюють сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду всередині джерела або саме джерело, проводячи одиничний позитивний заряд по замкнутому ланцюзі.

Одиницею ЕРС є Вольт (В). Таким чином, ЕРС дорівнює 1 В, якщо при переміщенні заряду в 1 Кл по замкнутому ланцюзі відбувається робота в 1 Дж:

$$[E] = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл} = 1 \text{ В} \quad (2.5)$$

Переміщення зарядів по ділянці кола супроводжується витратою енергії.

Величину, кількісно рівну роботі, яку здійснює джерело, проводячи одиничний позитивний заряд по даній ділянці кола, називають *напругою* U . Так як коло складається з зовнішнього і внутрішнього ділянок, розмежовують поняття напруги на зовнішньому $U_{\text{зов}}$ і внутрішньому $U_{\text{вн}}$ ділянках.

З визначень очевидно, що ЕРС джерела дорівнює сумі напруг на зовнішній і внутрішній ділянках кола:

$$E = U_{\text{зоб}} + U_{\text{вн}} \quad (2.6)$$

Ця формула виражає закон збереження енергії для електричного кола.

Виміряти напруги на різних ділянках кола можна тільки при замкнутому ланцюзі. ЕРС вимірюють між затичками джерела при розімкнутому колі.

2.4. Закон Ома

Розглянемо ділянку кола довжиною l і площею поперечного перерізу S (рис. 2.2.).

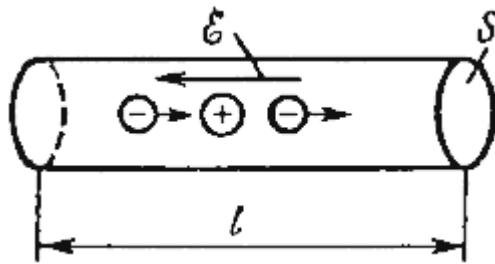


Рис. 2.2. Ділянка електричного кола у вигляді металевого провідника

Нехай провідник знаходиться в однорідному електричному полі напруженістю $E = U/l$. Під дією цього поля вільні електрони провідника здійснюють прискорений рух в напрямку, протилежному вектору E . Рух електронів відбувається до тих пір, поки вони не зіткнуться з іонами кристалічної решітки провідника.

При цьому швидкість електронів падає до нуля, після чого процес прискорення електронів повторюється знову. Так як рух електронів рівноприскорений, то їх середня швидкість:

$$v_{\text{сер}} = v_{\text{max}}/2, \quad (2.7)$$

де v_{max} – максимальна швидкість електронів перед зіткненням з іонами.

Очевидно, що швидкість v_{max} прямо пропорційна напруженості поля E ; отже, і середня швидкість пропорційна E . Але струм і щільність струму визначаються швидкістю руху електронів провіднику.

Таким чином:

$$J = \gamma E. \quad (2.8)$$

Цей вислів є диференційною формулою закону Ома.

Коефіцієнт пропорційності γ називають питомою електричною провідністю. Він залежить від матеріалу провідника і при даній температурі є сталою величиною.

Перетворимо вираз (2.8). Так як $J = I/S$, $= U/l$, а $\gamma = 1/p$ (p – питомий опір), то $I/S = (1/p)(U/l)$ звідки:

$$I = \frac{U}{pl/S}.$$

Ввівши поняття опору провідника через співвідношення $pl/S = R$ (R – опір провідника), остаточно отримаємо:

$$I = U/R. \quad (2.9)$$

Вираз (2.9) є законом Ома для ділянки кола: сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі, що додається до цієї ділянки.

Наведені міркування справедливі за умови, що γ , а отже, і R – постійні величини, тобто для лінійного кола, який характеризується залежністю $I = (1/R)U$, струм лінійно залежить від напруги. Звідси

впливає важливий висновок: закон Ома справедливий для лінійних кіл ($R = \text{const}$).

Розглянемо повне коло (рис. 2.3).

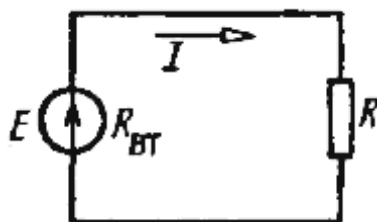


Рис. 2.3. До виводу закону Ома для всього кола

Згідно закону Ома для ділянки кола $U = IR$, $U_{\text{вн}} = IR_{\text{вн}}$. Тоді у відповідності з (2.6) $E = IR + IR_{\text{вн}}$. Звідси:

$$I = E / (R + R_{\text{вн}}). \quad (2.10)$$

Вираз (2.10) є законом Ома для всього кола: сила струму в колі прямо пропорційна ЕРС джерела.

З виразу $E = U + U_{\text{вн}}$ слід, що $U = E - IR_{\text{вн}}$, тобто при наявності струму в ланцюзі напруги на її затисках менше ЕРС джерела на значення падіння напруги на внутрішньому опорі джерела.

2.5. Електричний опір і провідність

При наявності електричного струму в провідниках, де рухаються вільні електрони, стикаючись з іонами кристалічної решітки, відчувають протидію своєму руху. Ця протидія кількісно оцінюється опором кола. Згідно із законом Ома для ділянки кола $I = U/R$, звідки $R = U/I$. За одиницю опору прийнято опір такої ділянки кола, в якій встановлюється струм в 1 А при напрузі в 1 В:

$$[R] = 1 \text{ В} / 1 \text{ А} = 1 \text{ Ом}. \quad (2.11)$$

Більшими одиницями опору є кілоом (кОм): $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$; мегаОм (МОм): $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$.

У п. 2.4 була отримана формула, що виражає залежність опору R від геометрії і властивостей матеріалу провідника:

$$R = \rho l / S. \quad (2.12)$$

Перетворивши формулу (2.12), отримаємо $\rho = RS / l$.

За визначенням, питомий опір ρ чисельно дорівнює опору провідника довжиною 1 м, площею поперечного перерізу 1 м^2 при температурі $20 \text{ }^\circ\text{С}$.

Одиниця питомого опору - Ом·м. Значення ρ для металів при такій одиниці дуже мале. Тому для зручності розрахунків поперечний переріз провідника беруть в квадратних міліметрах. Тоді одиницею ρ буде Ом·мм²/м. Значення питомих опорів деяких матеріалів наведені в табл. 2.1.

При розрахунку електричних кіл іноді зручніше користуватися не опором, а величиною, зворотною опору, тобто електричною провідністю:

$$g = 1/R = \gamma / Sl = I/U, \quad (2.13)$$

Одиницею електричної провідності є Сіменс (См):

$$[g] = 1/1 \text{ Ом} = 1 \text{ См}. \quad (2.14)$$

Таблиця 2.1. Питомі опори деяких матеріалів

Матеріал	Питомий електричний опір ρ при температурі 20°C. $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$	Середнє значення температурного коефіцієнту опору α у діапазоні зміни температури 0 - 100 °C, $1/^\circ\text{C}$
Мідь	0,0175	0,004
Алюміній	0,029	0,004
Вольфрам	0,056	0,00464
Латунь	0,07-0,08	0,002
Сталь	0,13-0,25	0,006
Константан	0,4-0,51	0,000005
Манганін	0,42	0,000006
Ніхром	1,1	0,00015
Хромель	1,3	0,00004

Елементи електричного кола, які характеризуються опором R , називають резистивним (рис. 2.4, 2.5).



Рис 2.4. Зовнішній вигляд резистора

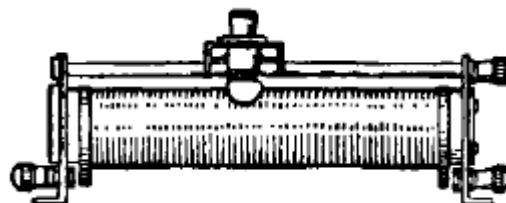


Рис 2.5. Зовнішній вигляд реостату

Вони можуть бути дротяними і недротяними. Дротяні резистори й реостати виготовляють з матеріалів з великим питомим опором.

Реостат забезпечує отримання змінного опору, значення якого регулюється зміною положення рухомого контакту реостата.

2.6. Основні провідникові матеріали й провідникові вироби

Провідникові матеріали підрозділяють на дві групи. До першої групи відносять матеріали з низьким питомим опором. Вони застосовуються для виготовлення дротів і струмопровідних ділянок різних електро- і радіотехнічних пристроїв. Найменший питомий опір мають срібло і золото, проте вартість цих провідникових матеріалів дуже висока. У зв'язку з цим вони використовуються для відповідальних контактних з'єднань, в техніці НВЧ і таке інше, якщо неможливо застосувати інші матеріали.

Найпоширенішими провідниковими матеріалами є мідь і алюміній. Мідь має низький питомий опір (майже в два рази менший, ніж у алюмінію; див. табл. 2.1), хороші механічні властивості. Вона використовується для виготовлення силових кабелів і шин обмотувальних і монтажних дротів і контактних з'єднань.

Алюміній поступається міді за своїми електричними і механічними властивостями. Однак він характеризується низькою вартістю і набагато меншою щільністю, ніж у міді. У зв'язку з цим алюміній є основним матеріалом для виготовлення дротів повітряних ЛЕП.

До другої групи належать матеріали з високим питомим опором. Манганін (сплав міді, марганцю і нікелю) має дуже малий коефіцієнт електричного опору, використовується для виготовлення еталонів,

магазинів опорів, шунтів, додаткових резисторів до вимірювальних приладів.

Фехраль (сплав заліза, хрому і алюмінію) і константан (сплав міді та нікелю) застосовуються в основному для виготовлення резисторів, ніхром (сплав нікелю і хрому з додаванням марганцю) - для виготовлення елементів нагрівальних приборів.

Варто окремо зупинитися на надпровідниках. Це матеріали, у яких можливий перехід в надпровідний стан. До них відносяться чисті метали, сплави, металеві з'єднання, деякі діелектричні матеріали. Можливості практичного використання надпровідності визначаються температурою переходу в надпровідний стан $T_{кр}$ (близької до температури абсолютного нуля) і критичною напруженістю магнітного поля $H_{кр}$. Основні труднощі в розробці надпровідників – значно висока $T_{кр}$.

Області застосування надпровідників весь час розширюються. Це хвилеводи, електричні машини і трансформатори з високим ККД, обмотки електромагнітів в прискорювачах елементарних частинок і так далі.

Провідникові (кабельні) вироби можна поділити на обмотувальні, монтажні та установчі дроти, а також на кабелі.

Обмотувальні дроти застосовуються для виготовлення обмоток електричних машин і приладів. Їх випускають з жилами з провідникової міді, провідникового алюмінію і сплавів з великим питомим опором (манганін, ніхром).

Монтажні дроти та кабелі призначаються для різного роду з'єднань в електричних апаратах, приладах та інших

електропристроях. Жили цих дротів виконуються лудженими з провідникової міді.

2.7. Залежність опору від температури

З підвищенням температури провідника збільшується амплітуда коливального руху іонів у вузлах кристалічної решітки. Це призводить до зростання числа зіткнень вільних електронів з іонами, а отже, до зменшення середньої швидкості направленого руху електронів, а значить, і питомої електричної провідності, що відповідає збільшенню опору провідника. Подібне явище характерне для металів. У провідниках другого роду (наприклад, електролітах) при підвищенні температури зростає число вільних електронів та іонів в одиниці об'єму провідника і опір провідника зменшується. До таких провідникам відносяться вугілля і графіт.

Існують сплави металів (наприклад, манганін), опір яких майже не залежить від температури. Для кількісної оцінки залежності опору металів від температури служить температурний коефіцієнт опору α .

Температурний коефіцієнт опору визначає відносне змінювання опору при зміні температури на $1\text{ }^\circ\text{C}$.

При незначних змінах температури ($0 - 100^\circ\text{C}$) значення α для більшості металів сталі: $\alpha \approx 0,004\text{ }1/^\circ\text{C}$.

Позначивши R_1 та R_2 опору при температурах, відповідно θ_1 і θ_2 , за визначенням α отримаємо:

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1(\theta_2 - \theta_1)} = \alpha.$$

Перетворимо цей вираз щодо R_2 :

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (\theta_2 - \theta_1) = R_1 [1 + \alpha (\theta_2 - \theta_1)]. \quad (2.15)$$

З (2.15) слідує, що $\theta_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \alpha} + \theta_1$.

2.8. Способи з'єднання опорів

При розрахунку кіл доводиться стикатися з різними схемами з'єднань споживачів. У разі кола з одним джерелом часто виходить змішане з'єднання, що є комбінацією паралельного і послідовного з'єднань, відомих з курсу фізики. Завдання розрахунку такого кола полягає в тому, щоб визначити струми і напруги окремих її ділянок.

З'єднання, при якому по всім ділянкам проходить один й той самий струм, називають послідовним. Будь-який замкнутий шлях, який проходить по кількох ділянках, називається контуром електричного кола. Наприклад, коло, показаний на рис. 2.3, є одноконтурним.

Ділянка кола, уздовж якого проходить один і той самий струм, називають гілкою, а місце з'єднання трьох та більше числа гілок – вузлом.

На рис. 2.6 показана ділянка кола, що складається з шести гілок і трьох вузлів.

З'єднання, при якому всі ділянки кола приєднуються до однієї пари вузлів, тобто знаходяться під дією одного і того ж напруги, називають паралельним.

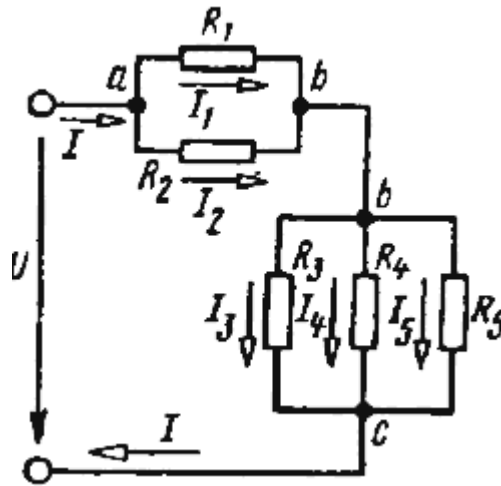


Рис. 2.6. Змішане з'єднання опорів

Розглянемо деякі способи з'єднання опорів докладніше.

Паралельне з'єднання. Схема на рис. 2.6 представляє собою послідовне з'єднання ділянок кола ab і bc . У свою чергу, ці ділянки являють собою паралельне з'єднання опорів. З'ясуємо властивості такого з'єднання опорів.

I. Розглянемо співвідношення струмів, наприклад, для вузла a кола. Очевидно, що струм, що приходить до вузла, дорівнює струму, який йде від вузла: $I - I_1 - I_2 = 0$. У загальному випадку:

$$\sum I = 0. \quad (2.16)$$

Це рівняння відображає перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів для будь-якого вузла електричного кола дорівнює нулю.

Перший закон Кірхгофа є наслідком закону збереження заряду, згідно з яким у вузлі заряд одного знаку не може ні накопичуватися, ні спадати.

При складанні рівняння для будь-якого вузла кола необхідно мати на увазі, що струми, спрямовані до вузла, домовилися брати зі знаком плюс, а струми, спрямовані від вузла, - зі знаком мінус.

II. При паралельному з'єднанні всі гілки одним полюсом приєднують до одного вузла, а іншим - до іншого. Так як потенціали цих вузлів фіксовані, то і різниця їх фіксована і однакова для всіх гілок, що входять у з'єднання.

Стосовно до схеми рис. 2.6 отримаємо $U_1 = U_2 = U_{ab}$, $U_5 = U_4 = U_3 = U_{bc}$, тобто при паралельному з'єднанні опорів напруга на гілках однакова.

III. Застосуємо закон Ома для всіх гілок паралельного розгалуження на ділянці bc . Тоді $U_{bc} = I_3 R_3 = I_4 R_4 = I_5 R_5$, звідки:

$$I_3/I_4 = R_4/R_3 \text{ і } I_3/I_5 = R_5/R_3. \quad (2.17)$$

Таким чином, при паралельному з'єднанні струми гілок обернено пропорційні їх опорам.

Знайдемо еквівалентний опір при паралельному з'єднанні гілок, підключених до вузлів b і c (рис. 2.6).

Відповідно до першого закону Кірхгофа, для вузла b справедлива рівність:

$$I = I_3 + I_4 + I_5. \quad (2.17 \text{ а})$$

Разом з тим відповідно до закону Ома і умові еквівалентності можна записати $I_3 = U_{bc}/R_3$, $I_4 = U_{bc}/R_4$, $I_5 = U_{bc}/R_5$, $I = U_{bc}/R_{\text{ек}}$. Підставляючи ці вирази у (2.17 а), отримаємо $U_{bc}/R_{\text{ек}} = U_{bc}/R_3 + U_{bc}/R_4 + U_{bc}/R_5$, звідки:

$$1/R_{\text{ек}} = 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5. \quad (2.18)$$

Переходячи від опорів ділянок до їх провідностей, визначимо:

$$g_{ек} = g_3 + g_4 + g_5. \quad (2.19)$$

У загальному вигляді:

$$g_{ек} = \sum g.$$

При паралельному з'єднанні еквівалентна або загальна провідність дорівнює сумі провідності всіх паралельних гілок.

Певний інтерес для практики представляють два окремих випадки:

- 1) з'єднання складається з двох гілок з різними опорами;
- 2) з'єднання складається з n гілок з однаковими опорами. У першому випадку, застосовуючи формулу (2.18), знайдемо:

$$R_{ек} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2), \quad (2.20)$$

У другому випадку:

$$R_{ек} = R/n. \quad (2.21)$$

Послідовне з'єднання. Як вказувалося, схема рис. 2.6 представляє собою послідовне з'єднання ділянок коло ab і bc . Цю схему можна представити так, як показано на рис. 2.7, де R_{ab} - опір, еквівалентну опору ділянки ab ; R_{bc} - опір, еквівалентну опору ділянки bc . Отримана схема являє собою послідовне з'єднання опорів. Розглянемо властивості послідовного з'єднання опорів.

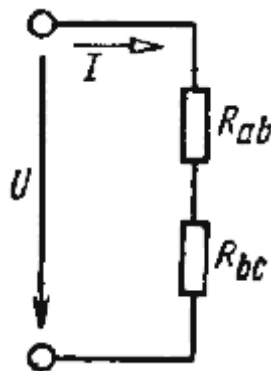


Рис. 2.7. Послідовне з'єднання опорів

I. Струм в будь-якому перетині послідовного кола однаковий. Це пояснюється тим, що ні в одній точці такого кола не може відбуватися накопичення зарядів.

II. Відповідно до закону збереження енергії, напруга на затискачах кола дорівнює сумі напруги на всіх її ділянках: $U = U_{ab} + U_{bc}$. У загальному вигляді:

$$U = \sum U. \quad (2.22)$$

III. Відповідно до закону Ома для ділянки кола можна записати $U_{ab} = IR_{ab}$, $U_{bc} = IR_{bc}$.

Поділивши наведені рівності одне на інше, отримаємо $U_{ab}/U_{bc} = R_{ab}/R_{bc}$, тобто напруги на ділянках кола при послідовному з'єднанні прямо пропорційні опорам цих ділянок.

З цієї дуже важливої властивості випливають умови перерозподілу напружень на ділянках кола при зміні опорів цих ділянок.

IV. У загальному випадку, якщо є n послідовно з'єднаних опорів, згідно з другої властивості, $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$. Тоді $IR_{ек} = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$, або скоротивши на I ,

$$R_{ек} = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (2.23)$$

У загальному випадку $R_{ек} = \sum R$.

Змішане з'єднання. Змішане з'єднання являє собою комбінацію паралельного і послідовного з'єднань опорів. Визначимо за схемою рис. 2.6 струми і напруги на всіх ділянках кола. Нехай напруга на затискачах кола U і опору її ділянок задані.

Еквівалентний опір кола $R_{ек} = R_{ab} + R_{bc}$, де $R_{ab} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$; $1/R_{bc} = 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5$.

Загальний струм джерела $I = U/R_{\text{ек}}$, напруга на ділянках ab і bc
 $U_{ab} = IR_{ab}$; $U_{bc} = IR_{bc}$.

Струм в відповідних гілках: $I_1 = U_{ab}/R_1$, $I_1 = U_{ab}/R_2$, $I_3 = U_{bc}/R_3$, $I_4 = U_{bc}/R_4$, $I_5 = U_{bc}/R_5$.

2.9. Електричні робота і потужність перетворення електричної енергії в теплову

Якщо електричне коло замкнути, то в ньому виникне електричний струм. При цьому енергія джерела витратиться. Знайдемо роботу, яку здійснює джерело струму для переміщення заряду q по всьому замкненому колу. Виходячи з визначення ЕРС отримаємо:

$$W_{\text{н}} = Eq. \quad (2.24)$$

Але так як $q = It$, $E = U + U_{\text{вн}}$, то $W_{\text{н}} = (U + U_{\text{вн}}) \times It$, або $W_{\text{н}} = UIt + U_{\text{вн}}It$, де $UIt = W$ - робота, що здійснюються джерелом джерела.

Використовуючи закон Ома для ділянки кола, можна записати:

$$W = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (2.25)$$

Величину, яка характеризується швидкістю, з якою відбувається робота, називають потужністю:

$$P = W/t. \quad (2.26)$$

Відповідно потужність, що віддається джерелом,

$$P_{\text{н}} = EIt/t = EI. \quad (2.27)$$

Потужність споживачів:

$$P = UIt/t = UI = I^2R = U^2/R. \quad (2.28)$$

Потужність втрат енергії всередині джерела:

$$P_{\text{вн}} = U_{\text{вн}}I = I^2R_{\text{вн}} = U_{\text{вн}}^2/R_{\text{вн}}. \quad (2.29)$$

Одиниця потужності - Ват (Вт):

$$[P] = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт}. \quad (2.30)$$

Таким чином, потужність дорівнює 1 Вт, якщо за 1 с здійснюється робота в 1 Дж.

Електрична робота виражається в Джоулях, але згідно з формулою $P = W/t$ маємо $W = Pt$, звідки:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (2.31)$$

На практиці користуються такими одиницями роботи, як кіловат-година (кВт-год): $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Вт} \cdot \text{с}$.

Коли в ланцюзі з опором R існує струм, електрони, переміщаючись під дією поля, стикаються з іонами кристалічної решітки провідника. При цьому кінетична енергія електронів передається іонам, що призводить до збільшення амплітуди коливального руху іонів, і, отже, до нагрівання провідника. Кількість теплоти, виділеної в провіднику:

$$Q = I^2Rt. \quad (2.32)$$

Наведена залежність носить назву закону Ленца - Джоуля: кількість теплоти, що виділяється при проходженні струму в провіднику, пропорційна квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму. Перетворення електричної енергії в теплову має велике практичне значення і широко використовується в різних нагрівальних приладах як у промисловості, так і в побуті. Однак часто теплові втрати є небажаними, так як вони викликають

непродуктивні витрати енергії, наприклад в електричних машинах, трансформаторах та інших пристроях, що знижує їх ККД.

Для захисту кола від перевантажень служать плавкі запобіжники (вставки), які при певному струмі плавляться, розриваючи електричне коло.

Схема включення запобіжника показана на рис. 2.8.

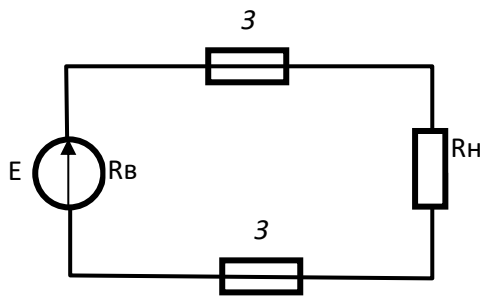


Рис. 2.8. Схема кола з захистом від короткого замикання

Під номінальним розуміють такий режим роботи, при якому напруга, струм і потужність в елементах електричного кола відповідають тим значенням, на які вони розраховані заводом-виробником. При цьому гарантуються найкращі умови роботи (економічність, довговічність).

Крім номінального режиму роботи джерела існують режими *короткого замикання* і *холостого ходу*. Режимом короткого замикання називають режим, при якому напруга на зовнішніх затискачах джерела дорівнює нулю.

Режимом холостого ходу джерела називають режим, при якому струм в ньому дорівнює нулю.

Контрольні запитання

1. Надайте визначення постійного струму та кола постійного струму.
2. Надайте визначення електричного струму.
3. Що таке електрорушійна сила і напруга?
4. Навести закон Ома.
5. Що таке електричний опір і провідність?
6. Довести про основні провідникові матеріали й провідникові вироби.
7. Що таке залежність опору від температури?
8. Перерахуйте способи з'єднання опорів.
9. Охарактеризуйте способи з'єднання опорів.
10. Що таке струмові навантаження дротів і захист їх від перевантажень? Падіння напруги.
11. Які є режими роботи джерела живлення. Нелінійні електричні кола. Охарактеризуйте їх.

Глава 3. Електромагнетизм

3.1. Характеристики магнітного поля

Магнітне поле - одна з двох сторін електромагнітного поля, що характеризується впливом на електрично заряджену частинку з силою, пропорційною заряду частинки і її швидкості.

Магнітне поле зображується силовими лініями, дотичні до яких збігаються з орієнтацією магнітних стрілок, внесених в поле (рис. 3.1). Таким чином магнітні стрілки, як би є пробними елементами для магнітного поля.

За позитивний напрямок магнітного поля умовно приймають напрямок північного полюса магнітної стрілки.

Можна стверджувати, що магнітне поле і електричний струм - взаємопов'язані явища.

Навколо провідника, в якому існує струм, завжди є магнітне поле, і, навпаки, в замкнутому провіднику, що рухається в магнітному полі, виникає струм.

Розглянемо кількісні характеристики магнітного поля.

Магнітна індукція B - векторна величина, що характеризує магнітне поле і визначає силу, що діє на рухому заряджену частинку з боку магнітного поля. Ця характеристика є основною характеристикою магнітного поля, так як визначає електромагнітну силу, а також ЕРС індукції в провіднику, що переміщається в магнітному полі.

Одиницею магнітної індукції є Вебер, поділений на квадратний метр, або Тесла (Тл):

$$[B] = 1 \text{ Вб}/1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Тл.}$$

Абсолютна магнітна проникність середовища μ_a - величина, що є коефіцієнтом, що відображає магнітні властивості середовища:

$$\mu_a = \mu_0 \mu_r. \quad (3.1)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot \frac{10^{-7}(\text{Ом}\cdot\text{с})}{\text{м}}$ - магнітна стала, яка характеризує магнітні властивості вакууму.

Одиницю Ом-секунда (Ом·с) називають Генрі (Гн). Таким чином, $[\mu_0] = \text{Гн}/\text{м}$.

Величину μ_r називають відносною магнітною проникністю середовища. Вона показує, у скільки разів індукція поля, створеного струмом у даному середовищі, більше або менше, ніж у вакуумі, і є безрозмірною величиною.

Для більшості матеріалів проникність μ_r , постійна і близька до одиниці. Для феромагнітних матеріалів μ_r є функцією струму, що створює магнітне поле, і досягає великих значень (10^{-2} - 10^5).

Напруженість магнітного поля H векторна величина, яка не залежить від властивостей середовища і визначається тільки струмами в провідниках, що створюють магнітне поле.

Напруженість пов'язана з магнітною індукцією співвідношенням:

$$[H] = 1 \text{ А}/1 \text{ м. } B = \mu_a H. \quad (3.2)$$

Наведені характеристики магнітного поля є основними. Тепер розглянемо похідні характеристики.

Магнітний потік Φ - потік магнітної індукції. На рис. 3.2 показано однорідне магнітне поле, що перетинає майданчик S .

Магнітний потік Φ через площадку S в однорідному магнітному полі дорівнює добутку нормальної складової вектора індукції B_n на площину S майданчика:

$$\Phi = B_n S = B S \cos \beta. \quad (3.3)$$

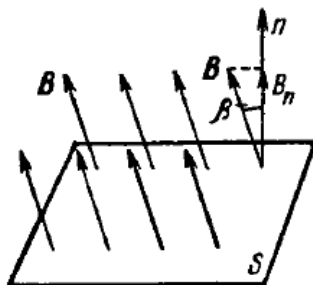


Рис. 3.2. Однорідне магнітне поле

Магнітна напруга U_M на ділянці AB (рис. 3.3, а) в однорідному магнітному полі визначається як добуток проекції H_l вектора H на відрізок AB і довжину цього відрізка l :

$$U_M = H_l l. \quad (3.4)$$

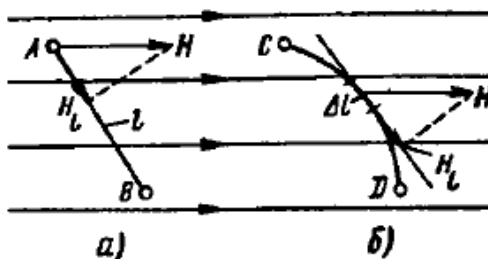


Рис. 3.3. До визначення магнітної напруги

У тому випадку, коли поле неоднорідне або ділянку, уздовж якого визначається, чи не прямолінійний (рис. 3.3, б), необхідно розбити цю ділянку на елементарні відрізки Δl . Тоді в межах малої

ділянки Δl поле можна вважати однорідним або сама ділянка прямолінійним і знайти ΔU_M на ділянці Δl :

$$\Delta U_M = H_l \Delta l.$$

Повна магнітна напруга на ділянці CD :

$$U_{MCD} = \sum H_l \Delta l. \quad (3.5)$$

3.2. Магнітне поле прямолінійного струму

Магнітне поле прямолінійного провідника зі струмом має вигляд концентричних кіл (рис. 3.4, а). Напрямок поля визначають за правилом свердлика. Внаслідок симетрії напруженість поля у всіх точках, рівновіддалених від осі провідника, однакова. Як контур, виберемо коло радіусом r , що збігається з силовою лінією поля. Так як контур збігається з магнітною лінією, довжина вектору напруженості і його проекція на дотичну в будь-якій точці рівні між собою: $H_l = H_r$.

Знаходимо за формулою: $F = \sum l = \sum H_l \Delta l$. Так як H_r , у всіх точках контуру радіуса r однакова, то:

$$F = H_r \sum \Delta l = 2\pi r H_r. \quad (3.6)$$

Повний струм $\sum I = I$. Отже,

$$I = H_r 2\pi r, \quad (3.7)$$

звідки $H_r = I/2\pi r$. Формула (3.7) справедлива для провідника нескінченної довжини, але практично нею користуються і тоді, коли довжина провідника значно більше відстані r .

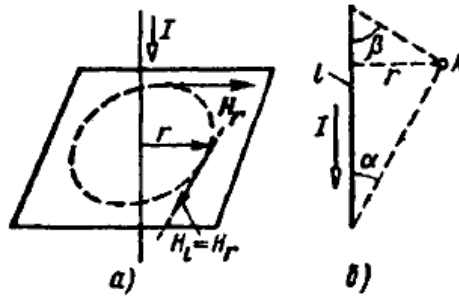


Рис. 3.4. Магнітне поле прямолінійного струму (а), визначення H при r , яке порівнюється з l (б)

Розглянемо випадок, коли $l \neq \infty$ і точка A , в якій необхідно визначити напруженість поля, знаходиться на відстані r , порівнянній з l (рис 3.4, б). Методика розрахунку зводиться до наступного. Поєднуючи точку A з кінцями провідника довжиною l , отримуємо трикутник з кутами α і β . Формула, за допомогою якої обчислюють H_A , дається без виведення і впливає із закону Біо - Савара, що не розглядається в даному посібнику:

$$H_A = \frac{1}{4\pi r} (\cos \alpha + \cos \beta). \quad (3.7 \text{ а})$$

Якщо наближати точку A до провідника або подовжити провідник, то вираз в дужках буде прагнути до двох і формула (3.7 а) може бути замінена формулою (3.7).

Приклад 3.1. На відстані $a = 8$ см від вісі довгого промолінійного провідника зі струмом напруженість поля $H = 8,5$ А/см.

Розв'язання. Так як напруженість поля в цьому випадку розраховують за формулою (3.7), струм у провіднику $I = H \cdot 2\pi a = 8,5 \times 2\pi \cdot 8 = 427 \text{ A}$.

3.3. Намагнічування феромагнітних матеріалів

Матеріали, що володіють великою магнітною проникністю, називають *феромагнітними*. До них відносяться залізо, нікель, кобальт і їхні сплави. Опинившись у зовнішньому магнітному полі, ці матеріали значно посилюють його. Це явище спрощено можна пояснити таким чином.

Феромагнітні матеріали мають області мимовільного намагнічування. Магнітний стан кожної з таких областей характеризується вектором намагніченості. Вектори намагніченості окремих областей (доменів) орієнтовані випадковим чином. Тому намагніченість феромагнітних тіл у відсутність зовнішнього магнітного поля не проявляється.

Якщо феромагнітне тіло помістити в зовнішнє магнітне поле, то під його впливом відбудуться зміни, в результаті яких вектори намагніченості окремих областей мимовільного намагнічування будуть орієнтовані в напрямку зовнішнього поля. Індукція результуючого магнітного поля буде визначатися як індукцією зовнішнього поля, так і магнітної індукції окремих доменів, тобто результуюче значення індукції буде набагато перевищувати її початкове значення. Таким чином, сумарне магнітне поле значно перевищить зовнішнє поле.

3.4. Розрахунок магнітного кола

Сукупність пристроїв, що містять феромагнітні тіла і утворюють замкнене коло, в якому при наявності магніторушійної сили утворюється магнітний потік і вздовж якої замикаються лінії магнітної індукції, називають магнітним колом.

Прикладом таких кіл є сердечники трансформаторів, магнітних підсилювачів, електричних машин і т. д. (рис. 3.5). Завдання розрахунку магнітного кола зводиться до визначення НС котушки (або системи котушок), необхідної для створення заданого магнітного потоку. Часто зустрічається і зворотна задача, коли по заданій силі, що намагнічує необхідно визначити магнітні потоки. Розрахунок магнітного кола виробляють за допомогою законів для магнітних кіл. Розглянемо ці закони.

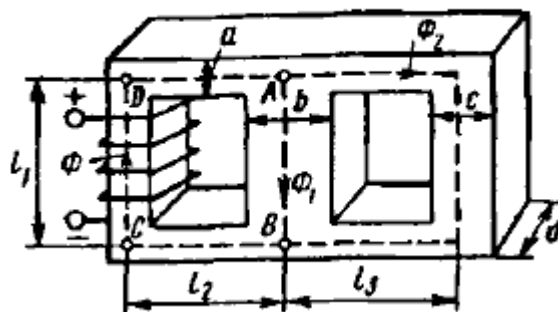


Рис. 3.5. Схема магнітного кола

Перший закон Кірхгофа. За рахунок струму, що протікає через котушку, показану на рис. 3.5, виникає магнітне поле, і в лівому стрижні створюється магнітний потік Φ . Цей потік в точці A сердечника розгалужується на потоки Φ_1 і Φ_2 . Так як силові лінії

магнітного поля неперервні і замкнуті, то має виконуватися співвідношення:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \text{ або } \Phi - \Phi_1 - \Phi_2 = 0. \quad (3.8)$$

Отже, алгебраїчна сума магнітних потоків для будь-якого вузла магнітного кола дорівнює нулю.

Це рівняння виражає перший закон Кірхгофа для магнітного кола.

Другий закон Кірхгофа. Застосуємо закон повного струму до контуру $ABCD$ (рис. 3.5). Повний струм, що проходить через поверхню, обмежену цим контуром, $\sum l = I\omega$. НС уздовж цього контуру $F = H(l_1 + 2l_2) + H_1l_1$ де H - напруженість магнітного поля на ділянці $BCDA$, в межах якого воно є однорідним, так як магнітний потік Φ і площа поперечного перерізу сердечника S на цій ділянці незмінні; H_1 - напруженість магнітного поля на ділянці AB .

На підставі закону повного струму

$$I\omega = H(l_1 + 2l_2) + H_1l_1, \quad (3.9)$$

тобто для даного контуру НС котушки дорівнює сумі магнітних напруг на окремих ділянках. Якщо є не одна, а кілька котушок і у всіх стрижнях напруженість поля різна, то рівняння набуває вигляду

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 + \dots + I_n\omega_n = H_1l_1 + H_2l_2 + \dots + H_m l_m. \quad (3.10)$$

Таким чином, сума алгебри НС для будь-якого замкнутого контуру магнітного кола дорівнює сумі алгебри магнітних напруг на окремих його ділянках.

Це визначення є другим законом Кірхгофа для магнітного кола. Знак НС котушок визначають за правилом свердлика, а знак магнітної напруги - у напрямку напруженості поля; якщо напрямок

напруженості збігається з вибраним напрямком обходу контуру, то магнітне напруга беруть зі знаком плюс, і навпаки.

Закон Ома. Магнітна напруга на даній ділянці кола $U_M = Hl$. Якщо врахувати, що $H = B/(\mu_r\mu_0)$, $B = \Phi/S$, то $U_M = \Phi l/(\mu_r\mu_0)S$,

$$\Phi = \frac{U_M}{l/(\mu_r\mu_0)S}$$

Введемо позначення $l/(\mu_r\mu_0)S = R_M$, де R_M - магнітний опір ділянки кола. Тоді остаточний вираз закону Ома для ділянки магнітного кола набуде вигляду:

$$\Phi = U_M/R_M.$$

Магнітний потік для ділянки кола прямо пропорційний магнітному напрузі на цій ділянці.

З виразу для R_M слід, що магнітне опір феромагнітних матеріалів мало. Необхідно відзначити, що закон Ома справедливий тільки для лінійних ділянок магнітного кола.

Приклад 3.3. Скільки витків потрібно намотати на осердя (рис. 3.6) для отримання магнітного потоку $\Phi=47 \cdot 10^{-4}$ Вб при струмі у обмотці $I = 25$ А? Верхня частина осердя виконана з електротехнічної сталі Э330, нижня- з литої сталі.

Розв'язання. Згідно рис. 3.6, $l_1 = 56$ см; $S_1 = 36$ см²; $l_2 = 17$ см; $S_2 = 36$ см²; $2l_0 = 1$ см; $S_0 = 36$ см².

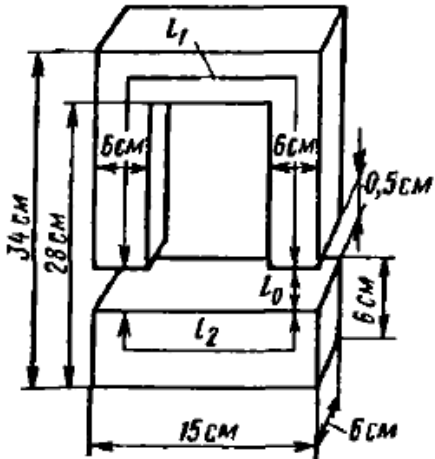


Рис. 3.6. До розрахунку магнітного кола

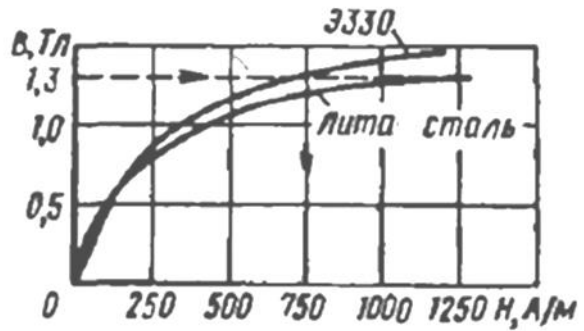


Рис. 3.7. Криві намагнічування електротехнічної сталі Э330 і литої сталі

Магнітна індукція для всіх трьох ділянок однакова: $B = \Phi/S = 47 \cdot 10^{-4} / (36 \cdot 10^{-4}) = 1,3$ Тл. При кривій намагнічування для сталі Э330 (рис. 3.7) індукція $B = 1,3$ Тл відповідає напруженості поля $H_1 = 750 \frac{\text{А}}{\text{м}}$. Магнітна напруга на ділянці l_1

$$U_{M1} = H_1 l_1 = 750 \cdot 0,56 = 420 \text{ А.}$$

Магнітна напруга на ділянці l_2 :

$$U_{M2} = H_2 l_2 = 1250 \cdot 0,17 = 212,5 \text{ А.}$$

Напруженість поля у повітряному зазорі:

$$H_0 = B/\mu_0 = 1,3/(4\pi \cdot 10^{-7}) = 1,05 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$$

Магнітна напруга у повітряному зазорі:

$$U_{M0} = H_0 2l_0 = 1,04 \cdot 10^6 \cdot 0,01 = 10400 \text{ А.}$$

Сила, яка намагнічує:

$$F_M = U_{M1} + U_{M2} + U_{M0} = 420 + 212,5 + 10400 \approx 11032 \text{ А.}$$

Число витків обмотки:

$$\omega = F_M/l = 11032/25 \approx 442.$$

3.5. Електрон у магнітному полі

На електрон, що рухається в магнітному полі (рис. 3.8), діє електромагнітна сила. Ця сила виникає в результаті взаємодії даного магнітного поля з магнітним полем, яке створюється в результаті руху електрона. Вона називається силою Лоренца і визначається:

$$F_0 = q_0 B v \sin \alpha, \quad (3.11)$$

де q_0 – заряд електрону; B – магнітна індукція; v – швидкість руху електронів;

α – кут між напрямками магнітного поля та електронного току.

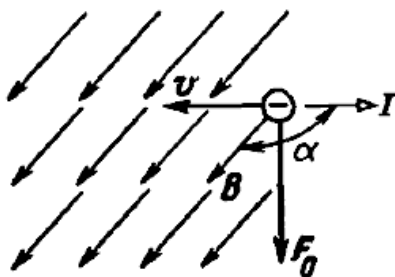


Рис. 3.8. Електрон у магнітному полі

Напрямок сили визначається за правилом лівої руки: ліву руку слід розташувати так, щоб магнітне поле входило в долоню, витягнуті чотири пальця розташовуються по напрямку струму; тоді відігнутий під прямим кутом великий палець покаже на правління сили.

Необхідно пам'ятати, що струм, викликаний рухом електрона, спрямований у бік, протилежний цьому руху.

Приклад 3.4. У однорідному магнітному полі, індукція якого $B=2$ Тл, перпендикулярно напрямку поля рухається електрон

($q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) зі швидкістю $v = 10$ м/с. Визначити силу, яка діє на електрон.

Рішення. Оскільки, за умовою задачі $\alpha = \pi/2$, формула (3.11) приймає вигляд $F_0 = q_0 B v = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10 = 32 \cdot 10^{-19}$ Н.

3.6. Провідник зі струмом у магнітному полі. Взаємодія паралельних провідників зі струмом

На провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі (рис. 3.9), діє сила. Так як струм у металевій провіднику обумовлений рухом електронів, то силу, що діє на провідник, можна розглядати як суму сил, що діють на всю електрику провідника довжиною l . У результаті отримуємо співвідношення $F = F_0 n l S$, де F_0 – сила Лоренца, яка діє на електрон; n – концентрації електронів (число електронів в одиниці об'єму); l, S – довжина і площа поперечного перерізу провідника.

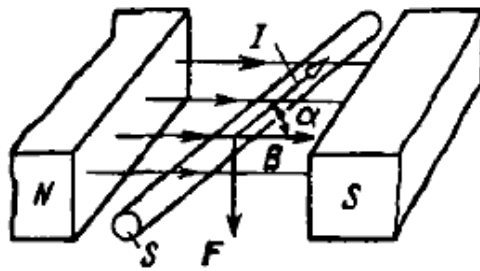


Рис. 3.9. Провідник зі струмом у магнітному полі

З урахуванням формули (3.11) можна записати $F = q_0 n v S B l \sin \alpha$.

Легко зрозуміти, що добуток q_0nv є щільністю струму J ; отже,
 $F = JSBl\sin\alpha$.

Добуток JS це струм I , тобто:

$$F = IBl\sin\alpha. \quad (3.12)$$

Отримана залежність відображає закон Ампера.

Напрямок сили визначається за правилом лівої руки. Розглянуте явище покладено в основу роботи електричних двигунів.

На практиці часто доводиться зустрічатися з взаємодією паралельних провідників, по яких проходять струми.

Розглянемо це явище. Провідник зі струмом I_2 знаходиться у магнітному полі струму I_1 (рис. 3.10). Застосуємо формули (3.12) для визначення електромагнітної сили, що діє на провідник зі струмом I_2 : $F_{1,2} = I_2B_1l$. В даному випадку $\alpha = \pi/2$. Магнітна індукція, як відомо, $B_1 = \mu_a H_1$.

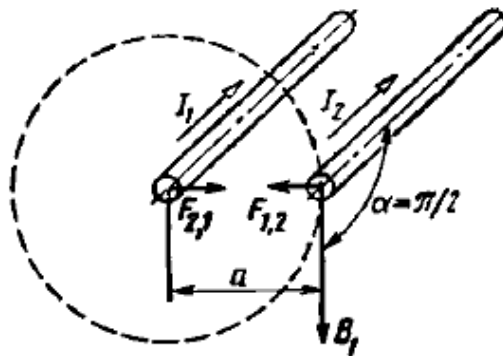


Рис. 3.10. Електромагнітні сили взаємодії паралельних провідників зі струмом

Напруженість магнітного поля прямолінійного провідника зі струмом, по формулі (3.7), $H_1 = I_1/(2\pi a)$. Тоді вираз для $F_{1,2}$ набуде вигляду $F_{1,2} = \mu_a I_1 I_2 l / (2\pi a)$.

Згідно з третім законом Ньютона, провідник зі струмом I_2 діє на провідник зі струмом I_1 з такою ж силою, як провідник зі струмом I_1 на провідник зі струмом I_2 , тобто:

$$F_{2,1} = F_{1,2} = F = \mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi a). \quad (3.13)$$

Напрямок дії сил $F_{1,2}$ і $F_{2,1}$ визначається за правилом лівої руки. Як видно з рис. 3.10, якщо струми проходять в одному напрямку, то провідники притягуються, якщо в різному - відштовхуються.

Приклад 3.5. Двожильний кабель з ізоляцією має свинцеву оболонку, яка оберігає кабель від потрапляння вологи (рис. 3.11). Відстань між центрами перерізів жил $a = 20$ мм. Визначити силу взаємодії між струмами на кожен метр довжини кабелю та вплив цієї сили на свинцеву оболонку. Струм у жилах кабелю $I = 500$ А.

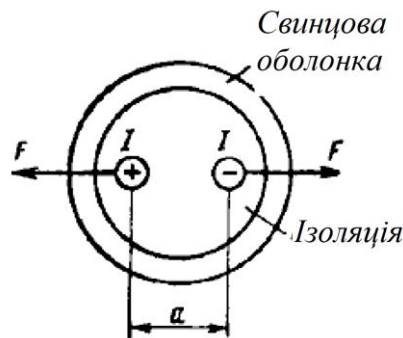


Рис. 3.11. До визначення сили взаємодії між жилами кабелю

Розв'язання. Розрахуємо силу взаємодії між струмами на 1 м довжини. Так як $I_1 = I_2 = I$, $l = 1$ м, то формула (3.13) приймає вигляд:

$$F = \mu_0 I^2 / (2\pi a) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500^2 / (2\pi \cdot 20 \cdot 10^{-3}) = 2,5 \text{ Н.}$$

Так як струми у жилах проходять у протилежних напрямках, жили відштовхуються. Сили, які діють на жили через ізоляцію,

передаються на свинцеву оболонку, викликаючи у ній внутрішні механічні напруги.

3.7. Закон електромагнітної індукції

Суть закону електромагнітної індукції, відкритого англійським фізиком М. Фарадеєм, полягає в наступному: всяка зміна магнітного поля, в якому поміщений провідник довільної форми, викликає в останньому появу ЕРС електромагнітної індукції.

Розглянемо цей закон з кількісної сторони при русі прямолінійного провідника в однорідному магнітному полі. Нехай провідник довжиною l рухається зі швидкістю v . Тоді на вільні електрони, які рухаються разом з провідником, буде діяти сила Лоренца, на правління якої визначається за правилом лівої руки. Під дією цієї сили електрони рухаються вздовж провідника, що призводить до поділу зарядів: на кінці А провідника накопичуються позитивні заряди, на кінці Б - негативні. але приподілі зарядів виникає електричне поле, перешкоджає цьому процесу. Коли сили поля урівноважать силу Лоренца, поділ припиниться. В процесі розподілу зарядів сили Лоренца виробляють роботу. Визначимо значення цієї роботи по відношенню до одиничного заряду, тобто напруга проміж точками А и Б. Оскільки поле сил Лоренца однорідне, $U_{AB} = E_L l$ та $E_L = F_L / q_0 = q_0 B v \sin \alpha / q_0 = B v$, так як у нашому випадку $\alpha = \pi/2$. В результаті отримаємо $U_{AB} = B v l$.

Ця напруга дорівнює ЕРС електромагнітної індукції і в загальному вигляді, коли $\alpha \neq \pi/2$, виражається формулою:

$$E = Bv \sin \alpha. \quad (3.14)$$

Напрямок ЕРС визначається за правилом правої руки: праву руку розташовують так, щоб магнітні лінії входили у долоню, відігнутий під прямим кутом великий палець суміщають з напрямком швидкості; тоді витягнуті чотири пальці покажуть напрямок ЕРС.

3.8. Електрорушійна сила індукції в контурі

Розглянемо рух замкнутого контуру (рамки) в неоднорідному магнітному полі (рис. 3.12). Рамка переміщається в площині, перпендикулярній магнітному полю, спрямованому від нас, і в сторонах 1 і 2 рамки наводяться ЕРС. В сторонах 3 і 4 - поздовжні ЕРС. ЕРС в стороні 1 більша ЕРС ніж в стороні 2, так як магнітне поле праворуч інтенсивніше. Таким чином, результуюча ЕРС:

$$e = E_1 - E_2 = B_1 lv - B_2 lv = (B_1 - B_2)lv.$$

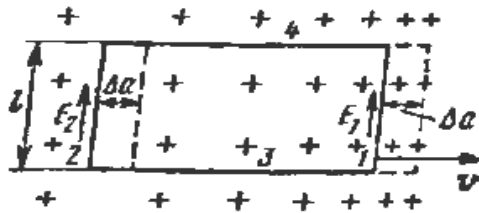


Рис. 3.12. Схема індукована ЕРС у рамці

При цьому $v = \Delta a / \Delta t$; $B_1 \Delta a t = \Delta \Phi_1$ - приріст магнітного потоку, що перетинає площину рамки; $B_2 \Delta a t = \Delta \Phi_2$ - зменшення магнітного потоку, так як рамка переміщається зліва направо. Отже, без урахування напрямку ЕРС $e = \Delta \Phi / \Delta t$, де $\Delta \Phi = \Delta \Phi_1 - \Delta \Phi_2$ ($\Delta \Phi_1 > \Delta \Phi_2$). Загальна зміна потоку $\Delta \Phi$ позитивно; індукований струм має

такий напрям, при якому створене ним магнітне поле спрямоване проти основного поля. З урахуванням цього вираз для e можна записати у вигляді:

$$e = -\Delta\Phi/\Delta t. \quad (3.15)$$

Таким чином, ЕРС, індукована в контурі при зміні магнітного потоку, що проходить крізь поверхню, обмежену цим контуром, дорівнює швидкості зміни потоку, взятої з негативним знаком.

Це формулювання закону електромагнітної індукції справедлива для контурів довільної форми.

Якщо контур складається з ω послідовно з'єднаних витків і магнітний потік Φ для кожного витка один і той же, то індукована ЕРС.

$$e = -\omega \frac{\Delta\Phi}{t}. \quad (3.16)$$

Приклад 3.6. Квадратна рамка з довжиною сторін 15 см з мідної проволочки, площа поперечного перерізу 10 мм², переміщується з постійною швидкістю 1 м/с у однорідному магнітному полі з індукцією 1 Тл (рис. 3.13). Визначити у кожному з трьох положень (1, 2 і 3) рамки значення і напрямки індукованих ЕРС і струму у рамці.

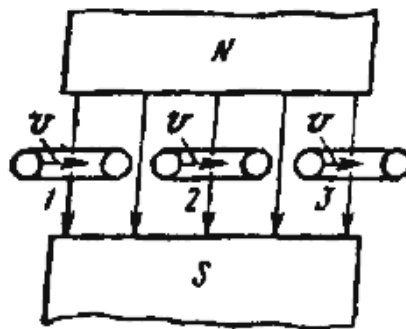


Рис. 3.13. До визначення ЕРС у рамці, яка переміщується у однорідному магнітному полі

Розв'язання. ЕРС для положень 1 і 3 рамки розрахуємо згідно (3.14):

$$E_1 = E_3 = Blv = 1 \cdot 1 \cdot 0,15 = 0,15 \text{ В},$$

так як у магнітному полі знаходиться передня або задня сторона рамки. Напрямок ЕРС визначимо за правилом правої руки. ЕРС для положення 2 рамки, по (3.15), $e = -\Delta\Phi/\Delta t$. Оскільки поле однорідне, $\Delta\Phi/\Delta t = 0$.

Струм для положень 1 і 3 рамки:

$$I_1 = I_3 = E_1/R_p; R_p = p4l/S = 0,017 \cdot 4 \cdot 0,15 = 0,001 \text{ Ом};$$

$$I_1 = 0,15/0,001 = 150 \text{ А}.$$

Напрямок струму залежить від напрямку ЕРС.

3.9. Принцип Ленца

Негативний знак у виразі (3.15) свідчить про те, що ЕРС, індукована в контурі, прагне викликати струми, що перешкоджають зміні магнітного потоку. Отже, індукована в контурі ЕРС і струм завжди мають такий напрямок, при якому вони перешкоджають причини, що їх викликає.

Це положення висловлює сформульований Ленцем закон про направлення індукованого струму. На рис. 3.14, а показаний виток, у який спочатку вводять постійний магніт. При цьому магнітне поле збільшується, $\Delta\Phi/\Delta t > 0$. У витку індукована ЕРС такої напруги і струм, при якому магнітне поле витка перешкоджає наростанню зовнішнього магнітного поля, тобто магнітний потік витка Φ_B , має

напрямок, протилежний напрямку магнітного поля постійного магніту.

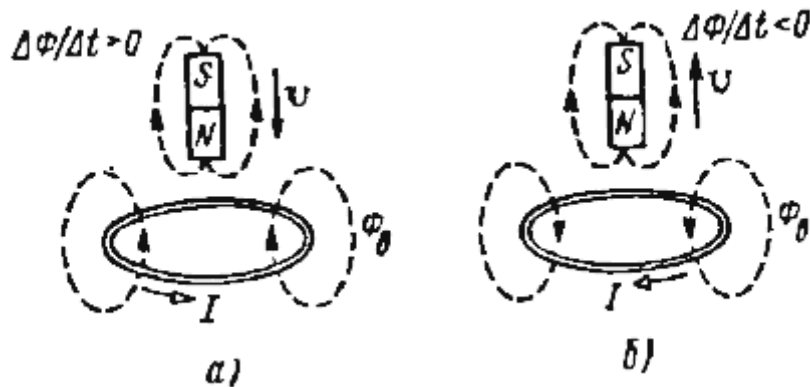


Рис. 3.14. До пояснення принципу Ленца

Коли постійний магніт виводять з витка (рис. 3.14, б), магнітне поле зменшується $\Delta\Phi/\Delta t < 0$. Струм, що виникає в витку, створює магнітний потік, що перешкоджає зменшенню магнітного поля постійного магніту.

На підставі цих міркувань можна зробити висновок про те, що виток прагне зберегти незмінність. Це явище можна порівняти з інерцією, яка спостерігається, наприклад, при русі вільної матеріальної точки. Принцип інерції полягає в тому, що вільна матеріальна точка прагне зберегти свою кількість руху mv . Якщо під дією зовнішніх сил змінюється кількість руху матеріальної точки, то виникає сила інерції, що протидіє положенню зовнішнім силам: $F_H = -\Delta(mv)/\Delta t$.

У наведеному випадку магнітний потік можна розглядати як аналог кількості руху, а ЕРС індукції - як аналог деякої інерційної сили.

Приклад 3.7. Прямокутна рамка переміщується у магнітному полі прямолінійного струму так, як показано на рис. 3.15. Користуючись принципом Ленца, визначити напрямок струму у рамці.

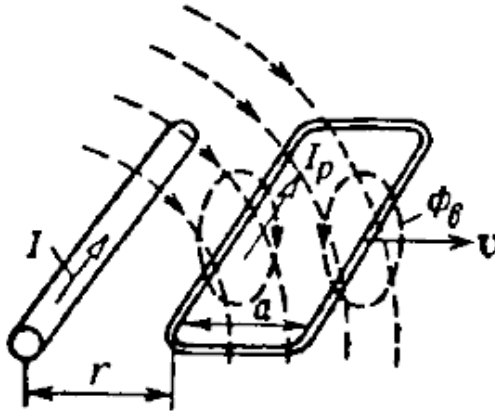


Рис. 3.15. Рамка у магнітному полі прямолінійного струму

Розв'язання. Магнітне поле, яке пронизує площину рамки, неоднорідно: у ближній стороні, згідно (3.7), $H_r = I/(2\pi r)$, у дальній - $H_{r+a} = I/|2\pi(r+a)|$. При видаленні рамки магнітний потік, який пронизує її площину, зникає. Тоді струм буде створювати магнітний потік Φ_p , який перешкоджає зменшенню, тобто направлений у ту саму сторону, що й магнітний потік провідника. Напрямок струму знаходимо за правилом буравчика.

3.10. Перетворення механічної енергії в електричну

Нехай у магнітному полі провідник довжиною l під дією вантажу рухається по вказаних напрямках (рис. 3.16). Тоді відповідно до закону електромагнітної індукції в цьому провіднику наводиться

ЕРС індукції $E = Blv$. Під дією цієї ЕРС у ланцюзі почне проходити струм I . Відповідно до закону Ома для всього кола,

$$E = IR + IR_{\text{вн}},$$

де R - опір навантаження; $R_{\text{вн}}$ - опір провідників.

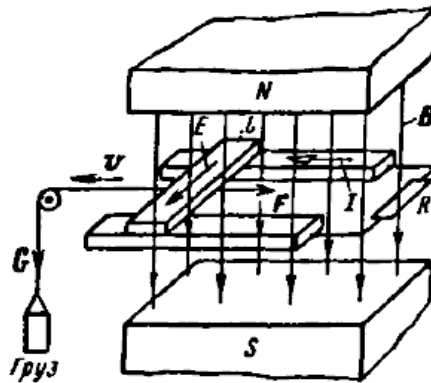


Рис. 3.16. Модель, яка ілюструє перетворення механічної енергії в електричну

Очевидно, що в резисторах R і $R_{\text{вн}}$ витрачається енергія і відбувається процес перетворення механічної енергії в електричну. При цьому на провідник довжиною l діє електромагнітна сила $F = BlI$, напрямком якої визначається за правилом лівої руки. При сталій швидкості сила $G=F$. Знайдемо співвідношення між механічною і електричною потужністю для цього стану. Помножимо рівняння для E на ток I :

$$EI = I^2R + I^2R_{\text{вн}} \text{ або } Blv = I^2R + I^2R_{\text{вн}}.$$

Так як $BlI = F$, то:

$$Fv = I^2R + I^2R_{\text{вн}}. \quad (3.17)$$

де Fv – механічна потужність, яка розвивається при русі вантажу; I^2R - електрична потужність, яка споживається у навантаженні; $I^2R_{\text{вн}}$ - потужність втрат у провіднику.

Таким чином, механічна енергія при переміщенні провідника в магнітному полі перетворюється в електричну. Розглянута модель є моделлю найпростішого генератора електричної енергії.

3.11. Перетворення електричної енергії в механічну

До провідника довжиною l , поміщеного в магнітне поле, прикладена напруга джерела U , і в ланцюзі існує струм I (рис. 3.17). На провідник діє електромагнітна сила $F = BlI$, напрямком якої визначається за правилом лівої руки. Під дією цієї сили, якщо $F > G$, провідник довжиною l почне переміщатися і вантаж стане підніматися. Отже, електрична енергія джерела перетворюватиметься в механічну енергію вантажу. Знайдемо кількісне співвідношення, що характеризує цей захід. При русі провідника в магнітному полі в ньому буде індукована ЕРС $E = Blv$. Відповідно до принципу Ленца, напрям цієї ЕРС протилежний напрямку струму i , отже,

$$U = E + IR_{\text{вн}}, \quad (3.18)$$

де $R_{\text{вн}}$ - опір провідника довжиною l . Звідси струм у ланцюзі:

$$I = (U - E)/R_{\text{вн}}. \quad (3.19)$$

Помноживши рівняння (3.18) на струм I і маючи на увазі, що $E = Blv$ отримаємо:

$$UI = EI + I^2R_{\text{вн}} + BlvI + I^2R_{\text{вн}} + Fv + I^2R_{\text{вн}};$$

$$\text{тобто: } P_e = P_{\text{мех}} + P_T, \quad (3.20)$$

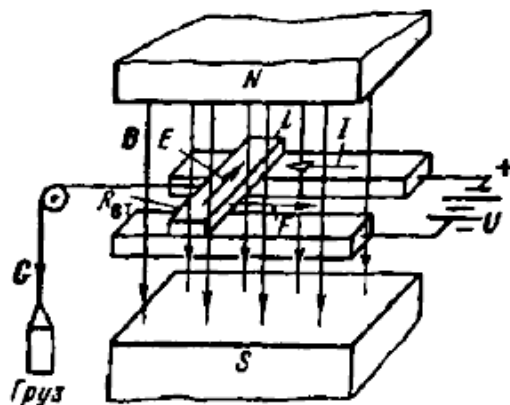


Рис. 3.17. Модель, яка ілюструє перетворення електричної енергії у механічну

де $P_e = UI$ – електрична потужність; $P_{\text{мех}} = Fv$ – механічна потужність; $P_T = I^2 R_{\text{вн}}$ – теплова потужність.

Таким чином, отримана провідником електрична енергія джерела перетвориться в механічну і теплову енергію.

Ця модель є найпростішим електричним двигуном.

Приклад 3.8. У пристрої, зображеному на рис. 3.17, $U = 2$ В; $R_{\text{вн}} = 0,001$ Ом; $B = 1$ Тл; $l = 40$ см. Визначити: 1) максимальну силу тяжіння ковзаючого провідника довжиною l ; 2) струм у ланцюзі, силу тяжіння, ККД пристрою, якщо провідник, який підіймає груз, має швидкість 2 м/с; 3) швидкість провідника, якщо сила, яка перешкоджає його руху, дорівнює 0; 4) силу, яка створюється вантажем, що опускається, необхідна для досягнення швидкості 2 м/с при тому самому джерелі живлення.

Розв’язання. Максимальна сила тяжіння $F_{\text{max}} = BlI_{\text{max}}$. Згідно (3.19), струм $I_{\text{max}} = U/R_{\text{вн}}$, так як $E = Blv = 0$ у момент торкання дроту. Звідси $I_{\text{max}} = 2/0,01 = 200$ А; $F_{\text{max}} = 1 \cdot 200 \cdot 0,4 = 80$ Н.

2. Згідно (3.19), струм $I_{max} = (U - E)/R_{BH}$; $E = Blv = 1 \cdot 0,4 \cdot 2 = 0,8$ В. Отже, $I = (2 - 0,8)/0,001 = 120$ А.

Сила тяжіння $F = BIl = 1 \cdot 0,4 \cdot 120 = 48$ Н; $\eta = \frac{P_{mx}}{P_3} \cdot 100 \% = \frac{Fv}{UI} \cdot 100 \% = \frac{18 \cdot 2}{2 \cdot 120} \cdot 100 \% = 40 \%$.

3. Швидкість руху провідника у загальному випадку знаходять за допомогою формули (3.18), оскільки $E = Bvl$:

$$v = (U - IR_{BH})/(Bl).$$

У нашому випадку сила, яка перешкоджає руху провідника, дорівнює нулю, тому провідник довжиною l буде розганятися під дією сили F до тих пір, доки його швидкість не стане такою, при якій протидіюча ЕРС E урівноважить напругу джерела U . Отже, струм у ланцюзі буде рівним нулю і швидкість $v = U/(Bl) = 2/(1 \cdot 0,4) = 5$ м/с.

4. Опускання вантажу означає, що пристрій перейшов у режим генератора; отже для кола рис. 3.17 можна записати $E + U = IR_{BH}$, тобто ЕРС, яка виникає у провіднику довжиною l при русі груза вниз зі швидкістю 2 м/с, діє згідно з напругою IR_{BH} джерела і разом з цим джерелом створюється падіння напруги на цьому провіднику. Отже: $I = (E + U)/R_{BH} = (Blv + U)/R_{BH} = (1 \cdot 0,4 \cdot 2 + 2)/0,02 = 280$ А, звідки сила, яку розвиває вантаж $G = F = BIl = 1 \cdot 0,4 \cdot 280 = 112$ Н.

3.12. Потокозчеплення і індуктивність котушки

Якщо через котушку проходить змінюється струм, то її витки перетинаються змінним магнітним полем, що викликається цим

струмом, і на затискачах котушки виникає ЕРС індукції. Для кількісної характеристики цього процесу введемо поняття потокозчеплення і індуктивності котушки. На рис. 3.18 показана котушка зі струмом, витки якої пронизують різне число силових ліній: центральні витки - всі силові лінії, крайні - тільки частина силових ліній. Отже, магнітні потоки різних витків різні. Ці магнітні потоки називають потоками самоіндукції Φ_L , Так як вони створюються струмом котушки.

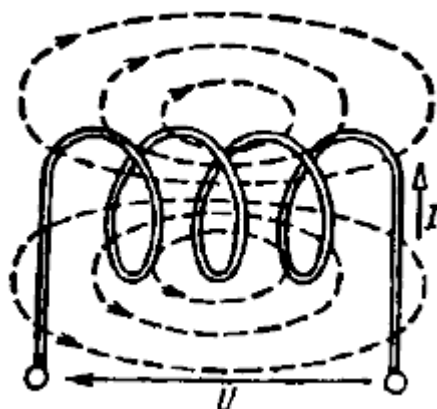


Рис. 3.18. До визначення потокозчеплення і індуктивності котушки

Суму потоків самоіндукції усіх витків котушки називають потокозчепленням самоіндукції:

$$\psi_L = \psi_{L1} + \psi_{L2} + \dots + \psi_{L\omega}. \quad (3.21)$$

У тому випадку, коли магнітна проникливість середовища постійна, між потокозчепленням ψ_L і створюваним його струмом I існує лінійна залежність:

$$\psi_L = LI, \quad (3.22)$$

де L – коефіцієнт пропорційності, називається індуктивністю котушки.

Одиницею індуктивності є Генрі (Гн):

$$[L] = 1 \text{ Вб}/1 \text{ А} = 1 \text{ Гн.}$$

На практиці, як правило, користуються більш дрібними одиницями: мілі Генрі ($1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$) і мікро Генрі ($\text{мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$).

Знайдемо індуктивність кільцевої котушки (див. рис. 3.26). Так як в цьому випадку все магнітне поле замикається всередині котушки, то магнітні потоки Φ_L для всіх витків однакові і, отже, $\psi_L = \omega\Phi_L$. Але $\Phi_L = BS$ і $B = \mu_a H$. Напруженість поля, відповідно до закону повного струму, $H = I\omega/l$. В результаті отримаємо $\psi_L = \mu_a \frac{l\omega^2}{l} S$.

Так як $L = \psi_L/I$, то:

$$L = \mu_a \frac{\omega^2}{l} S. \quad (3.23)$$

Індуктивність циліндричної котушки, у якій довжина досить велика в порівнянні з діаметром $D (l \geq 5D)$, також може бути визначена за формулою (3.23).

Приклад. 3.9. Середній радіус кільцевої котушки з неферомагнітним осердям $r = 10 \text{ см}$, площа поперечного перерізу $S = 6 \text{ см}^2$, щільність намотки 8 вит/см . Визначити: 1) індуктивність котушки; 2) як зміниться індуктивність котушки, якщо при додаванні витків щільність намотки доведена до 12 вит/см .

Розв'язання. Підставимо в (3.23) $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, $l = 2\pi r = 2\pi 10$, $S = 6 \text{ см}^2$, $\omega = 8 \cdot 2\pi r = 8 \cdot 2\pi \cdot 10$, отримаємо

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8^2 \cdot 2^2 \cdot \pi^2 \cdot 10^2 \cdot 6 / (2\pi \cdot 10) \approx 0.3 \text{ мГн.}$$

2. При зміні щільності намотки змінюється тільки число витків. Отже, нове значення індуктивності $L' = 12^2 L / 8^2 = 12^2 \cdot 0,3 / 8^2 = 0,675 \text{ мГн}$, тобто індуктивність збільшиться у 2,25 разів.

3.13. Електрорушійна сила самоіндукції. Енергія магнітного поля

Розглянемо процес, що відбувається в ланцюзі (рис. 3.19) при замиканні ключа K ; при замиканні ключа струм у ланцюзі $I = 0$. Після замикання ключа струм у ланцюзі встановлюється не миттєво, і лише через визначений час досягає значення $I = U/R_K$. Отже, струм, що проходить через котушку, змінюється, а значить змінюється і потік Φ_L кожного витка і потік котушки ψ_L . Згідно (3.15), в кожному витку наводиться ЕДС $e = -\frac{d\Phi_L}{dt}$, а у всій котушці ЕРС $e_L = -d\Phi_{L1}/dt - d\Phi_{L2}/dt - \dots - d\Phi_{L\omega}/dt = -(d\Phi_{L1}/dt + d\Phi_{L2}/dt + \dots + d\Phi_{L\omega}/dt)$. Вираз у скобках представляє собою суму Φ_L : $e_L = \frac{-d(\Phi_{L1} + \Phi_{L2} + \dots + \Phi_{L\omega})}{dt}$. У відповідності з (3.21) $e_L = -d\psi_L/dt$. Але $\psi_L = Li$ і для котушки без феромагнітного осердя $L = (const)$ кінцево отримаємо: $e_L = -L di/dt$. (3.24)

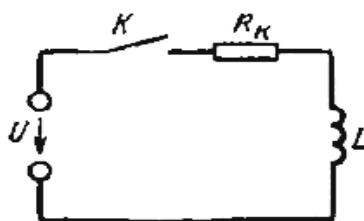


Рис. 3.19. Схема індуквана РС самоіндукції у котушці

ЕРС e_L називають ЕРС самоіндукції, а розглянуте явище виникнення ЕРС у котушці, внаслідок змінення струму у цій котушці – самоіндукцією. ЕРС самоіндукції, згідно з принципом Ленца, перешкоджає зміні струму в котушці, тому струм досягає сталого

значення $I = U/R_K$ поступово (рис. 3.20). Якщо замкнути котушку на резистор, то струм в ланцюзі не зникає миттєво, так як ЕРС самоіндукції перешкоджає його зменшенню. Проходження струму через R_K супроводжується виділенням теплої енергії, що свідчить про накопичення енергій у магнітному полі котушки. Знайдемо значення цієї енергії. Згідно другого закону Кірхгофа для кола, $U + e_L = iR_K$ звідки, $U = iR_K - e_L = iR_K + L \frac{di}{dt}$, тобто падіння напруги джерела частково проходить на R_K і частково урівноважує ЕРС самоіндукції e_L .

Помножимо останнє рівняння на: $U idt = i^2 R_K dt + L idi$,

де $U idt$ – енергія, яку виділяє джерело у коло за час d ; $i^2 R_K dt$ – енергія, яка виділяється у вигляді теплоти на резисторі R_K ; $L idi$ – енергія, що накопичується у магнітному полі котушки за час dt .

Для знаходження всієї енергії, що накопичиться у магнітному полі котушки при зміні струму від 0 до $I = U/R_K$, проінтегруємо вираз для $L idi$:

$$W_L = \int_0^I L idi = LI^2/2. \quad (3.25)$$

Цей вираз аналогічний виразу для кінетичної енергії тіла масою, яке рухається зі швидкістю v : $W = (Mv)^2/2$.

Приклад 3.10. Котушку, індуктивність якої $L = 0,1$ Гн і опір $R_K = 10$ Ом, підключають до джерела постійної напруги. $U = 100$ В. Визначити ЕРС самоіндукції у перший момент підключення котушки до джерела. Яку кількість енергії зосереджено у магнітному полі котушки при струмі, який встановився?

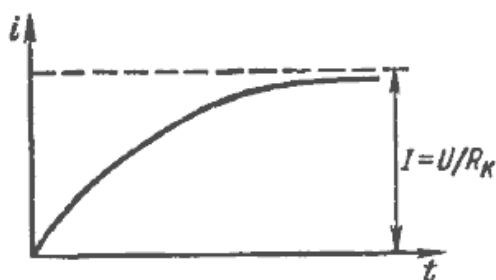


Рис. 3.20. Залежність струму у котушці від часу

Розв'язання. Так як струм у котушці у перший момент дорівнює нулю (рис. 3.20), уся напруга джерела йде на врівноваження ЕРС самоіндукції; отже, $U = -e_L$ звідки $e_L = -U = -100$ В.

При струмі, який встановився $I = \frac{U}{R_K} = \frac{100}{10} = 10$ А $W_L = LI^2/2 = 0,1 \cdot 100/2 = 5$ Дж.

Контрольні запитання

1. Наведіть характеристики магнітного поля.
2. Наведіть закон повного струму.
3. Поясніть поведінку провідника зі струмом у магнітному полі.
4. Навести закон електромагнітної індукції.
5. Що таке електрорушійна сила індукції в контурі?
6. Довести принцип Ленца.
7. Розкажіть про перетворення механічної енергії в електричну.
8. Розкажіть про перетворення електричної енергії в механічну.
9. Надайте визначення потокозчеплення котушки.
10. Що таке ЕРС самоіндукції. Енергія магнітного поля?

Глава 4. Змінний струм та кола змінного струму

4.1. Визначення, отримання і зображення змінного струму

Змінним називають струм, зміна якого за значенням і напрямком повторюється через рівні проміжки часу.

Широке застосування змінного струму в різних областях техніки пояснюється легкістю його отримання і перетворення, а також простотою пристрою генераторів і двигунів змінного струму, надійністю їх роботи і зручністю експлуатації. Розглянемо принцип дії найпростішого генератора змінного струму.

Між полюсами електромагніту або постійного магніту (рис. 4.1) розташований циліндричний ротор (якір), набраний з листів електротехнічної сталі. На якорі укріплена котушка, що розташована так, щоб індукція магнітного поля в ньому змінювалася за синусоїдальним законом:

$$B = B_m \sin \alpha,$$

де α - кут між площиною котушки і нейтральною площиною OO' .

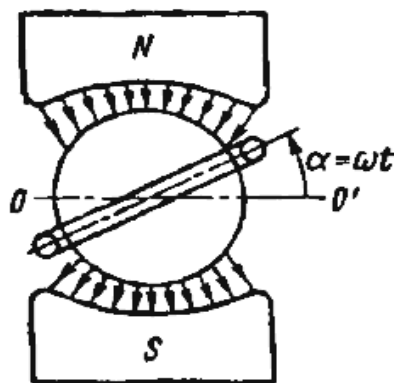


Рис. 4.1. Модель генератора змінного струму

Коли якір обертається в магнітному полі зі швидкістю ω , в активних сторонах котушки наводиться ЕРС індукції (активними називають сторони, що перебувають в магнітному полі генератора).

$$e_l = Blv \sin \beta,$$

де β - кут між напрямками векторів індукції магнітного поля B і швидкості v ; l - довжина активних сторін витків котушки.

Магнітне поле в зазорі розташоване так, що кут $\beta = \pi/2$. Таким чином,

$$e_l = Blv = B_m lv \sin \alpha = B_m \sin \omega t.$$

При кількості витків w число активних сторін котушки $2w$. Тоді ЕРС котушки:

$$e = e_l 2w = 2B_m wlv \sin \omega t = E_m \sin \omega t, \quad (4.1)$$

де $E_m = 2Bwlv$ – максимальне значення ЕРС.

Таким чином, ЕРС генератора змінюється за синусоїдальним законом. Якщо до затискачів генератора підключити навантаження, то через нього піде струм, який також буде змінюватися за синусоїдальним законом. Графік синусоїдального струму $i = I_m \sin \omega t$ представлений на рис. 4.2. По вісі ординат відкладають струм i , по вісі абсцис – кут $\alpha = \omega t$ або час t .

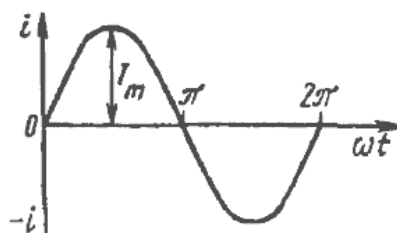


Рис. 4.2. Графік синусоїдального струму

4.2. Параметри змінного струму

Для кількісної характеристики змінного струму слугують наступні параметри.

1. Миттєві значення струму i , напруги u , ЕРС e – їх значення у будь-який момент часу: $i = I_m \sin \omega t$; $u = U_m \sin \omega t$; $e = E_m \sin \omega t$.

2. Амплітудні значення струму I_m , напруги U_m , ЕРС E_m – максимальне значення миттєвих величин i , u , і e (рис. 4.3).

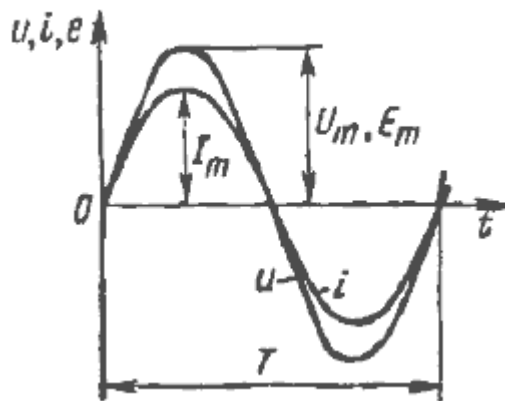


Рис. 4.3. До визначення параметрів змінного струму

3. Період T – проміжок часу, на протязі якого струм здійснює повне коливання і приймає попереднє за величиною та знаку миттєве значення. Період виражають у секундах (с), мілісекундах (мс) і мікросекундах (мкс).

4. Кутова швидкість ω характеризує швидкість обертання котушки генератора в магнітному полі. На практиці для отримання потрібної частоти при відносно малій кутовій швидкості генератори мають кілька пар полюсів p .

На рис. 4.4 показаний генератор з двома парами полюсів, в якому за один оборот котушки ЕРС змінює напрямок 4 рази або $2p$ разів. Отже, одному обороту котушки відповідає p періодів змінного струму. Введемо поняття електричного кута $\alpha_{ел}$: $\alpha_{ел} = p\alpha$. Тоді p визначає електричну кутову швидкість котушки:

$$\omega = \alpha_{ел}/(pT) = p2\pi/(pT) = 2\pi/T \quad (4.2)$$

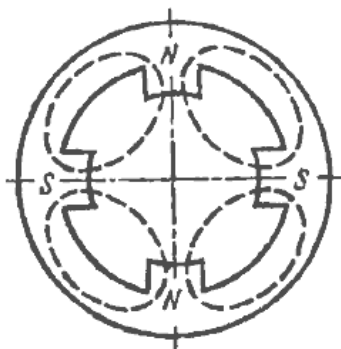


Рис. 4.4. Схема генератора з двома парами полюсів

де $p2\pi$ – електричний кут, що відповідний одному оберту котушки у просторі; pT – час, відповідний p періодам струму.

Таким чином, формула (4.2) визначає частоту обертання.

5. Циклічна частота f – величина, зворотна періоду T , тобто:

$$f = 1/T, \quad (4.3)$$

і характеризує кількість повних коливань струму за 1 с.

Одиницею циклічної частоти є герц (Гц):

$$[f] = 1/с = 1 \text{ Гц.}$$

Промисловою частотою в Україні є частота 50 Гц. Поширені також похідні одиниці циклічної частоти кілогерц (кГц), мегагерц (МГц) і гігаГерц (ГГц): $1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}$; $1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$; $1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$.

Зіставивши формули (4.2) і (4.3), отримаємо:

$$\omega = 2\pi f. \quad (4.4)$$

6. Діюче значення струму I , напруги U і ЕРС E . Для вимірювання змінного струму, напруги і ЕРС вводять поняття діючого значення. Змінний струм порівнюють з постійним за тепловою дією (рис. 4.5). Якщо положення реостатів підбрано так, що кількість теплоти, яка виділяється у схемах рис. 4.5, а, б на резисторі R , є однаковим, то можна вважати, що і струми у схемах однакові.

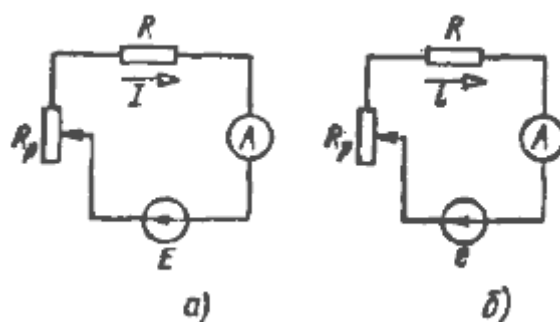


Рис. 4.5. До визначення поняття діючого значення змінного струму

Таким чином, діюче значення змінного струму рівне такому постійному струму, який за час, рівний одному періоду, виділяє на даному резисторі однакову кількість теплоти зі змінним струмом.

Контрольні запитання

1. Надати визначення про отримання і зображення змінного струму.
2. Охарактеризувати параметри змінного струму.

3. Що таке фаза змінного струму, зсув фаз?
4. Надати зображення синусоїдальних величин за допомогою векторів.
5. Поясніть, що таке додавання і віднімання синусоїдальних величин.
6. Охарактеризувати поверхневий ефект.

Глава 5. Трансформатори

5.1. Призначення трансформаторів та їх застосування

Трансформатор призначений для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги. Збільшення напруги здійснюється за допомогою підвищувальних трансформаторів, зменшення - понижуючих.

Трансформатори застосовують на лініях електропередачі, в техніці зв'язку, в автоматиці, вимірювальній техніці та інших областях.

Відповідно до призначення розрізняють: силові трансформатори для живлення електричних двигунів і освітлювальних мереж; спеціальні трансформатори для живлення зварювальних апаратів, електропечей та інших споживачів особливого призначення; вимірювальні трансформатори для підключення вимірювальних приладів.

За кількістю фаз трансформатори поділяються на одно- та трифазні. Трансформатори, що використовуються в радіотехніці, техніці зв'язку та в інших областях, поділяють на низько- та високочастотні.

Розрахункові потужності трансформаторів різні і становлять - від часток вольт-ампер до десятків тисяч кіловольт-ампер; робочі частоти - від одиниць герц до сотень кілогерц.

Трансформатор - простий, надійний і економічний електричний апарат. Він не має рухомих частин чи ковзних контактних з'єднань, його ККД досягає 99 %. ККД трансформатора η , який визначається як

відношення потужності на виході P_2 до потужності на вході P_1 , залежить від навантаження. Сучасні трансформатори розраховують таким чином, що максимум ККД досягається при навантаженні, що дорівнює приблизно половині номінального значення.

5.2. Будова трансформатора

Трансформатор являє собою замкнутий магнітопровід, на якому розташовані дві або кілька обмоток. У малопотужних високочастотних трансформаторах, використовуваних в радіотехнічних схемах, магнітопроводом може бути повітряне середовище.

Для зменшення втрат на гістерезис магнітопровід виготовляють з магнітом'якого матеріалу - трансформаторної сталі, що має вузьку петлю намагнічування. Для зменшення втрат на вихрові струми в матеріал магнітопроводу вводять домішку кремнію, що підвищує його електричний опір, а сам магнітопровід збирають з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 - 0,5 мм, ізольованих один від одного теплостійким лаком або спеціальним папером.

Розрізняють трансформатори стрижневого (рис. 5.1, а) і броньового (рис. 5.1, б) типів. Останній добре захищає обмотки котушок від механічних пошкоджень. Верхню частину, звану ярмом, кріплять після насадки на стрижень котушок (обмоток). Обмотки трансформаторів виготовляють з мідного дроту і розміщують на одному і тому ж або на різних стрижнях, поруч або одну під інший. В

останньому випадку безпосередньо до стрижня примикає обмотка нижчої напруги, а над нею розміщується обмотка вищої напруги.

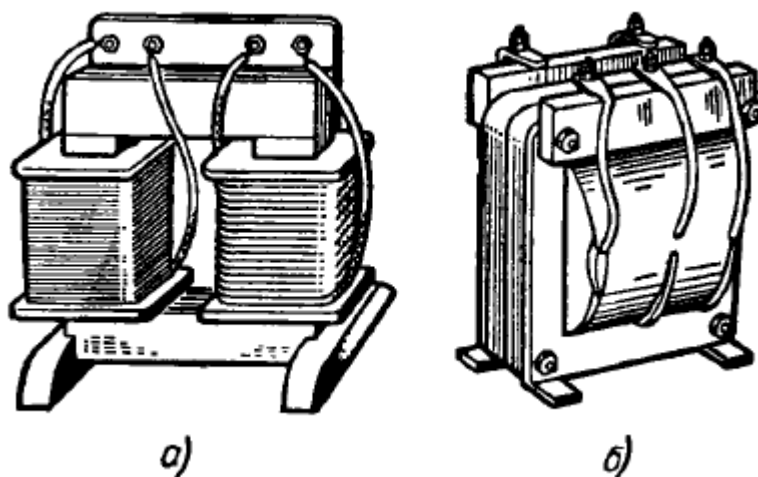


Рис. 5.1. Конструкція однофазного малопотужного трансформатора стрижневого (а) та броньового (б) типів

Обмотку трансформатора, до якої підводиться напруга мережі живлення, називають первинною, а обмотку, до якої приєднується навантаження, - вторинною. На осерді може бути розміщено декілька вторинних обмоток з різним числом витків, що дозволяє отримати різні за значенням вторинні напруги.

При роботі трансформатора за рахунок струмів в обмотках, а також внаслідок перемагнічування магнітопроводу й вихрових струмів виділяється теплота. Трансформатори невеликої потужності (до $10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$), для яких досить повітряного охолодження, називають сухими.

У потужних трансформаторах застосовують олійне охолодження (рис. 5.2). Магнітопровід 1 з обмотками 2, 3

розміщується в баку 4, заповненому мінеральною (трансформаторною) олією. Олія не тільки відводить теплоту за рахунок конвекції або примусової циркуляції, але і є хорошим діелектриком (ізолятором). Олійні трансформатори надійні в роботі і мають менші розміри і масу в порівнянні з сухими трансформаторами тієї ж потужності. При зміні температури об'єм олії змінюється. При підвищенні температури надлишок олії поглинається розширником 5, а при зниженні температури олія з розширювача повертається в основний бак.

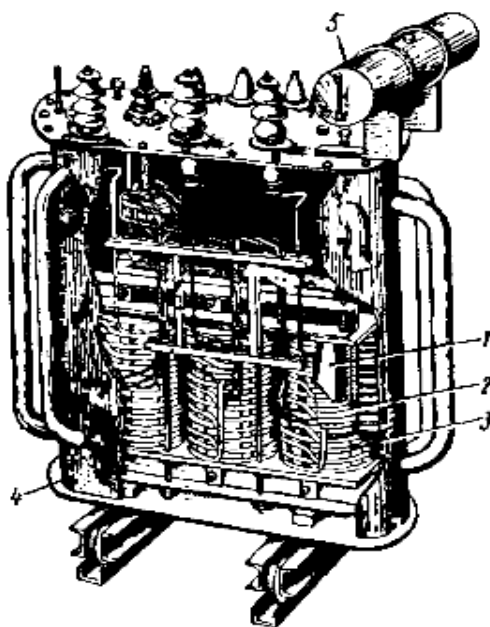


Рис. 5.2. Трифазний силовий трансформатор

У тих випадках, коли потрібно плавно змінювати вторинну напругу, застосовують ковзний контакт для зміни числа витків обмотки (приблизно так само, як це робиться в повзункових реостатах). Ковзний контакт широко використовується в

автотрансформаторах, розрахованих на регулювання напруги в невеликих межах (рис. 5.3).

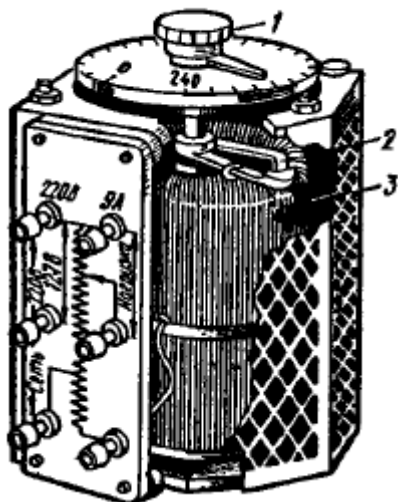


Рис. 5.3. Загальний вигляд автотрансформатора ЛАТР-1: 1 – ручка ковзного контакту; 2 – ковзний контакт; 3 - обмотка

5.3. Принцип дії однофазного трансформатора. Коефіцієнт трансформації

Робота трансформатора заснована на явищі взаємної індукції, яке є наслідком закону електромагнітної індукції.

Відношення чисел витків обмоток трансформатора називають коефіцієнтом трансформації.

На підставі закону електромагнітної індукції можна записати:

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Поділивши одне рівність на іншу, отримаємо

$$e_2/e_1 = \omega_2/\omega_1 = k.$$

Отже, в будь-який момент часу відношення миттєвих значень ЕРС вторинної та первинної обмоток дорівнює коефіцієнту трансформації. Не важко зрозуміти, що це можливо тільки при повному збігу по фазі ЕРС e_1 і e_2 .

Якщо коло вторинної обмотки трансформатора розімкнути (режим холостого ходу), то напруга на затискачах обмотки одно їй ЕРС: $U_2 = E_2$, а напруга джерела живлення майже повністю врівноважиться ЕРС первинної обмотки $U \approx E_1$. Отже, можна написати, що $k = E_2/E_1 \approx U_2/U_1$.

Таким чином, коефіцієнт трансформації може бути визначений на підставі вимірювань напруги на вході і виході ненавантаженого трансформатора.

З огляду на високий ККД трансформатора, можна вважати, що $S_1 \approx S_2$, де $S_1 = U_1 I_1$ - потужність, споживана з мережі; $S_2 = U_2 I_2$ - потужність, що віддана до навантаження.

Таким чином, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, звідки $I_1/I_2 \approx U_2/U_1 = k$.

Відношення струмів первинної і вторинної обмоток приблизно дорівнює коефіцієнту трансформації, тому струм I_2 в стільки разів збільшується (зменшується), у скільки разів зменшується (збільшується) U_2 .

5.4. Трифазні трансформатори

У лініях електропередачі використовують в основному трифазні силові трансформатори. Зовнішній вигляд, конструктивні особливості та компонування основних елементів цього

трансформатора представлені на рис. 5.2. Магнітопровід трифазного трансформатора має три стрижня, на кожному з яких розміщуються дві обмотки однієї фази (рис. 5.4).

Для підключення трансформатора до ліній електропередачі на кришці бака є вводи, що представляють собою порцелянові ізолятори, всередині яких проходять мідні стрижні.

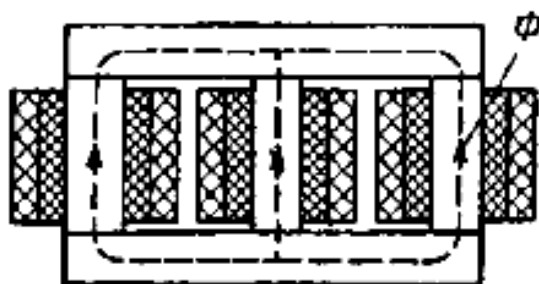


Рис. 5.4. Розміщення обмоток н осерді трифазного трансформатора

Підведення більшої напруги позначають буквами A, B, C , вводи нижчої напруги - буквами a, b, c . Введення нульового дроту у своєму розпорядженні зліва від введення a позначають O (рис. 5.5).

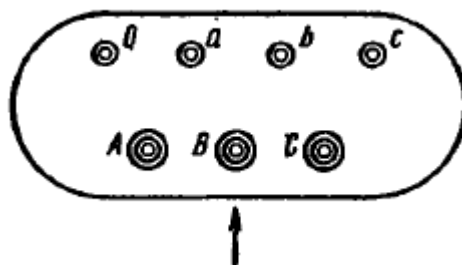


Рис. 5.5. Розташування та маркування виводів на кришці баку трансформатора

Принцип роботи, а також електромагнітні процеси в трифазному трансформаторі аналогічні розглянутим раніше. Особливістю трифазного трансформатора є залежність коефіцієнта трансформації лінійної напруги від способу з'єднання обмоток.

5.5. Автотрансформатори та вимірювальні трансформатори

Принципова схема автотрансформатора зображена на рис. 5.6. У автотрансформатора частина витків первинної обмотки використовується в якості вторинної обмотки, тому крім магнітного зв'язку є ще електричний зв'язок між первинним і вторинним колами. Відповідно до цього енергія з первинного кола у вторинний передається як за допомогою магнітного потоку, що замикається за магнітопроводом, так і безпосередньо по дротах.

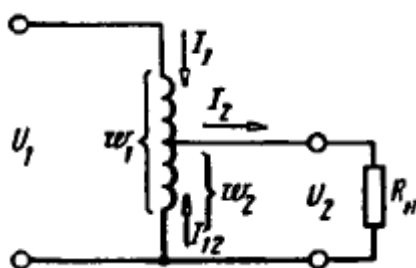


Рис. 5.6. Принципова схема автотрансформатора

Оскільки формула трансформаторної ЕРС може бути застосована до обмоток автотрансформатора так само, як і до обмоток трансформатора, коефіцієнт трансформації автотрансформатора виражається відомими відношеннями:

$$k = \omega_2/\omega_1 = E_2/E_1 \approx U_2/U_1 \approx I_1/I_2.$$

Внаслідок електричного з'єднання обмоток через частину витків, що належать одночасно первинному та вторинному колам, проходять струми I_1 і I_2 , які спрямовані зустрічно і при невеликому коефіцієнті трансформації мало відрізняються один від одного за значенням. Тому їх різниця виявляється невеликою й обмотку ω_2 можна виконати з тонкого дроту. Таким чином, при $k = 0,5 \div 2$ економиться значна кількість міді. При більших або менших коефіцієнтах трансформації ця перевага автотрансформатора зникає, так як та частина обмотки, по якій проходять зустрічні струми I_1 і I_2 , зменшується до кількох витків, а сама різниця струмів збільшується.

Електричне з'єднання первинного та вторинного кіл підвищує небезпеку при експлуатації апарату, так як при пробіі ізоляції в зменшуваному автотрансформаторі оператор може опинитися під високою напругою первинного кола.

Автотрансформатори застосовують для пуску потужних двигунів змінного струму, регулювання напруги в освітлювальних мережах, а також в інших випадках, коли необхідно регулювати напругу в невеликих межах.

Вимірювальні трансформатори напруги і струму використовують для включення вимірювальних приладів, апаратури автоматичного регулювання та захисту в високовольтних колах. Вони дозволяють зменшити розміри і масу вимірювальних пристроїв, підвищити безпеку обслуговуючого персоналу, розширити межі вимірювання приладів змінного струму.

Вимірювальні трансформатори напруги служать для включення вольтметрів і обмоток напруги вимірювальних приладів (рис. 5.7).

Оскільки ці обмотки мають великий опір і споживають незначну потужність, можна вважати, що трансформатори напруги працюють у режимі холостого ходу.

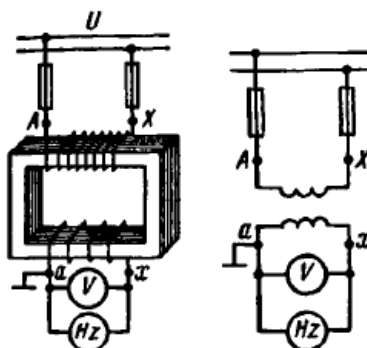


Рис. 5.7. Схема вмикання та умовне позначення вимірювального трансформатора напруги

Вимірювальні трансформатори струму використовують для включення амперметрів та струмових котушок вимірювальних приладів (рис. 5.8). Ці котушки мають дуже маленький опір, тому трансформатори струму практично працюють у режимі короткого замикання.

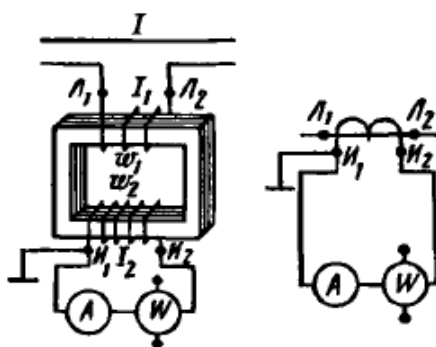


Рис. 5.8. Схема вмикання та умовне позначення вимірювального трансформатора струму

Трансформатор струму не можна включати в лінію без приєднаного до нього вимірювального приладу. Для підвищення

безпеки обслуговуючого персоналу кожух вимірювального трансформатора повинен бути ретельно заземлений.

5.6. Зварювальні трансформатори

До джерел живлення зварювальних апаратів ставляться специфічні вимоги: при заданій потужності вони повинні створювати великі струми в навантаженні, причому різка зміна опору навантаження не повинна істотно позначатися на значенні зварювального струму.

Відносно невисокі напруги при великих токах забезпечують не тільки ефективне тепловиділення в зварювальному контакті, а й безпеку зварника, який працює зазвичай серед металевих конструкцій, що мають високу електропровідність.

Відповідно до розглянутих вимог, зварювальні трансформатори забезпечують зниження напруги від 220 або 380 В до 60 - 70 В. Така напруга на затискачах вторинної обмотки встановлюється при холостому ході зварювального трансформатора. У процесі зварювання вона коливається від максимального значення 60-70 В до значень, близьких до нуля. Опір електричної дуги, що виникає під час зварювання, змінюється при переміщеннях руки зварника. Тому зварювальний трансформатор влаштований так, що при різкому зменшенні опору дуги, струм у колі збільшується незначно, а добуток I^2R , що визначає кількість теплоти, зберігається на необхідному рівні.

Відповідно до закону Ома при різкому зменшенні опору і незначному збільшенню струму, напруга на дузі знижується. Зварювальний трансформатор має круто падаючу зовнішню характеристику (рис. 5.9).

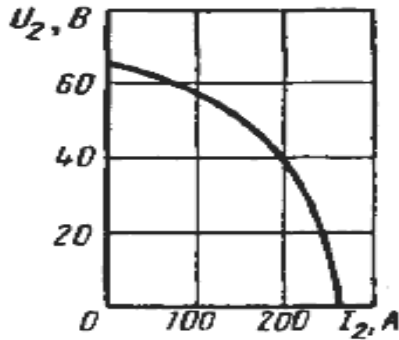


Рис. 5.9. Зовнішня характеристика зварювального трансформатора

Зварювальний трансформатор витримує короткі замикання, що виникають у разі дотику електрода до зварювального шву. Струм короткого замикання, як показує зовнішня характеристика, обмежений. Вторинна обмотка трансформатора розрахована на досить тривалий перебіг цього струму.

При постійній напрузі мережі живлення, швидке зниження вихідної напруги трансформатора при незначному зростанні струму може бути досягнуто тільки за рахунок збільшення внутрішнього падіння напруги в обмотках трансформатора. Для цього потрібно збільшити опір обмоток.

Зварювальні трансформатори виготовляють з великим регульованим індуктивним опором обмоток. При цьому збільшується не активний опір дротів, а індуктивний опір розсіювання обмоток, так

як збільшення активного опору призвело б до зростання втрат енергії і перегріву трансформатора. Для збільшення індуктивного опору розсіювання обмоток збільшують потік розсіювання, вводячи в магнітопровід трансформатора магнітопровідний стрижень, що шунтує, через який замикається частина основного магнітного потоку. Змінюючи значення повітряного зазору в стрижні, що шунтує, можна змінювати магнітний потік розсіювання. .

Контрольні запитання

1. Яке призначення трансформаторів та їх застосування?
2. Охарактеризувати будову трансформатора.
3. Надати формулу трансформаторної електрорушійної сили.
4. Охарактеризувати принцип дії однофазного трансформатора.
5. Що таке коефіцієнт трансформації?
6. Охарактеризувати трифазні трансформатори.
7. Охарактеризувати автотрансформатори та вимірювальні трансформатори.
8. Охарактеризувати зварювальні трансформатори.

Глава 6. Електричні машини змінного і постійного струму

6.1. Обертове магнітне поле

Обертове магнітне поле двофазного струму. Розглянемо виникнення обертового магнітного поля на прикладі двофазного синусоїдального струму і двох котушок, зсунутих у просторі одна відносно іншої на кут 90° .

Котушка 1 створює магнітне поле, силові лінії якого перпендикулярні її площині. На рис. 6.1 це магнітне поле представлено вектором магнітної індукції B_1 . Магнітне поле котушки 2 характеризується вектором магнітної індукції B_2 . До котушки 1 підводиться синусоїдальний струм $i_1 = I_m \sin \omega t$, до котушки 2 – струм:

$$i_2 = I_m \sin(\omega t + \pi/2) = I_m \cos \omega t.$$

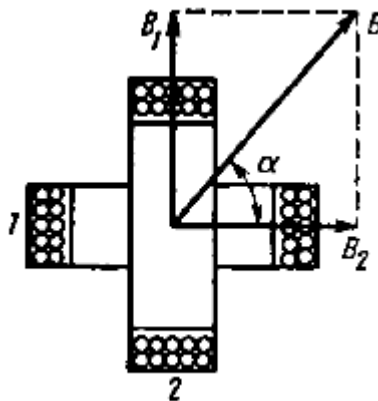


Рис. 6.1. Утворення обертового магнітного поля за допомогою двох котушок

Індукція магнітного поля пропорційна струму, що його створює, отже,

$$B_1 = B_m \sin \omega t ;$$

$$B_2 = B_m \cos \omega t.$$

Магнітні поля котушок, накладаючись одне на одного, утворюють результуюче поле. Модуль вектору індукції результуючого магнітного поля визначається з векторної діаграми за теоремою Піфагора:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Це означає, що магнітні поля першої та другої котушок змінюються так злагоджено, що результуюче поле залишається постійним за значенням.

Напрямок силових ліній результуючого магнітного поля характеризується напрямком вектору B , який утворює кут α з горизонтальною віссю, що визначається з виразу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1}{B_2} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$

Звідси $\alpha = \omega t$, тобто вектор B обертається проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю ω , що дорівнює кутовій швидкості синусоїдального струму.

Результуюче магнітне поле котушок можна уявити як поле постійного магніту, який повертається в просторі (рис. 6.2). Таке поле називають *обертвим*. Неважко переконатися, що результуюче магнітне поле котушок буде обертатися у зворотний бік, якщо поміняти фази струмів.

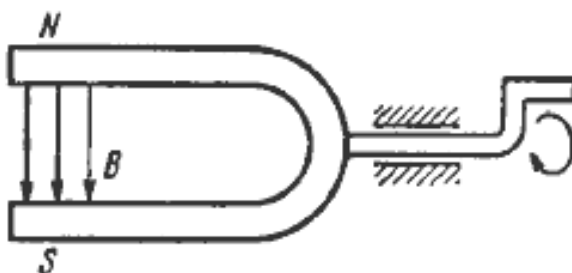


Рис. 6.2. Модель обертового магнітного поля

Частоту обертання магнітного поля прийнято виражати кількістю оборотів за хвилину. Тоді $n_1 = 60f$.

Магнітне поле струмів аналогічно полю чотирьополюсного постійного магніту, причому протягом половини періоду струму поле робить тільки чверть обороту, а повний оборот робиться за два періоди. Таким чином, якщо в два рази збільшити кількість пар полюсів, то частота обертання поля зменшиться в два рази. Легко показати, що збільшення кількості пар полюсів у три рази, зменшило б частоту обертання поля також в три рази, тобто в загальному випадку $n_1 = 60f/p$, де p - число пар полюсів. При $p = 1$ ця формула збігається з попередньою.

Обертове магнітне поле трифазного струму. Для створення обертового магнітного поля за допомогою трифазної системи струмів потрібні три котушки, що зсунуті в просторі на 120° одна відносно іншої (рис. 6.3).

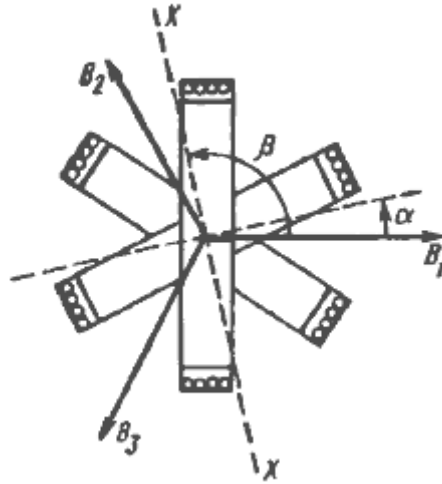


Рис. 6.3. Утворення обертового магнітного поля
за допомогою трьох котушок

Магнітна індукція, яка створювана при цьому кожної котушкою, пропорційна відповідному струму:

$$B_1 = B_m \sin \omega t ;$$

$$B_2 = B_m \sin(\omega t - 120^\circ) ;$$

$$B_3 = B_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Напрямок обертання поля визначається порядком проходження фаз. Для зміни напрямку обертання поля досить поміняти місцями будь-які дві фази з трьох.

На закінчення відзначимо, що для отримання неспотвореного обертового магнітного поля система котушок повинна бути повністю симетричною, а струми повинні бути однаковими за амплітудою та частотою й зсунутими за фазою на 120° один відносно іншого.

6.2. Будова асинхронного двигуна

Асинхронний двигун є найпростішою з електричних машин. Як і будь-яка електрична машина, він має дві основні частини: статор та ротор.

Статор (рис. 6.4) складається з чавунної станини 1, в якій закріплений магнітопровід 2 у вигляді порожнього циліндра. Між станиною та сердечником зазвичай залишають зазор, через який проходить охолоджуюче повітря. Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід набирають з тонких (0,5 мм) листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного лаком. У пази, що вирізані на внутрішньому колі статора, укладають обмотку 3. У дво полюсної машини обмотка статора складається з трьох котушок, зсунутих на кути 120° , у чотири полюсній - з шести котушок, зсунутих на 60° , у шести полюсній - з дев'яти котушок і т. д. Обмотку в пазах статора закріплюють клинами.

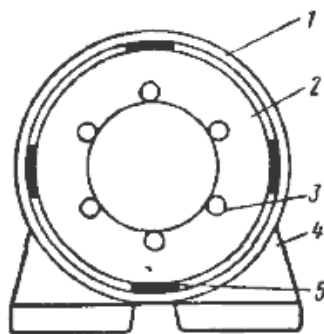


Рис. 6.4. Конструкція статора асинхронного двигуна:

1 – станина; 2 – сердечник; 3 – обмотка; 4 – лапа; 5 – прокладка

Ротор також набирають з тонких листів електротехнічної сталі. У пазах ротора розміщують обмотку, яка може бути короткозамкнутою, див. рис. 6.5.

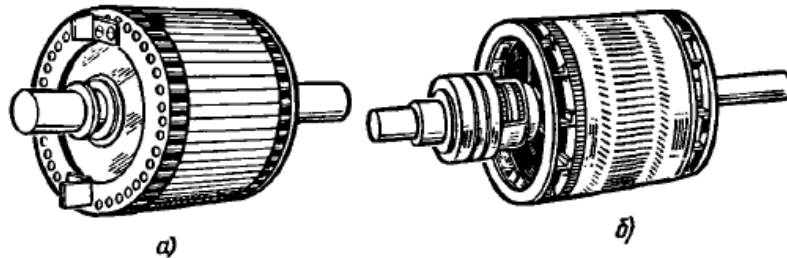


Рис. 6.5. Загальний вигляд ротора асинхронного двигуна з короткозамкнутою (а) та фазною (б) обмотками

Короткозамкнена обмотка типу "Біляча клітка" зображена на рис. 6.6. Вона складається з товстих смуг (мідь, алюміній), з'єднаних по торцях мідними або алюмінієвими кільцями. Короткозамкнена обмотка не ізолювана від ротора. Іноді її виготовляють заливанням розплавленого алюмінію в пази ротора.

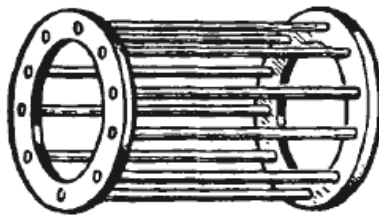


Рис. 6.6. Загальний вигляд короткозамкненої обмотки типу «біляча клітка»

Конструкція фазної обмотки ротора аналогічна конструкції обмотки статора. Кінці фазної обмотки ротора з'єднують з контактними кільцями й через щітки з'єднують з регулювальними або пусковими реостатами 3 (рис. 6.7).

Контактні кільця 1, які виготовляють з латуні або міді, укріплюють на валу двигуна за допомогою ізолюючих прокладок. Щіткотримач з вугільними або мідно-графітовими щітками 2 закріплюють на підшипниковому щиті.

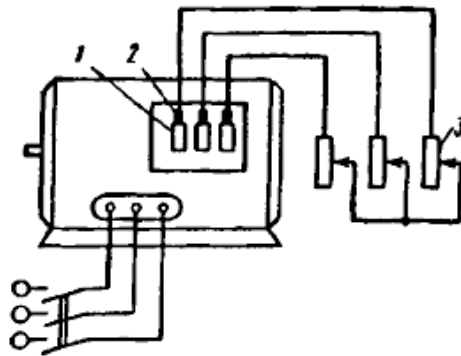


Рис. 6.7. Схема з'єднання фазної обмотки ротора з регулювальними реостатами: 1 – контактні кільця; 2 – щітки; 3 – реостати

Загальний вигляд асинхронного двигуна показаний на рис. 6.8.

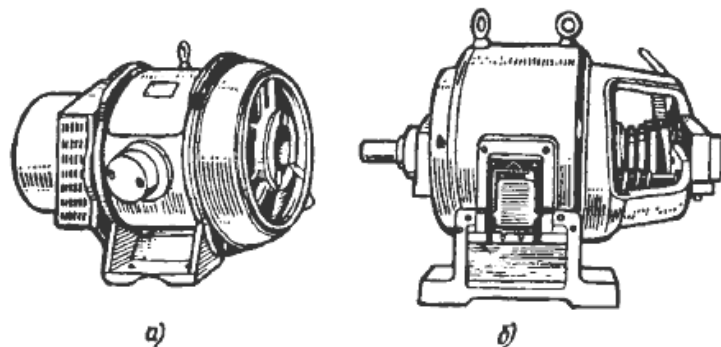


Рис. 6.8. Загальний вигляд асинхронного двигуна з короткозамкненою (а) та фазною (б) обмотками ротора

6.3. Принцип дії асинхронного двигуна. Фізичні процеси, що відбуваються при розкручуванні ротора

Принцип дії асинхронного двигуна заснований на використанні обертового магнітного поля та основних законів електротехніки.

При включенні двигуна в мережу трифазного струму в статорі утворюється обертове магнітне поле, силові лінії якого перетинають стрижні або котушки обмотки ротора. Відповідно до закону електромагнітної індукції, в обмотці ротора наводиться індукція ЕРС, пропорційна частоті перетину силових ліній. Під дією індукованої ЕРС в короткозамкненому роторі виникають значні струми.

Відповідно до закону Ампера на провідники зі струмом, що знаходяться в магнітному полі, діють механічні сили, які за принципом Ленца прагнуть усунути причину, яка викликає індукований струм, тобто перетин стрижнів обмотки ротора силовими лініями обертового поля. Таким чином, механічні сили, що при цьому виникають будуть розкручувати ротор у напрямку обертання поля, зменшуючи швидкість перетину стрижнів обмотки ротора магнітними силовими лініями. Досягти частоти обертання поля в реальних умовах ротор не може, так як тоді стрижні його обмотки виявилися б нерухомими щодо магнітних силових ліній, а індуковані струми в обмотці ротора зникли б. Тому ротор обертається з частотою, меншою частоти обертання поля, тобто не синхронно (асинхронно) з полем.

Якщо сили, які гальмують обертання ротора, невеликі, то ротор досягає частоти, близькою до частоти обертання поля. При

збільшенні механічного навантаження на валу двигуна частота обертання ротора зменшується, струми в обмотці ротора збільшуються, що призводить до збільшення крутильного моменту двигуна. При деякій частоті обертання ротора встановлюється рівновага між гальмівним та обертовим моментами.

6.4. Ковзання та частота обертання ротора

Позначимо через n_2 частоту обертання ротора асинхронного двигуна. Вище було встановлено, що $n_2 < n_1$.

Частоту обертання магнітного поля відносно ротора, тобто різницю $n_1 - n_2$, називають ковзанням. Зазвичай ковзання виражають у частках частоти обертання поля і позначають буквою s :

$$s = (n_1 - n_2)/n_1.$$

Ковзання залежить від навантаження двигуна. При номінальному навантаженні його значення складає біля 0,05 у машин невеликої потужності і біля 0,02 у потужних машин.

З останньої рівності знаходимо, що $n_2 = (1 - s)n_1$.

Після перетворення отримуємо вираз частоти обертання двигуна,

$$\text{який буде зручним для подальших міркувань: } n_2 = (1 - s) \frac{60f}{p}.$$

Оскільки при нормальному режимі роботи двигуна ковзання невелике, частота обертання двигуна мало відрізняється від частоти обертання поля. На практиці, ковзання часто виражають у процентах:

$$b = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100.$$

У більшості асинхронних двигунів ковзання коливається у межах 2 - 5%.

Ковзання є однією з найважливіших характеристик двигуна; через нього виражаються ЕРС і струм ротора, обертаючий момент, частота обертання ротора.

При нерухомому $n_2 = 0$ роторі $s = 1$. Таким ковзанням володіє двигун у момент пуску.

Як зазначалося, ковзання залежить від моменту навантаження валу двигуна; отже, і частота обертання ротора залежить від гальмівного моменту на валу. Номінальне значення частоти обертання ротора, що відповідає розрахунковим значенням навантаження, частоті і напрузі мережі, вказується на заводському щитку асинхронного двигуна.

Асинхронні машини, як і інші електричні машини, зворотні. При $0 < s \leq 1$ машина працює в режимі двигуна, частота обертання ротора n_2 менше або дорівнює частоті обертання магнітного поля статора n_1 . Але якщо зовнішнім двигуном розкрутити ротор до частоти обертання більшої синхронної частоти: $n_2 > n_1$, то машина перейде у режим роботи генератора змінного струму. При цьому ковзання стане негативним, а механічна енергія привідного двигуна буде перетворюватися в електричну енергію.

До асинхронних машин повністю застосована формула для трансформаторної ЕРС. Поки ротор асинхронного двигуна нерухомий, його обмотка перетинається з обертовим магнітним полем з частотою n_1 . Позначимо діюче значення ЕРС однієї фази

нерухомого ротора E_{2n} . Тоді формула для трансформаторної ЕРС набуде вигляду:

$$E_{2n} = 4,44\omega_2 k_2 f_2 \Phi,$$

де ω – число витків однієї фази обмотки ротора; k_2 – коефіцієнт обмотки ротора; f_1 – частота струму мережі живлення; Φ – обертовий магнітний потік.

Обертовий коефіцієнт завжди менший за одиницю і у сучасних асинхронних машинах складає 0,85 - 0,95. Він обумовлений тим, що у машині змінного струму витки обмотки розподілені по внутрішній поверхні статора і не одночасно перетинаються магнітним потоком. Тому ЕРС окремих витків зрушені по фазі відносно одна одній і складаються не арифметично, як у трансформаторі, а геометрично (рис. 6.9).

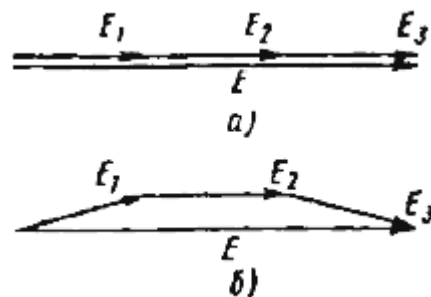


Рис. 6.9. Складання окремих витків у трансформаторі (а) і в машині змінного струму

При нерухомому роторі частота, що індукована в його обмотці ЕРС дорівнює частоти мережі f_1 . По мірі розкручування ротора швидкість $n_1 - n_2$ перетину витків обмотки обертальним магнітним полем зменшується, а отже, зменшується частота ЕРС у обмотці ротора: $f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}$.

Щоб ввести ковзання у вираз для f_2 , помножимо чисельник і знаменник на n_1 :

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)n_1}{60n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \frac{pn_1}{60} = sf_1.$$

Таким чином, частота ЕРС у обмотці ротора прямо пропорційна ковзанню.

Тепер можна записати вираз для ЕРС обмотки ротора у загальному вигляді:

$$E_2 = 4,44\omega_2 k_2 f_2 \Phi = 4,44\omega_2 k_2 s f_1 \Phi.$$

Порівняємо вирази для E_{2n} і E_2 і знайдемо, що $E_2 = sE_{2n}$.

ЕРС E_2 , що індукована в обмотці ротора обертальним магнітним полем, є прямо пропорційна ковзанню двигуна.

6.5. Обертальний момент асинхронного двигуна

Обертальний момент будь-якого електричного двигуна завжди виникає в результаті взаємодії магнітного поля і провідників зі струмом. У двигуні постійного струму обертальний момент виражається формулою:

$$M = c_M I \Phi.$$

В асинхронному двигуні обертальний момент виражається аналогічною формулою. Потрібно тільки встановити, яке значення струму повинно бути використане. Повний струм I_2 в обмотці ротора складається з активної $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2$ і реактивної $I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2$ складових. Припустимо, що активна складова струму ротора дорівнює нулю. Тоді, не дивлячись на наявність ЕРС E_2 і струму I_2 в

обмотці ротора, активна потужність цієї обмотки була б рiна нулю. Але ротор, який не споживає активну потужність, не може створювати оберального моменту, так як момент $M = P/\omega$ буде дорiвнювати нулю при $P = 0$. Отже, реактивна складова струму ротора не приймає участi у створеннi оберального моменту i можна записати $M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2$, тобто оберальний момент асинхронного двигуна пропорцiйний результуючому магнiтному потоку i активнiй складовiй струму в обмотцi ротора.

Залежнiсть частоти обертання двигуна вiд моменту на валу при постiйних напрузi живлення i частотi мережi називають механiчною характеристикою (рис. 6.10). Вона може бути знята експериментально i легко отримана на основi графiка $M(s)$.

Зi збiльшенням моменту навантаження, частота обертання двигуна зменшується незначно. Якщо момент навантаження перевищить максимальний, то частота обертання двигуна лавино подiбно зменшиться до нуля.

Частота обертання асинхронного двигуна залежить вiд напруги живлення.

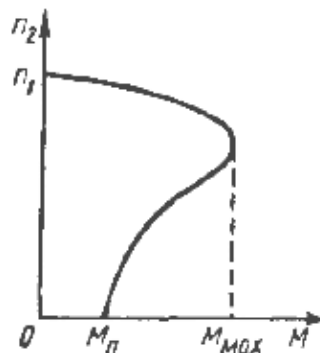


Рис. 6.10. Механiчна характеристика асинхронного двигуна

Можна показати, що обертальний момент M пропорційний квадрату напруги живлення. Тому навіть невеличкі коливання напруги живлення призводять до помітної зміни обертального моменту і частоти обертання двигуна.

6.6. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна

Сучасні асинхронні двигуни не мають простих і економічних пристроїв для плавного регулювання частоти обертання ротора. Цей істотний недолік обмежує область їх застосування і дозволяє двигунам постійного струму у багатьох випадках успішно конкурувати з асинхронними двигунами.

З виведеної формули частоти обертання асинхронного двигуна видно, що частоту n_2 можна регулювати змінюючи ковзання s , число пар полюсів p або частоту напруги живлення f .

Плавне регулювання частоти обертання двигуна за рахунок зміни ковзання можливе тільки у двигунах з фазним ротором. На рис. 6.11 видно, що ковзання при незмінному моменті навантаження залежить від активного опору обмотки ротора. Тому у коло цієї обмотки за допомогою контактних кілець щіток вмикають регулювальний реостат, яким плавно змінюють опір обмотки, ковзання та частоту обертання двигуна. Цей спосіб пов'язаний з великими тепловими втратами. При $s = 0,5$ половина енергії, яка передається у ротор обертальним магнітним полем, витрачається на нагрів ротора та регулювального реостата. Окрім того, наявність

кілець та щіток ускладнює експлуатацію машини і різко знижує її надійність.

Ковзання, а отже, і частоту обертання двигуна у невеликих межах можна регулювати зміною напруги, яка підводиться до двигуна.

Ступінчате регулювання частоти обертання можна здійснювати зміною числа пар полюсів статора двигуна за рахунок перемикання секцій його обмотки. Однак цей економічний і порівняно простий спосіб не дозволяє регулювати частоту обертання двигуна плавно. Промисловість випускає двигуни, частоту обертання яких можна регулювати ступенями у 2, 3 і 4 рази.

Частоту обертання двигуна можна регулювати також зміною частоти струму живлення, але цей спосіб практично не застосовують через відсутність простих та економічних пристроїв для регулювання частоти струму у потужних електричних колах. Частота струму визначається частотою обертання ротора генератора, яку при паралельній роботі генераторів, необхідно підтримувати постійною. Таким чином, у даному випадку необхідний окремий генератор для кожного двигуна, що недоцільно.

Розробка і промислове освоєння потужних керованих напівпровідникових діодів дозволяє створити статичні пристрої з вихідною напругою, частоту якої можна регулювати. Ці прості, економічні і надійні перетворювачі частоти для регулювання частоти обертання коротко замкнутих асинхронних двигунів значно спрощує привід різних механізмів: відпадає необхідність у редукторах, коробках швидкостей, трансмісіях.

В деяких випадках виникає необхідність регулювання не тільки частоту, але і напрям обертання двигуна. Зміна напрямку обертання ротора двигуна називають реверсуванням.

Для реверсування двигуна необхідно змінити напрям обертання магнітного поля статора. При розгляданні обертального магнітного поля було встановлено, що напрям його обертання визначається порядком чергування фаз. Тому для реверсування двигуна достатньо поміняти місцями дві будь-які фази на клемовій колодці двигуна.

6.7. Коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності асинхронного двигуна

ККД асинхронного двигуна залежить від навантаження. При номінальному режимі роботи двигуна $\eta = 0,9 \div 0,95$. Чим більша розрахункова потужність двигуна, тим вище його ККД.

Важливою характеристикою асинхронного двигуна є його коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. Він показує, яка частина повної потужності, що надходить з мережі, витрачається на покриття втрат і перетворюється у механічну роботу. Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна залежить від навантаження, досягаючи значень 0,7 - 0,8 при номінальному режимі роботи і знижуючись до 0,2 - 0,3 при холостому ході.

Низьке значення $\cos \varphi$ асинхронного двигуна пояснюється тим, що для створення магнітного потоку у магнітопроводі з повітряними проміжками необхідний великий намагнічуючий струм, який є реактивним і, зі збільшенням повітряного проміжку, зростає.

Конструктивний вибір повітряного проміжку залежить від багатьох причин: жорсткості валу, його центрування, допустимого зносу магнітопроводу та ін.

При низькому $\cos \varphi$ мережа навантажується реактивними струмами і не може забезпечити живлення розрахункового числа споживачів. Тому при експлуатації асинхронного двигуна слід прагнути до підвищення його $\cos \varphi$, зокрема необхідно забезпечувати двигун корисним навантаженням, близько до номінального.

6.8. Однофазний асинхронний двигун

На статорі однофазного асинхронного двигуна розміщується одна обмотка, синусоїдальний струм у якій створює пульсуючий магнітний потік.

Для створення пускового моменту на статорі однофазного двигуна розміщують додаткову пускову обмотку, розраховану на короткочасну роботу. Цю обмотку вмикають через конденсатор, внаслідок чого струм у ній зміщений по фазі відносно струму основної обмотки (рис. 6.12).

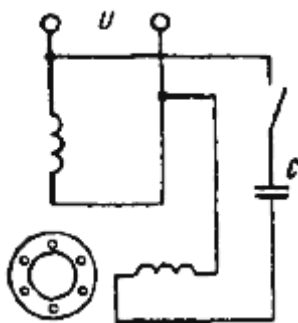


Рис. 6.12. Схема пуску однофазного асинхронного двигуна

Утворене двофазне обертальне магнітне поле розкручує ротор. По закінченню пуску, живлення пускової обмотки повинно бути вимкнене.

Однофазні асинхронні двигуни отримали велике поширення у побутових приладах. Їх потужність зазвичай не перевищує 500 Вт.

Іноді у якості однофазного використовують трифазний асинхронний двигун, у якого в коло однієї з обмоток статора увімкнений конденсатор (рис. 6.13).

При з'єднанні обмоток зіркою пускову ємність підраховують по формулі:

$$C = P \cdot \frac{10^9}{314U^2},$$

де P – потужність двигуна, кВт; U – напруга мережі, В; C – ємність конденсатора, мкФ .

При з'єднанні обмоток трикутником пускова ємність у три рази більша, ніж у попередньому випадку.

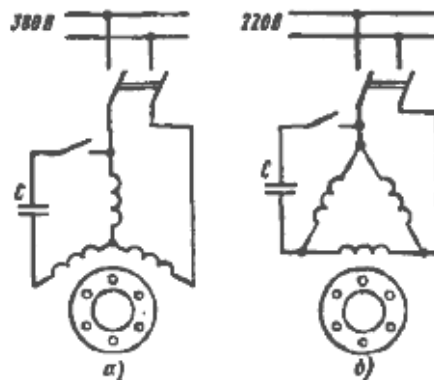


Рис. 6.13. Схеми увімкнення трифазного асинхронного двигуна в однофазне коло при з'єднанні обмоток: а – зіркою, б – трикутником

При роботі в однофазному режимі трифазний двигун без перегріву розвиває 60 - 70 % номінальної потужності. Недолік цих схем – необхідність у дорогих конденсаторах великої ємності, приблизно 10 мікрофарад на кожні 100 Вт потужності двигуна при з'єднанні його обмоток трикутником.

6.9. Синхронний генератор

Ротор синхронних машин обертається синхронно з обертальним магнітним полем (звідси їх назва). Оскільки частота обертання ротора і магнітного поля однакові, то в обмотці ротора струми не індуковані. Тому обмотка ротора отримує живлення від джерела постійного струму.

Будова статора синхронної машини (рис. 6.14) практично не відрізняється від пристрою статора асинхронної машини. У пази статора вкладають трифазну обмотку, кінці якої виводять на клемову панель. Ротор у деяких випадках виготовляють у вигляді постійного магніту.

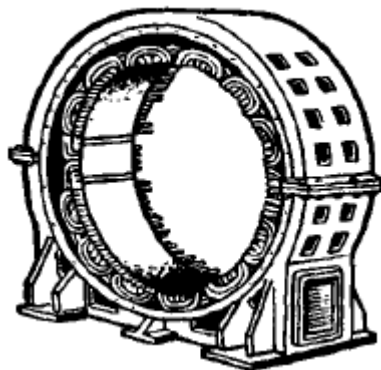


Рис. 6.14. Загальний вигляд статора синхронного генератора

Ротори синхронних генераторів можуть бути явно полюсними (рис. 6.15) та неявно полюсними (рис. 6.16). У першому випадку синхронні генератори приводяться у дію тихохідними турбінами гідроелектростанцій, у другому – паровими або газовими турбінами теплоелектростанцій. Живлення до обмотки ротора підводиться через ковзні контакти, які складаються з мідних кілець та графітових щіток.

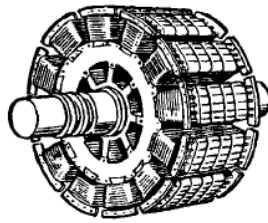


Рис. 6.15. Загальний вигляд явно полюсного ротора синхронного генератора

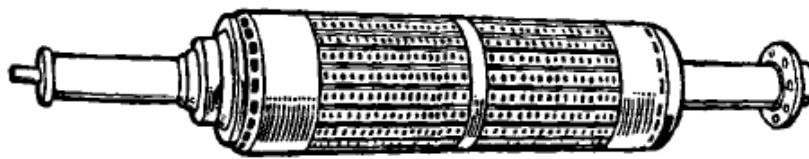


Рис. 6.16. Загальний вигляд неявно полюсного ротора синхронного генератора

При обертанні ротора його магнітне поле перетинає витки обмотки статора, створюючи у них індуковані ЕРС. Щоб отримати синусоїдальну форму ЕРС, проміжок між поверхнею ротора та статором збільшують від середини полюсного наконечника до його країв (рис. 6.17).

Частота індукованих ЕРС (напруги, струму) синхронного генератора:

$$f = pn/60,$$

де p – число пар полюсів ротора генератора.

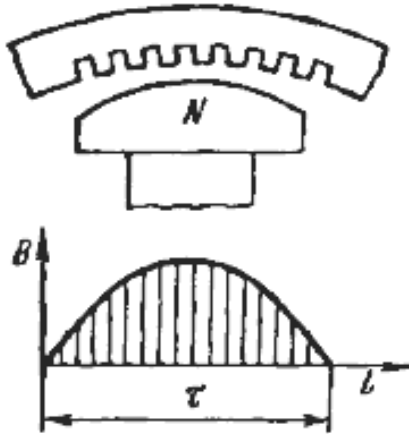


Рис. 6.17. Форма повітряного проміжку і розподіл магнітної індукції по поверхні ротора в синхронному генераторі

Відношення $n/60$ визначає число обертів ротора за секунду; при $p = 1$ кожне обертання ротора відповідає повному циклу змін індукваного змінного струму (одному періоду); при збільшенні - відповідно збільшується і число періодів струму, індукваного за одне обертання ротора. Як і в будь-якого генератора, який працює по закону електромагнітної індукції, індуквана ЕРС пропорційна магнітному потоку машини і частоті обертання ротора.

Використовують різні способи збудження синхронних генераторів. Широке розповсюдження отримав синхронний генератор з машинним збуджувачем, який представляє собою генератор постійного струму, який розташований на одному валу з синхронним генератором. Машинний збуджувач приводиться в дію

від того ж первинного двигуна, що і синхронний генератор. Вихідні затискачі збуджувача через щітки та кільця приєднуються до обмотки ротора синхронного генератора. Напругу синхронного генератора можна регулювати реостатом у колі обмотки збуджувача, що зручно і енергетично вигідно, так як у цій обмотці протікають порівняно невеликі струми.

Знаходять також застосування генератори з самозбудженням.

З характеристик синхронного генератора найбільш практичний інтерес представляють зовнішні характеристики, які виражають залежність напруги на затискачах генератора від струму навантаження при незмінних значеннях струму збудження, частоти і коефіцієнта потужності.

6.10. Синхронний двигун

Конструкція статора синхронного двигуна аналогічна конструкції статора асинхронного двигуна. Ротор синхронного двигуна представляє собою електромагніт або постійний магніт (рис. 6.18).

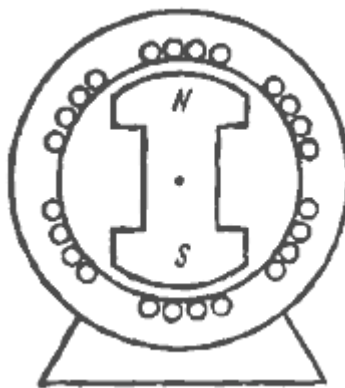


Рис. 6.18. Схематичне зображення синхронного двигуна

Принцип роботи синхронного двигуна пояснюється рис. 6.19. Всередині магніту N_1S_1 розміщений магніт NS . Якщо магніт N_1S_1 обертати, то він потягне за собою магніт NS . В стаціонарному режимі частоти обертання обох магнітів однакові.

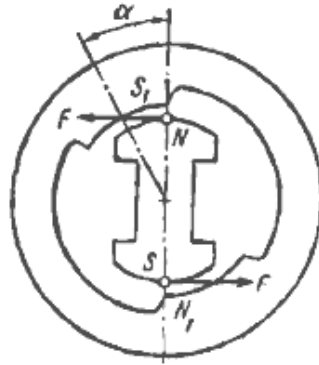


Рис. 6.19. До пояснення принципу роботи синхронного двигуна

У реальному двигуні поле магніту N_1S_1 замінено обертальним магнітним полем статора; при цьому ротор або обертається синхронно з магнітним полем статора, відстаючи на кут α , або зупиняється (випадає з синхронізму) при перевантаженні. Таким чином, незалежно від навантаження ротор завжди обертається з постійною частотою, рівною частоті обертання магнітного поля статора: $n_2 = n_1 = 60f/p$.

Сталість частоти обертання – важлива перевага синхронного двигуна. Стабільність частоти обертання потрібна у багатьох областях техніки, наприклад при записі і відтворенні звуку. Недолік синхронного двигуна – важкість пуску: для пуску потрібно розкрутити ротор у бік обертання поля статора. Для цього найчастіше застосовують спеціальну короткозамкнену обмотку, поміщену в ротор. В момент запуску, двигун працює як асинхронний. Коли

частота обертання ротора наближається до частоти обертання статора, ротор входить в синхронізм і двигун працює як синхронний. Короткозамкнена обмотка при цьому опиняється знеструмленою, так як частота обертання ротора дорівнює частоті обертання поля статора і стрижні обмотки ротора не перетинаються магнітними силовими лініями.

На даний час існує тенденція заміни на рухомих об'єктах (літаки, автомобілі, тощо) електричних кіл постійного струму колами змінного струму підвищеної частоти (200, 400 Гц і вище). Можливість використання безколекторних машин змінного струму, трансформаторів та магнітних підсилювачів дозволяє підвищити надійність роботи кола, а також зменшити габарити та масу машин і апаратів.

При обладнанні об'єкта мережею змінного струму широке застосування знаходить електропривод змінного струму. Розроблені схеми з асинхронними і синхронними двигунами, які дозволяють виконувати всі операції, що здійснювались раніше двигунами постійного струму.

Переваги асинхронних двигунів особливо помітні, коли за умовами роботи привода немає необхідності у плавному регулюванні частоти обертання в широких межах і великих пускових моментах (привід насосів, вентиляторів та інше).

6.11 Будова електричних машин постійного струму

За призначенням електричні машини постійного струму поділяються на генератори і двигуни.

Генератори виробляють електричну енергію, яка поступає в енергосистему; двигуни створюють механічний обертальний момент на валу, який використовується для приводу різних механізмів та транспортних засобів.

Електричні машини - зворотні. Це означає, що одна й та сама машина може працювати і як генератор, і як двигун. Тому можна говорити про будову машин постійного струму, не розглядаючи окремо пристрій генератора або двигуна.

Властивість зворотності не слід протиставляти певному призначенню машини, яка, зазвичай, проектується та використовується або як двигун, або як генератор. Значно рідше знаходять застосування машини, що призначені для роботи як у генераторному, так і в руховому режимах. Це так звані стартер - генератори, які встановлюються на деяких рухомих об'єктах.

Генератор та двигун відрізняються розрахунковими та конструктивними особливостями. Тому використання двигуна у якості генератора або генератора у якості двигуна призводить до погіршення експлуатаційних характеристик машин, загалом, до зниження коефіцієнта корисної дії.

У будь-якій машині постійного струму чітко виділяються рухома та нерухома частини. Рухому (обертальну) частину машини називають ротором, нерухому – статором.

Частина машини, у якій індукована електрорушійна сила, прийнято називати якорем, а частину машини, в якій створюється магнітне поле збудження, - індуктором. Як правило, в машині постійного струму статор служить індуктором, а ротор – якорем.

Статор машини постійного струму називають також станиною. Станину виготовляють з магнітопровідного матеріалу (зазвичай лита сталь); він виконує дві функції, будучи, по-перше, магнітопроводом, по якому проходить магнітний потік збудження машини, і, по-друге, основною конструктивною деталлю, у якій розміщуються усі інші деталі. Зсередини до станини кріпляться полюси. Полюс машини складається з осердя, полюсного наконечника і котушки. При проходженні по котушкам постійного струму в полюсах створюється індукований магнітний потік збудження. Крім головних полюсів у машинах підвищеної потужності (більше 1 кВт) встановлюються додаткові полюси менших розмірів, які призначені для покращення роботи машини. Котушки додаткових полюсів вмикають послідовно з обмоткою якоря.

Обмотка оберտального якоря з'єднується за допомогою колектору та щіток з нерухомими клемми, через які машина вмикається в електричну мережу

Осердя якоря та колектор кріпляться на одному валу. Стальний вал якоря спирається на підшипники, що закріплені у бокових щитках машини. В свою чергу бокові щитки кріпляться болтами до статора.

Для зменшення вихрових струмів і пов'язаних з ними теплових втрат, осердя якоря набирають з тонких листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного лаковим покриттям. В тілі якоря

свердлять вентиляційні канали, по яким проходить охолоджувальне повітря. У пази осердя якоря укладають дроти обмотки якоря, які з'єднують з колекторними пластинами.

Колектор набирають з мідних пластин, розділених прокладками. Поверхню мідних пластин спеціально обробляють, щоб підвищити їх стійкість до стирання.

Електричне з'єднання обертальної обмотки якоря з нерухомими клемми машини здійснюється за допомогою щіток, які ковзають по колектору.

Щітки вставляються в спеціальні обойми щіткотримача і притискаються до колектору спіральними або пластинчатими пружинами. Щіткотримачі кріпляться до траверси, яку разом з щітками можна повертати відносно статору на деякий кут, в ту чи іншу сторону.

В якості основи для виготовлення щітки використовують графіт. Щоб отримати задані властивості (певну електропровідність, підвищений опір до стирання), в щітку додають порошки металів (мідь, свинець).

Двигуни серії П розраховані на напругу 110 або 220 В, а генератори – 115 або 230 В. Вигляд машини постійного струму з розрізом зображений на рис. 6.20.

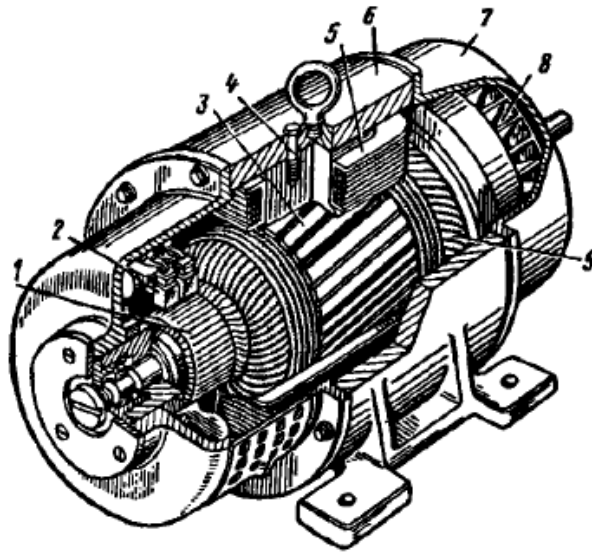


Рис. 6.20. Пристрій машини постійного струму: 1 – колектор; 2 – щітки; 3 – осердя якоря; 4 – осердя головного полюса; 5 – полюсна котушка; 6 – статор; 7 – підшипниковий щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Машини постійного струму зазвичай мають примусове повітряне охолодження, яке здійснюється вентилятором, насадженим на вал якоря. Для потужних машин розроблені системи водневого, а також водяного охолодження. Для захисту машини від пилу та вологи конструктивні вікна, які забезпечують доступ до колекторам і щіткам, закривають стальними стрічками або пластинами.

6.12. Принцип роботи машини постійного струму

Для розуміння сутності роботи електричної машини необхідно згадати фізичні закони, якими описуються основні електромагнітні

явища: закон електромагнітної індукції і закон Ампера. Ці закони разом із законами Кірхгофа та Ома дозволяють описати основні процеси, які відбуваються в електричних машинах.

Робота будь-якої електричної машини (генератора або двигуна постійного та змінного струму) характеризується взаємодією двох направлених назустріч один одному обертальних моментів, один з яких створюється механічними, а другий – електромагнітними силами. Крім того, робота двигуна і генератора характеризується взаємодією напруги мережі та ЕРС, виникаючої в обмотці якоря.

Генератор постійного струму. В генераторі постійного струму енергія механічного руху перетворюється в електричну енергію. Двигун, у якості якого зазвичай використовують турбіну, або двигун внутрішнього згоряння, обертає якор у магнітному полі збудження. Внаслідок його обертання зменшується магнітний потік, який пронизує витки обмотки якоря. При цьому індукована ЕРС, є пропорційною швидкості змінювання магнітного потоку: $|e| = \omega \frac{d\Phi}{dt}$, де ω – кількість витків, які пронизуються змінним магнітним потоком Φ ; $\frac{d\Phi}{dt}$ – похідна магнітного потоку по часу, або швидкість зміни магнітного потоку.

Формула, що вище наведена, виражає закон електромагнітної індукції, яка показує, що для постійної ЕРС E необхідно рівномірно (з постійною швидкістю) збільшувати або зменшувати магнітний потік Φ . В реальному генераторі постійного струму магнітний потік, що пронизує кожен виток обмотки якоря, періодично змінюється.

Відповідно змінюється і ЕРС у кожному витку обмотки за значенням і напрямком.

Для отримання постійної ЕРС використовують різні випрямлячі, зокрема генератор постійного струму, який постачається механічним випрямлячем – колектором. Колектор автоматично переключає кінці витків обмотки при зміні напрямку ЕРС.

Чим більше потужність споживачів електричної енергії, підключених до генератора, тим більше струм в обмотці якоря та більші сили, що перешкоджають його обертанню.

Двигун постійного струму. Якщо підключити машину постійного струму до електричної мережі, через обмотку якоря потече струм. У відповідності до закону Ампера на провідники обмотки якоря, що знаходиться у магнітному полі збудження, діють механічні сили. Ці сили створюють обертальний момент, під дією якого якор починає розкручуватись.

Обертальний вал якоря використовують для приводу у дію різних механізмів: підйомних та транспортних засобів, станків, швейних машин та ін.

Виходячи з закону збереження енергії можна вважати, що потужність, яка споживається двигуном із мережі, тим більша, чим більше механічне навантаження на його валу. Однак, для розуміння сутності роботи електричного двигуна важно прослідкувати, яким чином зміна механічного навантаження позначається на електричній потужності, яка споживається двигуном.

Розберемося в цьому. Обмотка якоря двигуна обертається у магнітному полі збудження. В цих умовах у відповідності з законом

електромагнітні індукції в обмотці якоря виникає ЕРС. Застосовуючи правило правої руки, неважко встановити, що вона направлена назустріч прикладеній напрузі мережі. Тому її назвали проти-ЕРС. Сама протидіюча ЕРС є фактором, який регулює споживання електричної потужності з мережі.

Згідно з законом електромагнітні індукції, протидіюча ЕРС прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує витки обмотки якоря. Отже, зі зменшенням частоти обертання якоря зменшується і протидіюча ЕРС.

Якщо механічне навантаження на валу двигуна відсутнє (двигун працює вхолосту), обертальному моменту двигуна перешкоджають тільки моменти тертя і частота обертання якоря досягає максимального значення. При цьому проти-ЕРС практично повністю компенсує напругу мережі та через обмотку якоря проходить мінімальний струм. Відповідно електрична потужність, яка споживається з мережі, мінімальна.

При підключенні механічного навантаження частота обертання якоря зменшується, а отже, зменшується і значення проти-ЕРС. Струм та електрична потужність, які споживаються двигуном з мережі, зростають.

Таким чином, проти-ЕРС у двигуні виконує функції дроселя, регулюючого надходження потужності з мережі.

Контрольні запитання

1. Поясніть сутність обертового магнітного поля.
2. Охарактеризуйте будову асинхронного двигуна.
3. У чому полягає принцип дії асинхронного двигуна?
4. Які фізичні процеси відбуваються при розкручуванні ротора?
5. Що таке ковзання та частота обертання ротора?
6. Охарактеризуйте вплив ковзання на ЕРС у обмотці ротора.
7. Охарактеризуйте залежність значення і фази струму від ковзання та ЕРС ротора.
8. Розкажіть про вплив активного опору обмотки ротора на форму залежності обертового моменту від ковзання.
9. Охарактеризуйте як здійснюється пуск асинхронного двигуна.
10. Охарактеризуйте коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності асинхронного двигуна.
11. Розкажіть про однофазний асинхронний двигун.
12. У чому полягає принцип дії синхронного генератора?
13. У чому полягають особливості дії синхронного двигуна?
14. Охарактеризуйте пристрій електричних машин постійного струму.
15. Доведіть принцип роботи машини постійного струму.
16. Наведіть поняття про обмотку якоря.
17. Що таке електрорушійна сила, індукована в обмотці якоря?
18. Охарактеризуйте генератори постійного струму незалежного збудження.

Глава 7. Електричні та магнітні елементи автоматики

7.1. Електромагнітне реле і магнітокеровані контакти

Одним з найбільш розповсюджених елементів сучасних автоматів є електромагнітне реле, яке забезпечує стрибкоподібну зміну вихідного сигналу при подачі на вхід керуючого сигналу. Основною властивістю реле є можливість керувати досить потужними виконавчими електричними механізмами.

На рис. 7.1 зображена схема електромагнітного реле. Осердя 1, ярмо 2, і якір 3 виготовляються з електротехнічної сталі. При проходженні струму i в обмотці 4 якір притягується до осердя, замикаючи контакти 5, приварені до пружних пластин з фосфористої бронзи. Усі металеві деталі кріпляться на ебонітовій основі. При знеструмленні обмотки реле, якір повертається у вихідний стан пружиною 6 і струмопровідні контакти реле розмикаються.

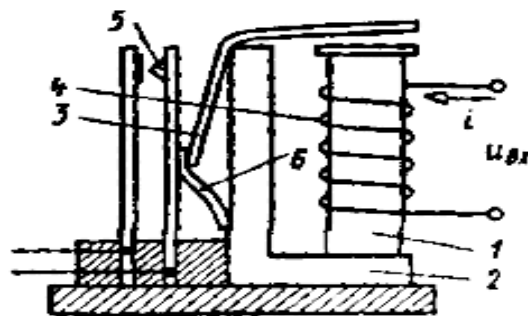


Рис. 7.1. Схема електромагнітного реле

Реле спрацьовує (замикаються контакти) при певному струмі – струмі спрацювання $I_{сп}$. Для отримання надійного контакту обмотку осердя реле живлять струмом, який у 3-4 рази перевищує струм спрацювання.

При підключенні напруги $u_{вх}$ струм i зростає за експоненціальним законом та досягає струму спрацювання через деякий час, зазвичай рівний сотим долям секунди. Цей час приблизно дорівнює часу спрацювання реле (для точності слід ще врахувати тривалість руху якоря).

Струм, при якому якір відривається від осердя, називають струмом відпускання $I_{відп}$. Внаслідок гістерезису магнітної системи реле, струм відпускання опиняється у декілька разів менший за струм спрацювання.

Електромагнітне реле можна зробити чуттєвим до полярності напруги, підведеної до обмотки осердя. Це досягається деяким ускладненням конструкції реле та підмагнічуванням осердя за допомогою вбудованого постійного магніту. При цьому керуюча напруга позитивної полярності викликає замикання однієї пари контактів, а при зміні полярності напруги якір відхиляється у протилежну сторону та замикає іншу пару контактів. Таке реле називається поляризованим.

У системах автоматики нерідко виникає необхідність увімкнення агрегатів та виконавчих пристроїв у певному порядку послідовно у часі. Таке включення електричних машин та апаратів можна здійснити за допомогою реле, контакти яких замикаються не одразу після подачі керуючої напруги, а через деякий час, який значно перевищує час спрацювання реле.

Реле, у якого замикання (розмикання) контактів відбуваються з необхідною затримкою, називають реле часу (рис. 7.2). При подачі на вхід схеми керуючої напруги $u_{вх}$ напруга на конденсаторі u_C буде

підвищуватись поступово з сталою часу $\tau = RC$. Обмотка реле під'єднана паралельно конденсатору, і реле спрацює, коли напруга u_C досягне певного значення.

Напруга U_h знімається з частини витків, яка визначається рівнем рідини. Таким чином, лінійне переміщення поплавка вимірюється та перетворюється у зміни електричного сигналу (напруги) на виході системи.

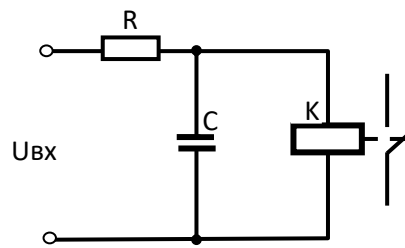


Рис. 7.2. Схема реле часу

Затримку спрацювання реле часу можна регулювати змінюючи R і C .

Ще один різновид реле – магнітокеровані контакти, заключенні у герметичний корпус (геркони). Схематичне зображення геркону представлено на рис. 7.3. У скляну ампулу впаяні дві пластини з магнітом'якого матеріалу, покриті тонким прошарком металу з високою електропровідністю. Колба заповнена інертним газом, що попереджує окислення контактів.

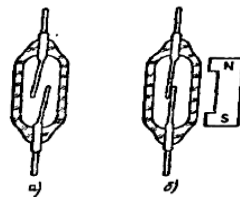


Рис. 7.3. Герметичний контакт, керований постійним магнітом: а – у розімкненому стані; б – зімкненому стані

Пластинки монтується таким чином, що між їх контактуючими кінцями залишається проміжок (рис. 7.3, а). Якщо до геркону піднести постійний магніт (рис. 7.3, б), то пластинки намагнічуються та притягуються одна до одної.

Замість постійного магніту можна використовувати обмотку, розміщену у колбі. При подачі керуючого струму обмотці виникає магнітне поле, через пластинки замикається магнітний потік. Намагнічені таким чином пластинки взаємно притягаються, утворюючи контактне з'єднання (рис. 7.4, а).

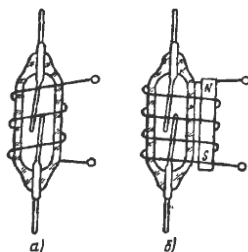


Рис. 7.4. Герметичний контакт, керований струмом:

а – на замикання; б – на розмикання

Якщо потрібно, щоб реле працювало на розмикання контактів, на колбі монтується постійний магніт, що замикає контакти у відсутності управляючого сигналу. Котушка намотана так, що її магнітне поле направлено зустрічно магнітному полю постійного магніту (рис. 7.4, б). При подачі в котушку управляючого струму, магнітні поля компенсуються і пластини розходяться під дією пружних сил.

7.2. Схеми керування навантаженням в електричних колах

Керування різноманітними виконавчими електричними і магнітними елементами або органами, а саме, електромагнітними реле і клапанами, електродвигунами, нагрівачами, тощо, чи не найпоширеніші операції в автоматичі. Використання певних виконавчих пристроїв потребує відповідного схемного рішення їх керуванням. Слід зауважити, що в електротехніці відома значна кількість таких електричних схем, яка для цього може бути використана.

На рис. 7.5 зображено схему електронного ключа на біполярному транзисторі типу КТЗ15Г. Цей ключ здатний забезпечувати керування зовнішніми колами із струмом споживання до 100 мА і напругою живлення до 15 В. У навантаження цього ключа включено електромагнітне реле К. Ключ может вмикати і вимикати електромагнітне реле. Контакти реле, в свою чергу, керують навантаженням.

Для керування ланками з великим струмом потрібно застосувати потужніший транзистор або цілу транзисторну збірку.

Діод VD призначений для захисту елементів схеми від напруги самоіндукції, що виникає в котушці реле К у момент закривання ключа VT. При виборі електромагнітного реле необхідно звертати увагу на такі параметри. По-перше, на напругу спрацьовування реле.

Наприклад, на рис. 7.5 вона є рівною 12 В. По-друге, на максимально допустимий струм комутації і максимально допустиму напругу для виконавчих контактів реле. Вони повинні відповідати реальним значенням струму і напруги в колі навантаження.

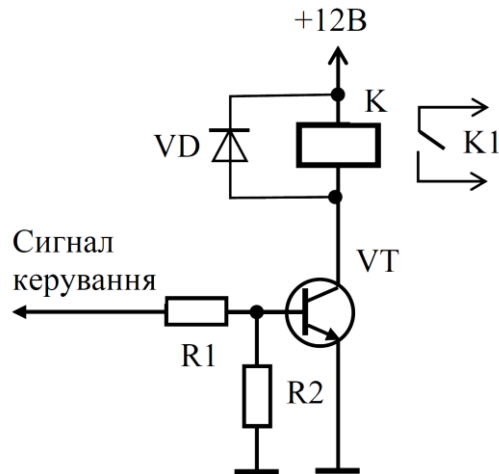


Рис. 7.5. Схема керування електромагнітним реле

У випадку, якщо необхідно керувати великою кількістю реле або більш потужними навантаженнями, то доцільно застосовувати мікросхеми ULN2003 або ULN2803. Ці мікросхеми містять транзисторні ключі на складених транзисторах (схема Дарлінгтона). Вони дозволяють керувати навантаженням до 500 мА при напрузі до 50 В.

На рис. 7.6 зображено схему із застосуванням оптопар для керування електромагнітним реле.

Оптопари можна використовувати для керування приладами з малими значеннями струмів, що вимагають гальванічної розв'язки. Максимальний робочий струм обмежений характеристиками фототранзисторів. Наприклад, оптопари Дарлінгтона серії PC815 (Sharp, RS175-198) мають максимальне значення вихідного струму 80 мА, достатнє для керування слабкострумним реле, яке, у свою чергу, здатне працювати з потужнішими приладами. Оптопари Дарлінгтона серії PS2502 (NEC, RS590-424 і RS590-430) підтримують струми до 160 мА.

Коефіцієнт передачі зазвичай досягає до 2000. Напруга, що керує світлодіодом, дорівнює 1,1 В, максимальний робочий струм - 80 мА. Максимальна напруга між колектором і емітером фототранзистора складає 40 В, а тривалість насичення - 100 мкс.

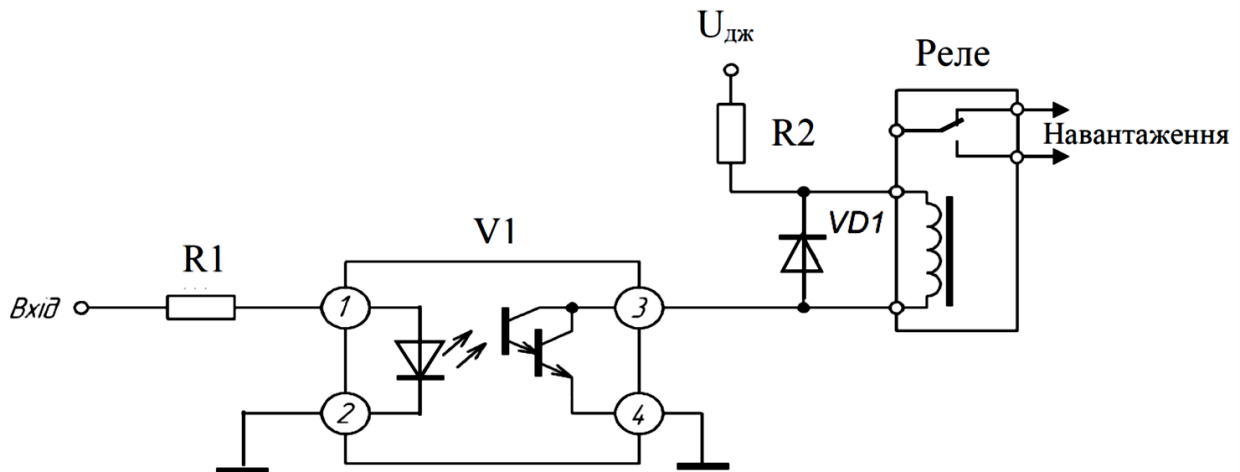


Рис. 7.6. Схема керування реле з застосуванням оптопар

На рис. 7.7 зображена схема на базі потужного транзистора Дарлінгтона TIP122 або TIP142. TIP122 керує напругою до 100 В і струмами до 5 А. Максимальна потужність розсіювання - 65 Вт. Транзистори Дарлінгтона відкриваються при напрузі 1,2 В між базою і колектором і можуть підсилювати струм у 5000 разів. Отже, напруга на базі, що перевищує 1,2 В, викликає режим насичення транзистора.

TIP142 функціонує при колекторному струмі 10 А. Максимальна робоча частота цих транзисторів складає 5 МГц. Для індуктивного навантаження повинні використовуватися захисні діоди.

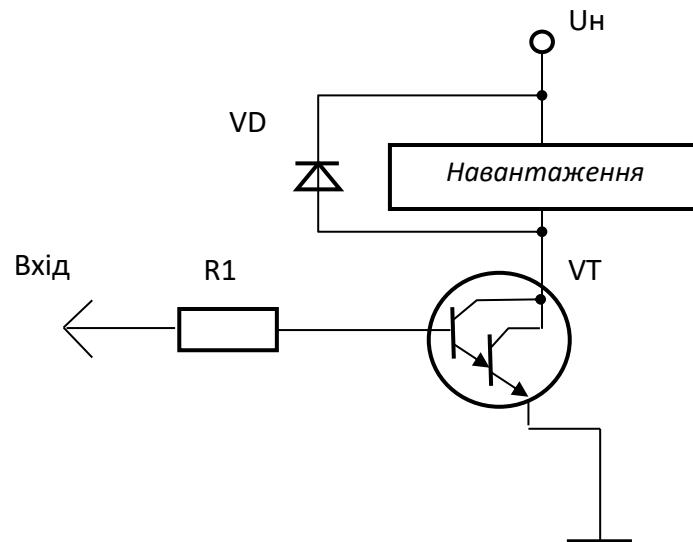


Рис. 7.7. Схема керування на транзисторі Дарлінгтона

На рис. 7.8 зображена схема на базі польових МДН транзисторів VN10KM або VN66AF. Щоб МДН транзистор відкрився, на нього необхідно подати пряму напругу зсуву близько 0,8 В.

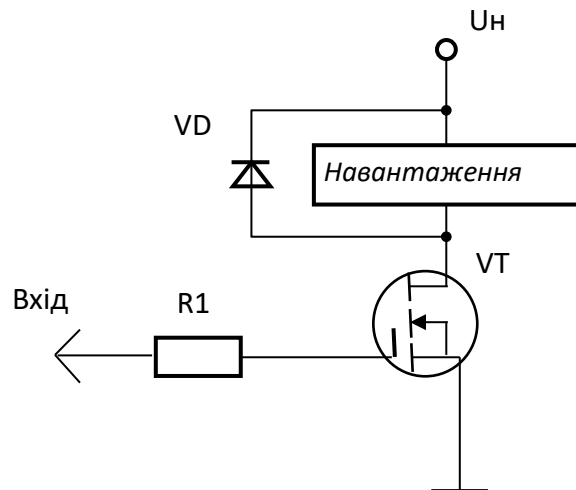


Рис. 7.8. Схема керування на польовому транзисторі

Прямий зсув близько 5 В істотно впливає на провідність. Оскільки вхідний опір пристрою на польовому транзисторі дуже високий, з'єднати його безпосередньо з вихідним портом МК

неможливо. Таким пристроєм слід керувати через резистор. VN10KM витримує максимальну напругу 60 В і струм 310 мА, VN66AF працює при максимальній напрузі 60 В і струмі 2 А. Термін насичення - близько 15 нс.

Потужні пристрої керування на базі МДН транзисторів із захистом, які інколи називають твердотільними реле, грають роль перемикачів в силових колах цифрових систем управління. Вхідне управління сумісне з логічними рівнями 5 В. У цих елементах використовується вбудована схема термоконтролю, яка захищає їх від перегріву, короткого замикання і перевантаження. Такі пристрої, як правило, мають інформаційний вихід, який низьким рівнем інформує про спрацювання вбудованих кіл захисту.

7.3. Твердотільне реле

У всіх електричних ланцюгах доводиться включати і відключати прилади і пристрої. Для цього використовують комутаційні апарати, це може бути як простий вимикач або рубильник, так і реле, контактори і т. д. Один з таких приладів — твердотільне реле, зображення якого надано на рис. 7.9.

Твердотільне реле — електронний пристрій, що є типом реле без механічних рухомих частин, що служить для включення і виключення високопотужного ланцюга за допомогою низької напруги, що подаються на клеми управління.



Рис. 7.9. Зображення зовнішнього вигляду твердотільного реле

Твердотільне реле — це пристрій, що побудований на напівпровідникових елементах і силових ключах, таких як сімістори, біполярні або МОН - транзистори.

Як і в електромагнітних реле та інших комутаційних приладах вони призначені, щоб слабким сигналом управляти навантаженням з великою напругою або струмом.

У твердотільних реле немає котушки управління і немає рухомої контактної групи. У ньому замість силових контактів використовуються напівпровідникові ключі: транзистори, симістори, тиристори та інші в залежності від сфери застосування. Функціональна електрична схема твердотільного реле зображена на рис. 7.10.

Це є головна відмінність напівпровідникового реле від електромагнітного. У зв'язку з цим у твердотільного реле значно більший термін служби, оскільки немає механічного зносу контактної групи, також варто відзначити, що і швидкодію напівпровідникових реле вище, ніж у електромагнітних.

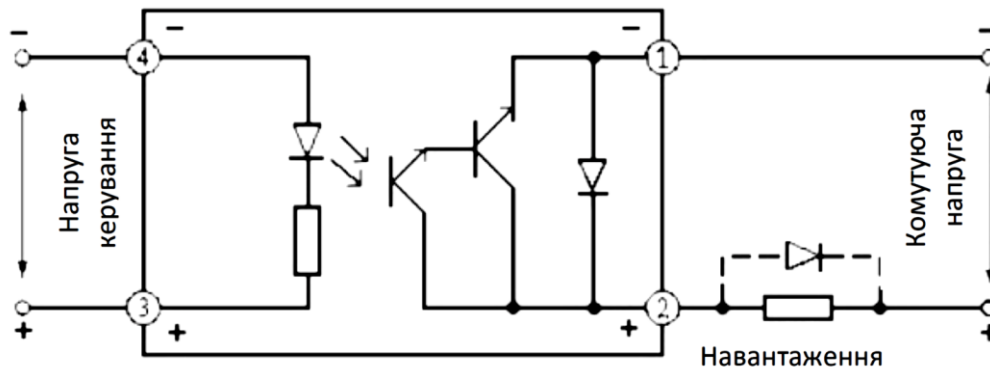


Рис.7.10. Функціональна електрична схема твердотільного реле

Крім відсутності механічного зносу, немає і іскор або дуг при комутації, як і звуків від ударів контактів при перемиканні. До речі, якщо немає іскор і дугових розрядів при комутації – твердотілі реле можуть працювати у вибухонебезпечних приміщеннях.

Твердотільні реле можна класифікувати:

- За родом струму (постійний чи змінний);
- По силі струму (малопотужні, силові);
- За способом монтажу;
- За напругою;
- За кількістю фаз;
- За типом керуючого сигналу (постійним або змінним струмом, аналоговий вхід для управління змінним резистором, в ланцюг 4-20 мА і т.д.).
- За типом перемикання - комутація при переході напруги через нуль (в ланцюгах змінного струму), або комутація по керуючому сигналу (наприклад, для регулювання потужності).

Контрольні запитання

1. Пояснити принцип дії електромагнітного реле.
2. Укажіть на особливі властивості герконів.
3. Приведіть приклад використання реле часу.
4. Наведіть схему керування електромагнітним реле на біполярному транзисторі.
5. Пояснити роботу схеми керування на польовому транзисторі навантаженням.
6. Поясніть перевагу використання гальванічної розв'язки в схемах керування навантаженням.
7. У чому полягає перевага використання твердотільних реле?
5. Яка будова твердотільних реле?

Глава 8. Електричні вимірювання та прилади

8.1. Сутність електричних вимірювань

Для вимірювання електричних та магнітних величин служать електровимірювальні прилади: амперметри, вольтметри, гальванометри та інше, а також їх комбінації.

Процес вимірювання зводиться до порівняння вимірювальної фізичної величини з її значенням, прийнятим за одиницю.

Вимірювання однієї величини можна замінити вимірюванням іншої, з нею пов'язаною.

Вимірювальна апаратура розподіляється на вимірювальні прилади та еталони.

Вимірювальні прилади володіють високою точністю та надійністю роботи, можливістю автоматизації процесу вимірювань та передачі показників на далекі відстані, простотою вводу результатів вимірювань у електричні обчислювальні пристрої та інше. Тому вони широко використовуються у системах ручного або автоматичного контролю та підтримання на заданому рівні параметрів промислових установок та технологічних процесів.

8.2. Основні одиниці електричних та магнітних величин у міжнародній системі одиниць

У процесі вимірювань визначається відношення вимірювальної фізичної величини до її значення, прийнятому за одиницю. Вибір

цього одиничного значення пов'язаний з урахуванням багатьох факторів.

Нагадаємо, що одиниці фізичних величин прийнято ділити на основні та похідні. Основні одиниці вводяться незалежно один від одного, похідні встановлюються на основі експериментально відкритих законів або прийнятих визначень, поєднуючих різні фізичні величини.

В принципі, вибір основних одиниць довільний, і можна було б кожен фізичну величину характеризувати своєю особистою (загальною) одиницею. Теоретично у якості основних можна вибрати одиниці будь-яких фізичних величин, наприклад одиницю прискорення рухомого тіла або потенціалу електричного поля. Однак вибір основних одиниць суттєво обмежений вимогами практики. Основна одиниця повинна забезпечувати зручність вимірювань та відносну простоту її відтворення у різних країнах. Виготовлення та зберігання еталонів одиниці фізичної величини не повинно призводити до надмірних матеріальних затрат. Бажано також, щоб основні одиниці були пов'язані з фундаментальними фізичними величинами, наприклад з такими, як протяжність, час, кількість речовини.

У системі СІ в якості основних одиниць електричних та магнітних величин прийняті наступні чотири одиниці: одиниця довжини – метр (м), одиниця часу – секунда (с), одиниця маси – кілограм (кг) та одиниця сили струму – ампер (А).

Метр, секунда та кілограм були введені у Франції за пропозицією спеціальної комісії у 1799 р. Ці одиниці були пов'язані

з фундаментальними об'єктами та процесами. Метр визначався як сорока мільйонна частка земного меридіана, секунда – як $1/86400$ середньої сонячної доби та кілограм – як маса кубічного дециметра води при 4°C . Були виготовлені прототипи метра та кілограма у вигляді лінійки та гирі зі сплавів, найбільш стійких до зовнішнього впливу металів.

Розвиток техніки дозволи зафіксувати розмір метра та секундний інтервал часу з граничною для наших днів точністю за допомогою атомних еталонів.

В даний час прийняті наступні визначення основних одиниць електричних та магнітних величин, що входять в СІ:

✓ метр (м) – довжина, рівна $16507763,73$ довжини хвиль у вакуумі випромінювання атому криптому-86, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$;

✓ кілограм (кг) – маса міжнародного прототипу кілограма, який зберігається у Національному архіві Франції;

✓ секунда (с) – тривалість 9192631770 періодів випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезія-133;

✓ ампер (А) – сила струму, при якому на кожен метр довжини двох паралельних прямолінійних круглих провідників, розташованих в 1 м один від одного, приходиться механічна сила $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

8.3. Похідні та кратні одиниці

Використовуючи вибрані основні одиниці, можна визначити похідні одиниці інших електричних та магнітних величин. Для цього потрібно підібрати по можливості простий математичний вираз, що пов'язує одну фізичну величину з декількома або всіма основними величинами.

Наприклад, за визначенням, $dq = idt$, де q – електричний заряд; i – сила струму; t – час. Згадуючи, що сила струму виражається в амперах, а час – в секундах, встановлюємо, що одиницею електричного заряду служить добуток Ампера на секунду. Цю одиницю називають кулоном: $[Кл]=[А]·[с]$.

Одна з найважливіших фізичних величин – напруга. Напруга виражається у вольтах. І хоча вольт – похідна одиниця, через неї достатньо часто виражають інші похідні одиниці; так, одиниця повної потужності – вольт-ампер (В·А), одиниця напруженості електричного поля – вольт, поділений на метр (В/м) і т.і.

Щоб виразити одиницю напруги через основні одиниці, згадаємо, що електрична напруга дорівнює роботі сил електричного поля при переносі точкового тіла з зарядом 1 Кл з однієї точки поля в іншу: $U = A/Q$, де U – напруга; A – робота; Q – заряд.

Широке застосування в електротехніці та електроніці знаходять кратні одиниці, пов'язані з основними та похідними одиницями постійним множником. Цим множникам присвоєні спеціальні найменування: 10^{-12} – піко (п), 10^{-9} – нано (н), 10^{-6} – мікро (мк), 10^{-3} – мілі (м), 10^3 – кіло (к), 10^6 – мега (М), 10^9 – гіга (Г), 10^{12} – тера (Т).

Наприклад, запис 10 нФ, означає, що мова йде про десять мільярдних долях фарада.

8.4. Основні методи електричних вимірювань.

Похибки вимірювальних приладів

Існує два основних методи електричних вимірювань: метод безпосередньої оцінки та метод порівняння. У методі безпосередньої оцінки вимірювана величина відраховується безпосередньо за шкалою приладу. При цьому шкала вимірювального приладу попередньо градується за еталонним прибором в одиницях вимірювальної величини. Як правило, таке градуювання здійснюється на заводі при виготовленні приладу. Переваги цього методу – зручність рахунку показань приладу та мала затрата часу на операцію вимірювання. Метод безпосередньої оцінки широко застосовується у різних областях техніки для контролю та регулювання технологічних процесів, у польових умовах, на рухомих об'єктах та інше. Недолік методу – порівняно невисока точність вимірювань.

У методі порівняння вимірювана величина порівнюється безпосередньо з еталоном, зразковою та робочою мірою. У цьому випадку точність вимірювань може бути значно підвищена. Метод порівняння використовується головним чином у лабораторних умовах, він потребує порівняно складної апаратури, високої кваліфікації операторів та значних затрат часу. В останній час в апаратурі порівняння все ширше впроваджується автоматизація.

Електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки дозволяють відрахувати числове значення вимірюваної величини на шкалі або цифровому пристрої приладу.

Практика показує, що при всякому вимірюванні безперервної величини неминуха деяка похибка Δ – різниця між виміряним $A_{\text{вим}}$ та дійсним A значеннями вимірюваної величини: $\Delta = A_{\text{вим}} - A$.

Систематичні похибки змінюються за певним законом та виникають внаслідок факторів, які можуть бути враховані: вплив зовнішніх умов (температура, радіація, електромагнітні поля), недосконалість методу вимірювання, недосконалість вимірювального приладу.

Випадкові похибки виникають внаслідок дії факторів, які не піддаються безпосередньому обліку. Оцінку випадкових похибок можна провести тільки при дуже великій кількості вимірювань, що повторюються, використовуючи методи теорії ймовірностей.

Похибка оператора (у записі, у визначенні ціни поділки приладу та інше), зазвичай легко виявляється у ряду спостережень за значними відхиленнями результату вимірювання від середніх або приблизно очікуваних значень, виключають з записів та при обробці результатів вимірювання не враховують.

Для більш повної характеристики вимірювань вводять визначення відносної похибки вимірювання δ :

$$\delta = \frac{A_{\text{вим}} - A}{A} \cdot 100 = \frac{\Delta}{A} \cdot 100\%.$$

Величини Δ і δ характеризують точність вимірювання. У багатьох випадках виникає необхідність охарактеризувати точність

приладу. Для цієї мети вводиться визначення приведеної похибки вимірювання:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_{max}} \cdot 100\%,$$

де A_{max} – максимальне значення шкали приладу, тобто граничне значення вимірюваної величини.

Найбільша приведена похибка визначає клас точності приладу. Якщо, наприклад, клас точності амперметра дорівнює 1,5, то це означає, що найбільша приведена похибка $\gamma = \pm 1,5\%$. Якщо прилад розрахований на вимірювання струмів до 15 А, то абсолютна похибка вимірювання цим приладом складе:

$$\Delta = A_{max} \frac{\gamma}{100} = 15 \frac{1,5}{100} = 0,225 \text{ А.}$$

Якщо вказаним приладом виміряти струм 10 А, то відносна похибка вимірювання не перевищить $\frac{0,225}{10} \cdot 100 = 2,25\%$, якщо тим самим приладом виміряти струм 1 А, то відносна похибка вимірювання не перевищить $\frac{0,225}{1} \cdot 100 = 22,5\%$.

Цей приклад показує, що при точних вимірюваннях прилад слід підбирати так, щоб значення вимірюваної величини приходилось на другу половину шкали.

Розрізняють основну та додаткову похибки. Основні похибки виникають при нормальних умовах роботи, вказаних у паспорті приладу та умовними знаками на шкалі. Додаткові похибки виникають при експлуатації приладу в умовах, відмінних від нормальних (підвищена температура оточуючого середовища, сильні зовнішні магнітні поля, неправильна установка приладу та інше).

8.5. Класифікація електровимірювальних приладів. Умовні позначення на шкалі

Електровимірювальні прилади класифікуються за різними ознаками. У залежності від основної приведеної похибки електровимірювальні прилади розбиті на класи точності. Клас точності вказується на шкалі приладу. Він означає найбільшу приведену похибку у відсотках, що є допустимою для приладу.

На шкалу електровимірювального приладу наносяться умовні позначення, основні з яких наведені у таблиці 8.1.

Таблиця 8.1. Умовні позначення

1,5	Клас точності 1,5
	Постійний струм
	Змінний (однофазний) струм
	Постійний та змінний струми
	Трифазний струм
	Прилад магнітоелектричної системи
	Прилад електромагнітної системи
	Прилад електродинамічної системи
	Прилад індукційної системи
П, Л, $\angle 60^\circ$	Прилад встановлюється тільки горизонтально, вертикально, під кутом 60°
	Ізоляція приладу випробувана при напрузі 2 кВ

За родом вимірюваної величини електровимірювальні прилади поділяються на: вольтметри (для вимірювання напруги та ЕРС); амперметри (для вимірювання сили струму); ватметри (для вимірювання електричної потужності); лічильники (для вимірювання електричної енергії); Омметри, мега Омметри (для вимірювання електричного опору); частотоміри (для вимірювання частоти змінного струму); фазометри (для вимірювання кута зсуву фаз).

За родом струму розрізняють електровимірювальні прилади постійного струму, змінного струму та комбіновані.

За способом установки розрізняють щитові прилади, що призначені для монтажу на приладових щитах та пультах керування, та переносні прилади.

8.6. Електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки

Рухома система електровимірювального приладу безпосередньої оцінки, що пов'язана з вказівником (стрілкою), схильна до дій різних моментів сил.

Обертальний момент $M_{об}$ у приладі створюється внаслідок тієї або іншої дії електричного струму. Спосіб створення обертального моменту визначає принцип дії приладу.

Протидіючий момент $M_{пр}$ у приладі створюється закручуванням або розтягненням пружин, іноді взаємодією спеціальної котушки зі струмом з магнітною системою приладу (приклад, в логометрах). У час відліку по приладу, коли стрілка нерухома, обертальний та протидіючий моменти врівноважують один одного: $M_{об} = M_{пр}$.

За відсутності протидіючого моменту робота приладу неможлива, так як при будь-якому значенні вимірюваної величини стрілка відхилялась би до упору.

Заспокійливий (демпферний) момент є необхідним для усунення інерційних коливань стрілки біля положення рівноваги. Цей момент повинен діяти під час руху стрілки та зникати при відліку, щоб не вносити похибок у вимірювання. Деякий демпферний момент завжди створюється у результаті тертя рухомої системи об повітря. У більшості випадків цього недостатньо, внаслідок чого для заспокоєння рухомої системи доводиться застосовувати спеціальний прилад (демпфер). Демпферний момент пропорційний швидкості руху рухомої системи. За відсутності демпферного моменту відлік показань за приладом був би утруднений.

Широко застосовуються повітряний та електромагнітний демпфери.

У повітряному демпфері поршень, пов'язаний з рухомою системою, переміщується у камері, не торкаючись її стінок. Демпферний момент створюється за рахунок перепаду тиску по обидві сторони поршня. Коли стрілка нерухома, тиск по обидві сторони поршня вирівнюється та демпферний момент зникає. У деяких випадках застосовуються рідкі демпфери.

В електромагнітному демпфері демпферний момент створюється у результаті взаємодії магнітного поля постійного магніту з магнітним полем вихрових струмів, індукований у пластині при русі рухомої системи.

У приладі магнітоелектричної системи демпфером служить металевий каркас рухомої рамки, в якому індуковані вихрові струми при коливаннях рамки у поля постійного магніту.

Якщо пластина або рамка нерухома, то вихрові струми не індуковані та демпферний момент відсутній.

Рухома система вимірювального приладу кріпиться на осі, що виконується у вигляді тонкої мідної або алюмінієвої трубки, в яку вальцьовані сталеві керни (рис. 8.1). Кінці керну спираються на підп'ятники з твердого каменю, зазвичай агату (рис. 8.2).

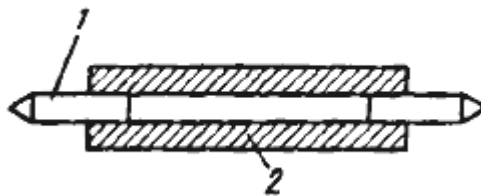


Рис. 8.1. Вісь електровимірювального приладу:

1 – керн; 2 – вісь

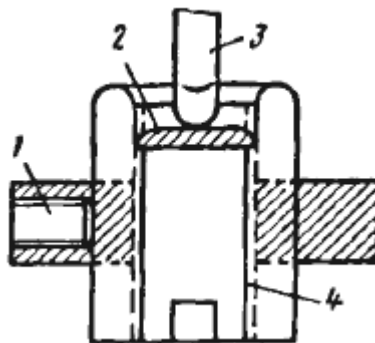


Рис. 8.2. Схема кріплення підп'ятника: 1 – стопорний гвинт; 2 – агатовий камінь; 3 - керн; 4 – гвинт підп'ятника

Рухома система повинна бути точно збалансована відносно осі, для чого служать спеціальні балансувальні тягарці – гайки.

Пружини для створення протидіючого моменту виготовляються у вигляді спіралі з немагнітного матеріалу, що володіє достатньою пружністю (частіше за все з фосфорної бронзи). Ці ж пружини служать для підводу струму до рамки.

Для усунення впливу на показання приладу зовнішніх магнітних полів застосовують магнітні екрани з м'якого заліза. Механізм приладу поміщують у корпус для захисту від вологи, пилу та механічних пошкоджень.

8.7. Прилади магнітоелектричної системи

Принцип дії приладів магнітоелектричної системи заснований на використанні взаємодії поля постійного магніту та котушки (рамки), по якій протікає струм.

Пристрій приладу схематично зображений на рис. 8.3.

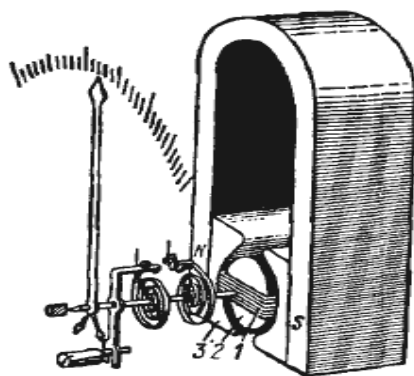


Рис. 8.3. Вигляд приладу магнітоелектричної системи

Між полюсами постійного магніту NS за допомогою полюсних наконечників 3 та циліндричного осердя 2 створюється повітряний

проміжок такої форми, що силові лінії магнітного поля при будь-якому положенні рамки l перпендикулярні її провідникам.

Сила, що діє на одну сторону рамки у магнітному полі, визначається законом Ампера: $F = IlB\omega$, де I - струм у провідниках рамки; l - довжина тієї частини сторони рамки, яка знаходиться у магнітному полі (активна довжина); B - магнітна індукція у повітряному проміжку; ω - число витків рамки.

На іншу сторону рамки діє така сама сила але протилежно направлена.

Момент сил визначається як добуток сили на плече. Отже $M_{об} = IlBp\omega = BS\omega I$, де p - ширина рамки, $S = lp$ - площа рамки.

Значення B, S, ω для кожного приладу постійні, тому останню формулу можна записати у вигляді $M_{об} = k_1 I$, де k_1 - постійний коефіцієнт.

Струм до рамки підводиться через дві спіральні пружини, які одночасно служать для створення протидіючого моменту. Момент, що створюється пружиною, пропорційний куту закручування, тому $M_{пр} = k_2 \alpha$, де k_2 - постійний коефіцієнт; α - кут повороту рамки (дорівнює куту зкручування пружини).

Враховуючи, що в момент відліку, коли стрілка нерухома, $M_{об} = M_{пр}$, отримуємо $k_1 I = k_2 \alpha$. З цієї рівності знаходимо $\alpha = \frac{k_1}{k_2} I = kI$.

Таким чином, кут повороту рамки та стрілки вказівника пропорційний струму, тобто прилад може бути градуйований як амперметр.

На основі закону Ома маємо $I = U/R_{\Pi}$, де U – напруга на затискачах приладу; R_{Π} – електричний опір рамки приладу.

Після підстановки отримуємо:

$$\alpha = \frac{k}{R_{\Pi}} U.$$

Оскільки відношення $\frac{k}{R_{\Pi}}$ для одного приладу – величина стала, останній вираз показує, що прилад може бути градуйований як вольтметр. Демпферний момент у магнітоелектричних приладах створюється за рахунок вихрових струмів, що виникають у алюмінієвому каркасі рами при переміщеннях рухомої рамки.

Магнітоелектричні амперметри та вольтметри є основними вимірювальними приладами у колах постійного струму.

Прилади магнітоелектричної системи володіють високими точністю та чутливістю, малим особистим споживанням енергії. Вони мають рівномірну шкалу (кут відхилення стрілки пропорційний струму), їх показання майже не залежать від впливу зовнішнього магнітного поля. Основний недолік цих приладів – неможливість вимірювань у колах змінного струму.

Для вимірювань у колах змінного струму магнітоелектричні прилади вмикають через випрямлячі. Високо чуттєвий магнітоелектричний прилад, з'єднаний з випрямляючою схемою, називають приладом випрямляючої системи. Випрямляючі елементи (діоди) монтуєть у корпусі приладу. Вони забезпечують одно- або двохперіодне випрямлення змінного струму.

Прилади випрямляючої системи знаходять широке застосування. Зазвичай їх виготовляють комбінованими, тобто

призначеними для вимірювання струму, напруги, опору у колах постійного та змінного струму з різними межами вимірювання.

Випрямляючі схеми вносять додаткові похибки у вимірювання, тому клас точності приладів випрямляючої системи відносно невисокий та зазвичай складає 1,5 – 2,5.

8.8. Прилади електромагнітної системи

В основі роботи приладів електромагнітної системи лежить принцип механічної взаємодії магнітного поля та феромагнітного матеріалу. Пристрій приладу схематично зображено на рис. 8.4. Осердя 3 з магнітом м'якого (для зменшення втрат на гістерезис) матеріалу втягується у котушку 1 при проходженні струму по її обмотці. Протидіючий момент створюється пружиною 2.

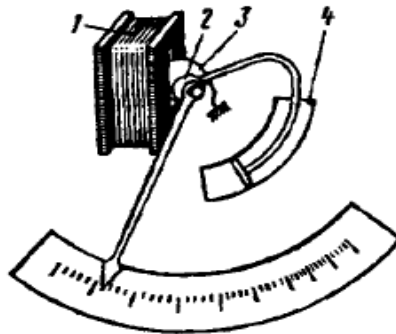


Рис. 8.4. Вигляд приладу електромагнітної системи

Згладжування здійснюється повітряним демпфером 4, що представляє собою гільзу, у якій може переміщуватись легкий поршень, пов'язаний зі стрілкою.

Обертальний момент пропорційний квадрату струму, так як магнітні поля котушки та осердя створюються одним й тим самим вимірювальним струмом, що проходить по котушці:

$$M_{об} = k_1 I^2; \quad M_{пр} = k_2 \alpha;$$

$$k_1 I^2 = k_2 \alpha; \quad \alpha = \frac{k_1}{k_2} I^2 = k I^2 = \frac{k}{R_{\pi}^2} U^2.$$

Останній вираз показує, що кут відхилення стрілки пропорційний квадрату струму або напруги. Шкала приладу квадратична, що стиснута на її початку.

Прилади електромагнітної системи широко застосовують для вимірювань у колах постійного та змінного струмів. Вони прості та надійні, володіють високою перевантажувальною здатністю та механічною міцністю. Однак цим приладам притаманний ряд недоліків, основними з яких є низька чуттєвість, невисока точність, значне особисте споживання енергії, нерівномірність шкали, вплив зовнішніх магнітних полів на показання приладів.

8.9. Прилади електродинамічної системи

Прилади електродинамічної системи засновані на принципі механічної взаємодії провідників, по яких проходить струм.

Пристрій приладу пояснюється на рис. 8.5. Котушка 2 нерухома, котушка 3 поміщується на осі і може повертатись разом з закріпленою на ній стрілкою. Струм до рухомої котушки підводиться за допомогою пружин 1, які одночасно служать для створення

протидіючого моменту. Заспокоєння рухомої системи здійснюється повітряним демпфером 4.

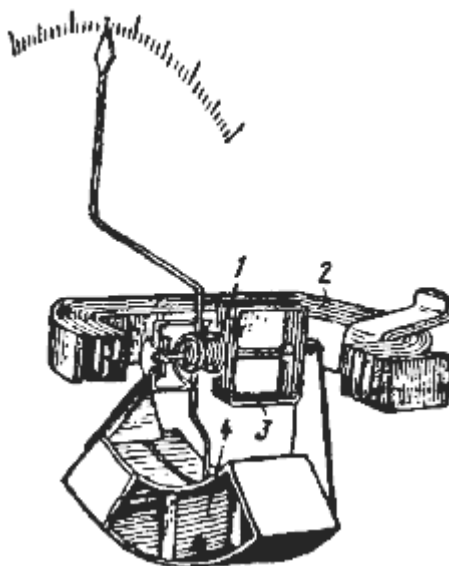


Рис. 8.5. Пристрій приладу електродинамічної системи

Амперметри та вольтметри електродинамічної системи мають квадратичну шкалу.

Широко розповсюджені електродинамічні ватметри – прилади для вимірювання електричної потужності у колах постійного та змінного струмів. Електродинамічні ватметри мають рівномірну шкалу.

Основна перевага приладів електродинамічної системи – велика точність вимірювань у колах постійного та змінного струмів. До недоліків цих приладів слід віднести значне особисте споживання енергії та схильність впливу зовнішніх магнітних полів.

Різновидом приладів електродинамічної системи є феродинамічні прилади, у яких для підвищення обертового моменту магнітний потік нерухомої котушки створюється у спеціальному магнітопроводі.

Конструкція феродинамічного приладу аналогічна конструкції приладу магнітоелектричної системи, у якого постійний магніт замінений електромагнітом. Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід феродинамічного приладу виготовляють з тонких листів електротехнічної сталі або пресують з феромагнітного порошку з електроізоляційним наповнювачем.

Феромагнітне осердя вносить додаткові похибки у вимірювання, однак застосування високоякісних матеріалів та досконалої технології виготовлення дозволяє отримати феродинамічні ватметри класу точності 0,2.

Суттєвим недоліком приладів феродинамічної системи є залежність їх параметрів від частоти вимірювального струму.

8.10. Цифрові прилади

В останні роки все більше розповсюдження знаходять цифрові електровимірювальні прилади. Ці прилади вимірюють значення величини, що безперервно змінюється окремі (дискретні) моменти часу та представляють отриманий результат у цифровій формі.

Уявлення фізичної величини, що безперервно змінюється, у вигляді послідовності її дискретних значень, що відрізняються одне від одного на невелику частку, називається квантуванням вимірюваної величини за рівнем та за часом. Зазвичай інтервал часу між сусідніми вимірюваннями обирають таким, щоб відхилення величини, що змінюється, від фіксованого вимірюваного значення не перевищувало б заданої похибки вимірювання.

Основна перевага цифрових приладів закладається у тому, що результат вимірювання може піддаватись подальшим фізичним та математичним перетворюванням без збільшення похибки, так як цифрове значення величини може бути з будь-яким ступенем точності представлено послідовністю сигналів (наприклад, імпульсів), кожний з яких може мати суттєві спотворення.

Основними елементами цифрових електровимірювальні приладів є тригери, логічні схеми, безконтактні ключи та цифрові вказівники.

Тригери представляють собою електронні схеми з двома стійкими станами, один з яких відповідає цифрі логічного «0», інше – цифрі «1».

У даний час промисловістю випускаються головним чином цифрові вольтметри. Знаходять широке застосування також цифрові амперметри, омметри, частотоміри, фазометри та інші прилади.

Застосування цифрових приладів з дискретним відліком дозволило створити багатоканальні автоматичні пристрої для централізованого контролю багатьох параметрів, що характеризують складні технологічні процеси. Вимірювання параметрів відбувається по черзі з заданою дискретністю за часом.

Цифрові електровимірювальні прилади мають високу точність (похибка від 0,1 до 1 %), велику швидкодію, широкі межі вимірювань, легко комплектуються з цифровими обчислювальними машинами, дозволяють передавати результати без спотворення на необмежені відстані.

До недоліків цих приладів слід віднести їх порівняну складність та високу вартість.

8.11. Вимірювання напруги, струмів та потужності

Для вимірювання струму у будь-якій гілці електричного кола амперметр вмикають послідовно з її елементами. Зокрема, для вимірювання струму навантаження амперметр вмикають послідовно зі споживачем (рис. 8.6, а). Щоб увімкнення амперметру не спотворювало режим роботи електричного кола, його опір повинен бути можливо малим.

Вольтметр вмикають паралельно тієї гілки електричного кола, напругу на якій необхідно виміряти (рис. 8.6, б).

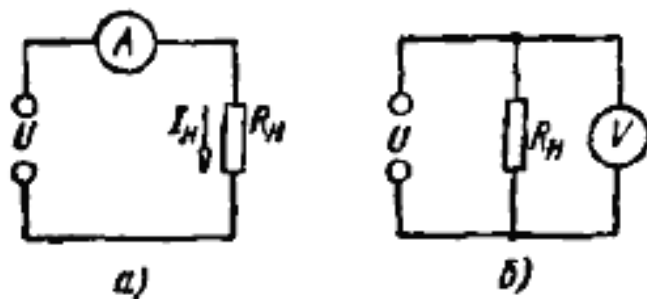


Рис. 8.6. Схеми увімкнення амперметра (а) і вольтметра (б)

Щоб увімкнення вольтметра не призводило до зміни струмів у колі, його опір повинен бути значно більший опору гілки, паралельно якої підключений вимірювальний прилад.

Для вимірювання потужності у колах постійного та однофазного змінного струмів використовують ватметри електродинамічної системи.

Схема увімкнення та зовнішній вигляд ватметра електродинамічної системи представлений на рис. 8.7, а, б. Нерухому (амперметру) обмотку ватметра вмикають у коло послідовно, рухому (вольтметру) – паралельно споживачу. У відповідності з цим на лицьову панель ватметра виведені чотири затискачі, два з яких позначимо символом I (струмові затискачі), а два інших – символом U (затискачі напруги). Два затискачі помічені точками називаються генераторними.

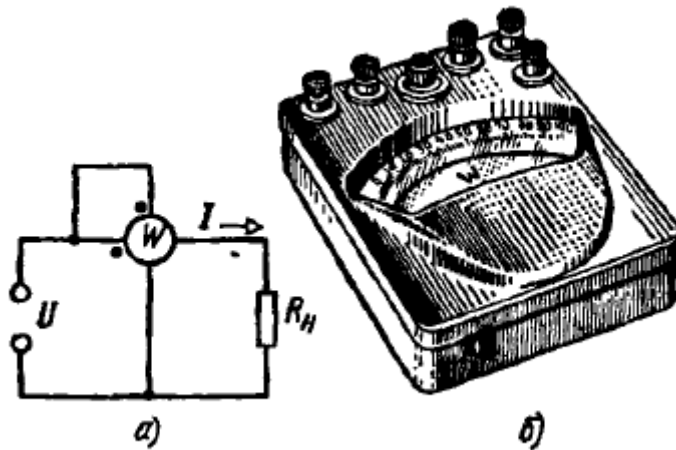


Рис. 8.7. Схема увімкнення (а) та зовнішній вигляд (б) ватметра електродинамічної системи

Щоб зрозуміти призначення генераторних затискачів, розглянемо дві можливі схеми увімкнення обмоток ватметра, зображені на рис. 8.8. У схемі рис. 8.8, а, потужність, що вимірюється ватметром $P_{\text{вим}} = U_V I_A = (U_H + I_H R_A) I_H = U_H I_H + I_H^2 R_A$, більше

потужності навантаження $P_H = U_H I_H = I_H^2 R_H$ на значення $\Delta P = I_H^2 R_A$.

Отже,

$$\delta = \frac{\Delta P}{P_H} = \frac{I_H^2 R_A}{I_H^2 R_H} = \frac{R_A}{R_H}.$$

У схемі рис. 8.8, б потужність, що вимірюється ватметром,

$$P_{\text{вим}} = U_V I_A = U_H (I_H + I_V) = U_H I_H + U_H I_V,$$

більша потужності навантаження $P_H = U_H I_H$ на значення $\Delta P = U_H I_V$,

тобто $\delta = \frac{\Delta P}{P_H} = \frac{U_H I_V}{U_H I_H} = \frac{I_V}{I_H} = \frac{R_H}{R_V}.$

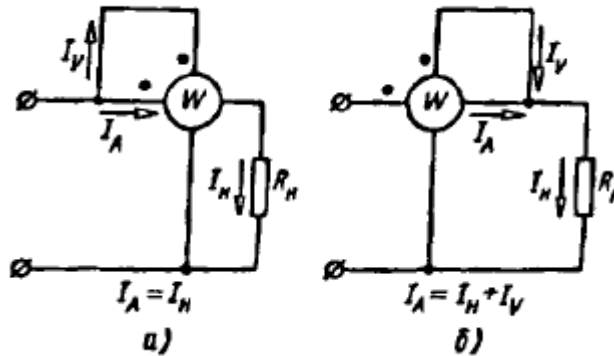


Рис. 8.8. До оцінки систематичної похибки ватметра

Таким чином, в обох випадках виникає систематична похибка, що залежить від схеми з'єднання.

При правильному увімкненні ватметра стрілка буде відхилятися вправо. Щоб змінити напрямок відхилення стрілки, необхідно змінити напрямок струму у будь-якій з обмоток ватметра.

8.12. Розширення меж вимірювання приладів безпосередньої оцінки

Обмотка амперметра розрахована на невеликі струми. Для збільшення меж вимірювання амперметра застосовують шунти. Рис. 8.9 пояснює виведення формули для опору шунта. Позначення на рисунку: $R_{\text{ш}}$ – опір шунта; R_A – опір амперметра; I – вимірюваний струм; $I_{\text{ш}}$ – струм, що проходить через шунт; I_A – максимально допустимий струм амперметра; $n = I/I_A$ – коефіцієнт розширення меж вимірювання амперметром.

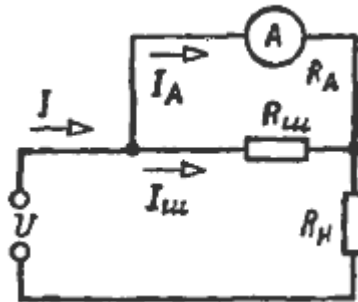


Рис. 8.9. До розрахунку опору шунта

У відповідності з рис. 9.9:

$$I_A = I \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_A}; \quad n = \frac{I}{I_A} = \frac{R_{\text{ш}} + R_A}{R_{\text{ш}}}; \quad R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n - 1}.$$

Виведена для $R_{\text{ш}}$ формула дозволяє за відомим опором амперметра та заданим коефіцієнтом розширення меж вимірювання підрахувати опір шунта.

Для розширення меж вимірювання вольтметра застосовують додаткові резистори, які вмикають послідовно з обмоткою

вольтметра (рис. 8.10). Позначення на рисунку: $R_{\text{дод}}$ – додатковий резистор; R_V – опір вольтметра; U – вимірювана напруга; U_V – максимально допустима напруга вольтметра; I_V – струм, що проходить через вольтметр; $m = U/U_V$ – коефіцієнт розширення меж вимірювання вольтметром.

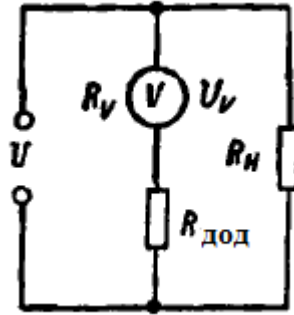


Рис. 8.10. До розрахунку опору додаткового резистора

У відповідності з рис. 8.10 отримаємо:

$$U = I_V(R_V + R_{\text{дод}}); \quad U_V = I_V R_V;$$

$$m = \frac{U}{U_V} = \frac{R_V + R_{\text{дод}}}{R_V};$$

$$R_{\text{дод}} = R_V(m - 1).$$

Остання формула дозволяє за заданим коефіцієнтом розширення меж вимірювання та відомому опору вольтметра знайти опір додаткового резистора.

Окрім шунтів та додаткових резисторів у схемах змінного струму для розширення меж вимірювання застосовуються вимірювальні трансформатори, які одночасно забезпечують безпеку операторів при вимірюваннях у високовольтних колах.

Первинна обмотка трансформатора струму вмикається послідовно у гілку, де вимірюється струм, а вторинна обмотка від'єднується до затискачів амперметра.

Первинна обмотка трансформатора струму містить один або декілька витків, вторинна обмотка – велику кількість витків. Для забезпечення безпеки один кінець вторинної обмотки заземлений. Шкала амперметрів, що вмикаються через трансформатор струму, розрахована на 5 А (рідше на 1 А).

Межі вимірювань трансформаторами струму розширюються у k разів, де k – коефіцієнт трансформації.

Трансформатор напруги змінює межі вимірювання вольтметра також в k разів. Багатовиткова первинна обмотка трансформатора напруги під'єднується паралельно ділянці, напруга на якій вимірюється, а вторинна обмотка – до затискачів вольтметра. Кількість витків вторинної обмотки менше, ніж первинної ($\omega_2 < \omega_1$).

Контрольні запитання

1. Яка сутність та значення електричних вимірювань?
 2. Наведіть основні одиниці електричних та магнітних величин у міжнародній системі одиниць.
 3. Дайте пояснення похідних та кратних одиниць.
 4. Дайте пояснення основним методам електричних вимірювань.
 5. Охарактеризуйте похибки вимірювальних приладів.
 6. Наведіть класифікацію електровимірювальних приладів.
- Умовні позначення на шкалі.

7. Охарактеризуйте прилади магнітоелектричної системи.
8. Охарактеризуйте прилади електромагнітної системи.
9. У чому полягає процес вимірювання напруги, струмів та потужності?
10. Як можна розширити межі вимірювання приладів безпосередньої оцінки?

Глава 9. Напівпровідникові прилади

9.1. Провідники, ізолятори та напівпровідники

У сучасній техніці для виготовлення напівпровідникових приладів використовують елементи четвертої групи періодичної системи Д.І. Менделєєва, германій та кремній, атоми яких мають по чотири електрони на зовнішніх валентних оболонках. Кристалічні решітки цих елементів будуються таким чином, що кожний атом пов'язаний з сусідніми двома ковалентними зв'язками. І це можна представити як рух двох електронів по одній орбіті, що охоплює ядра двох сусідніх атомів (рис. 9.1).

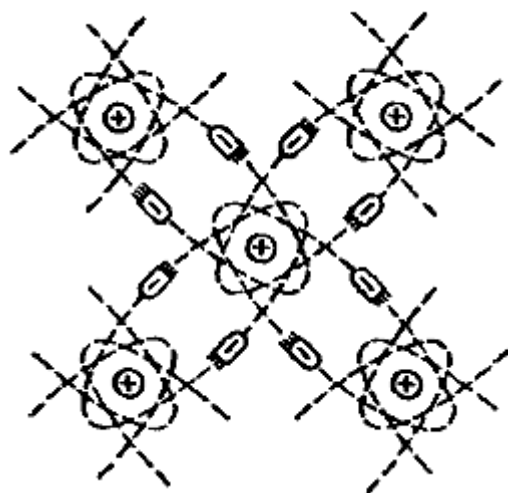


Рис. 9.1. Плоска планетарна модель кристалів германію та кремнію

У якості регулюючих домішок, що надають кристалам германію та кремнію потрібні властивості, застосовують або

п'ятивалентні елементи (сурма, миш'як, фосфор), або тривалентні (бор, індій, галій, алюміній).

Кількість атомів домішки зазвичай на декілька порядків менше кількості атомів основного елементу, так що на тисячі атомів германію або кремнію приходить тільки один атом домішки.

Енергетична діаграма кристалічного германію з достатньо високою концентрацією домішки миш'яку зображена на рис. 9.2.

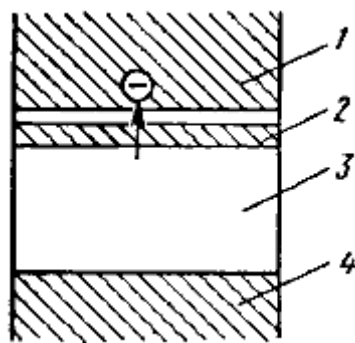


Рис. 9.2. Енергетична діаграма напівпровідникового кристалу з електропровідністю: 1 – зона провідності; 2 – домішкова зона; 3 – заборонена зона; 4 – валентна зона

Так як домішкова зона та зона провідності розташовуються поряд, а іноді й перекриваються, вже при невеликих температурах значна частина електронів домішкової зони переходить у зону провідності. При кожному такому переході утворюється пара носіїв заряду: електрон у зоні провідності та дірка у домішковій зоні. Припустимо, що до кристалу прикладена зовнішня напруга, яка зазвичай становить декілька десятків вольт. Під дією цієї напруги позитивно заряджені дірки, переходячи з одного електричного

підрівня домішкової зони на близько розташований інший підрівень, практично миттєво «притискуються» до дна домішкової зони. Подальший рух дірок, що пов'язаний зі збільшенням значень їх енергії, буде неможливий, так як вони не зможуть подолати широку заборонену зону. Що стосується електронів, то вони безперешкодно рухаються назустріч прикладеній напрузі, переходячи у зону провідності з одного енергетичного підрівня на інший.

Таким чином, у розглянутому випадку проходження струму через кристал забезпечується електронами. Електропровідність кристалу називається *електронною*, а домішка, що поставляє електрони у зону провідності, - *донорною*. П'ятивалентна донорна домішка у чотиривалентному кристалі створює електронну електропровідність.

Що стосується дірок, то вони впорядковано рухаються у напрямку прикладеної напруги, набуваючи додаткової енергії, яка відповідає цій напрузі, та безперешкодно переходячи з одного на інший енергетичний підрівень широкої валентної зони.

Таким чином, проходження струму через кристал забезпечується дірками. Електропровідність такого кристалу називається *дірковою*, а домішка, яка відбирає електрони з валентної зони, - *акцепторною*. Тривалентна акцепторна домішка у чотиривалентному кристалі створює діркову електропровідність.

Кристали з електронною електропровідністю, у яких електричний струм створюється впорядкованим рухом негативних зарядів, називаються кристалами *типу n* (від negative – негативний).

Кристали з дірковою провідністю, у яких електричний струм створюється впорядкованим рухом позитивних зарядів, називаються кристалами *типу p* (від *positive* – позитивний).

Поряд з основними носіями зарядів деяку роль у створенні електропровідності відіграють неосновні носії, кількість яких суттєво зростає при забрудненні кристалу сторонніми домішками. У кристалах *n* - типу основними носіями є електрони, неосновними – дірки. У кристалах *p* - типу основні – дірки, неосновні – електрони.

9.2. Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковим діодом називають компонент з двома виводами та одним електронно-дірковою переходом. Розрізняють *точкові* (рис. 9.3) та *площинні* (рис. 9.4) діоди.

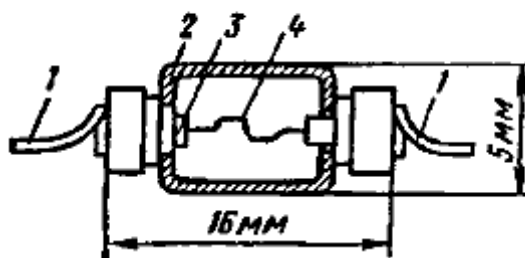


Рис. 9.3. Конструкція точкового германієвого діоду типу Д103: 1 – вивід; 2 – скляний корпус; 3 – напівпровідниковий кристал; 4 – стальна пружина

У скляному або металевому корпусі 2 точкового діоду кріпиться германієвий або кремнієвий кристал *n*-типу з площею порядку 1 мм² та товщиною 0,5 мм, до якого притискається стальна або бронзова

голка 4, легована акцепторною присадкою. Діод вмикається у схеми через виводи 1. Навколо голки утворюється мікроскопічна (точкова) область з дірковою електропровідністю. На напівсферичній межі цієї області з кристалом n -типу виникає електронно-дірковий перехід.

Мала площа p - n -переходу у точковому діоді забезпечує йому мінімальне значення міжелектродної ємності.

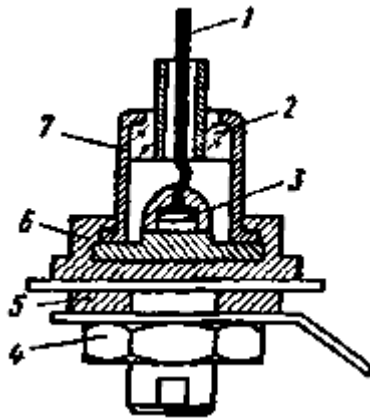


Рис. 9.4. Конструкція площинного випрямного діоду: 1 – вивід; 2 – скляна втулка; 3 – напівпровідниковий кристал; 4 – гайка; 5 – шайба; 6 – основа; 7 – металевий корпус

Потужні площинні напівпровідникові діоди, що розраховані на великі струми, виготовляють у масивних металевих корпусах, які забезпечують споживання та відвід теплоти, що виділяється у p - n - переході. За допомогою масивних шайб та гайок корпус діоду щільно притискається до монтажної металевої панелі.

Основною характеристикою діоду служить його вольт-амперна характеристика, вигляд її зображено на рис. 9.5.

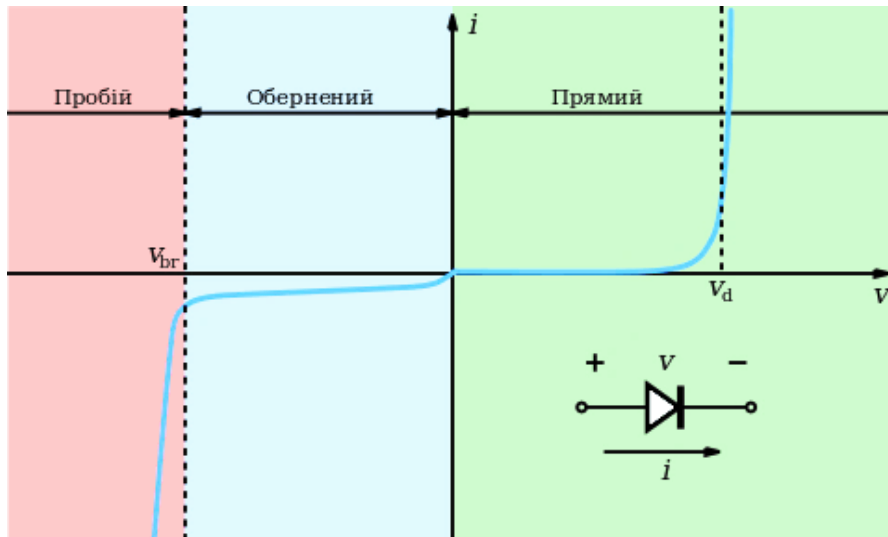


Рис. 9.5. Вольт-амперна характеристика діода

Рисунок демонструє чотири режими роботи напівпровідникового діода. При оберненій напрузі, більшій за V_{br} , настає пробій — різке збільшення струму. При оберненій напрузі, меншій від V_{br} , існує тільки малий струм насичення, здебільшого, порядку мікроамперів. При прикладенні напруги в прямому напрямку, струм зростає експоненційно, залишаючись малим до напруги V_d - напруги відкриття діода. Ця напруга може бути різною, в залежності від типу діода, - від 0,2 В для діодів Шоткі, до 4 В у блакитних світлодіодів.

Вольт-амперна характеристика діода суттєво залежить від температури навколишнього середовища, з підвищенням якої прямий струм діода при одній й тій самій напрузі може збільшуватись у декілька разів. При заданому прямому струмі зі збільшенням температури знижується пряма напруга між електродами діода.

Суттєвим чином впливає температура навколишнього середовища й на зворотний струм, який також зростає зі збільшенням температури. При збільшенні температури навколишнього середовища вище певного значення вже при невеликих зворотних напругах розвивається тепловий пробій *p-n*-переходу й діод виходить з ладу. Працездатність германієвих діодів втрачається при температурі десь 70°C , а кремнієвих – при 200°C . Висока термічна стійкість кремнію – важливіша його перевага порівняно з іншими напівпровідниковими матеріалами. Кремнієві діоди допускають щільність струму у прямому напрямку 10 А/мм^2 та більше, що дозволяє виготовляти потужні напівпровідникові пристрої з відносно невеликими масами та габаритами.

Одна з важливих характеристик діоду – *пробивна зворотна напруга*. Ця напруга залежить від ширини об'єданого прошарку та у сучасних площинних діодів рівна сотням та тисячам вольт. Вона дещо збільшується із підвищенням температури, що не виходить за межі працездатності діоду.

Внутрішній опір площинних діодів прямому струму при номінальних режимах роботи складає десяті долі Ом, із підвищенням температури він зменшується.

Застосування напівпровідникових діодів у сучасній техніці досить різноманітне. Розглянемо найбільш характерні випадки.

Напівпровідникові діоди, призначені для випрямлення змінного струму, називають *випрямними*. Площинні діоди малої та середньої потужності широко використовують у схемах живлення радіоапаратури, у пристроях автоматики та обчислювальній техніці.

Діоди великої потужності використовують у силових установках для живлення тягових електродвигунів, приводу станків та механізмів, забезпечення технологічних процесів у хімічному та металургійному виробництвах.

Діоди призначені для роботи у пристроях високої та надвисокої частоти (ультракороткохвильовий, радіолокація, телевимірювальна техніка та інше), називають *високочастотними*. НВЧ - діоди використовуються для модуляції та детектування надвисоких коливань у діапазоні сотень мегаГерц, а також у каскадах перетворення частоти радіоприймальних пристроїв. У якості високочастотних зазвичай застосовують точкові діоди, ємність електронно-діркового переходу в яких складає соті та десяті долі пікофарад.

Детекторні властивості НВЧ-діоду, що визначаються коефіцієнтом випрямлення, залежать від ємності *p-n*- переходу. Чим менше ця ємність, тим більше коефіцієнт випрямлення.

Раніше встановили, що ширина об'єданого прошарку, отже, ємність електронно-діркового переходу, залежать від напруги, прикладеної у напрямку, що не проводить. Така залежність дає можливість змінювати ємність діоду, варіюючи зворотну напругу на ньому. Діоди, що застосовуються у якості конденсаторів електрично керованої ємності називають *варикапами*. Ці параметричні діоди працюють при зворотному напрузі, від якої залежить бар'єрна ємність. Таким чином, варикапи є конденсатори змінної ємності, керованої не механічно, а електрично, при зміні зворотної напруги.

Варикапи застосовуються головним чином для настройки коливальних контурів.

Наявність у діоду критичної зворотної напруги, при якій настає електричний (не тепловий) пробій, дозволяє використати напівпровідниковий діод у схемах стабілізації напруги. Одна з можливих схем стабілізації представлена на рис. 9.6. Вихідна напруга схеми з великим ступенем точності підтримується на заданому рівні $U_{\text{вих}} = \text{const}$, рівному критичній (пробивній) напрузі діоду $U_{\text{ст}}$. Різниця між вхідною та вихідною напругою гаситься на опорі $R_{\text{Г}}$.

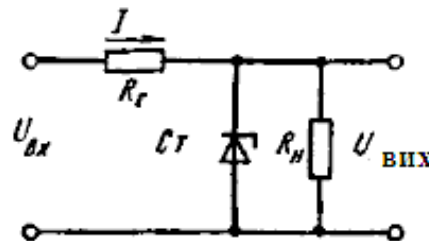


Рис. 9.6. Схема стабілізації напруги

Якщо вихідна напруга зростає, то збільшується й зворотний струм діоду, зростає струм I та знижується напруга на опорі, що гасить, $R_{\text{Г}}$. Прирости напруг $\Delta U_{\text{вих}}$ та $\Delta I R_{\text{Г}}$ взаємно компенсуються, а $U_{\text{вих}}$ зберігається на заданому рівні.

Діод, що використовується для стабілізації напруги, називається *стабілітроном*. Недолік розглянутої схеми – залежність пробивної напруги стабілітрону, а отже, й вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ від температури. Цю залежність можна здійснити суттєво зменшивши, увімкнувши послідовно зі стабілітроном компенсуючий діод у

прямому напрямку. Вольт-амперна характеристика стабілітрона зображена на рис. 9.7.

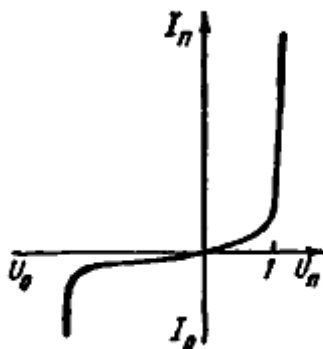


Рис. 9.7. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

При великих концентраціях легованих домішок помітно посилюється тунельний ефект p - n -переходу. При цьому у вольт-амперній характеристиці діоду з'являється ділянка з негативним опором (прямий струм збільшується зі зменшенням прямої напруги), що дозволяє використати його у схемах генерації та підсилення електричних коливань. Такі діоди називаються *тунельними*.

Для роботи в імпульсних схемах виготовляють імпульсні діоди, у яких перерозподіл напруги (перехідні процеси) відбувається у десяти долі наносекунди.

9.3. Система позначень діодів

У відповідності до системи позначень, розробленої до 1964 р., скорочене позначення діодів складалося з двох або трьох елементів. Перший елемент буквенний, Д – діод. Другий елемент – номер, відповідний типу діода: 1 ... 100 – точкові германієві, 101 ... 200 –

точкові кремнієві, 201 ... 300 – площинні кремнієві, 801 ... 900 – стабілітрони, 901 ... 950 – Варикапи, 1001 ... 1100 – випрямні стовпи. Третій елемент – буква, що означає різновид приладу. Цей елемент може бути відсутнім, якщо різновидів діода немає.

В даний час існує система позначень, відповідна ДОСТ 10862-72. У новій, як і в старій системі, прийнято наступний поділ на групи по граничній частоті підсилення (передачі струму): на низькочастотні НЧ (до 3 МГц), середньої частоти СЧ (від 3 до 30 МГц), високочастотні ВЧ (понад 30 МГц) і надвисокочастотні СВЧ; по потужності, що розсіюється: на малопотужні (до 0,3 Вт), середню (від 0,3 до 1,5 Вт) і велику (понад 1,5 Вт) потужності.

Нова система маркування діодів більш досконала. Вона складається з чотирьох елементів. Перший елемент (буква або цифра) вказує вихідний напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлений діод: Г або 1 – германій, К або 2 – кремній, А або 3 – арсенід галію, 1 або 4 – фосфід індію. Другий елемент – буква, що показує клас або групу діода. Третій елемент – число, що визначає призначення або електричні властивості діода. Четвертий елемент вказує на порядковий номер технологічної розробки діода і позначається від А до Я. Наприклад, діод КД202А розшифровується: К – матеріал, кремній, Д – діод випрямний, 202 – призначення і номер розробки, А – різновид; 2С920 – кремнієвий стабілітрон великої потужності різновиди типу А; АІ301Б – фосфід-індієвий тунельний діод перемикає різновиди типу Б. Іноді зустрічаються діоди, позначені по застарілих систем: ДГ- Ц21, Д7А, Д226Б, Д18. Діоди Д7 відрізняються від діодів ДГ-Ц суцільнометалевою конструкцією корпусу, внаслідок чого вони

надійніше працюють у вологій атмосфері. Германієві діоди типу ДГ-Ц21 ... ДГ-Ц27 і близькі до них за характеристиками діоди Д7А ... Д7Ж зазвичай використовують у випрямлячах для живлення радіоапаратури від мережі змінного струму. В умовне позначення діода не завжди входять деякі технічні дані, тому їх необхідно шукати в довідниках по напівпровідниковим приладам. Одним із винятків є позначення для деяких діодів з буквами КС або цифрою замість К (наприклад, 2С) – кремнієві стабілітрони. Після цих позначень стоїть три цифри, якщо це перші цифри: 1 або 4, то взявши останні дві цифри і розділивши їх на 10 одержимо напругу стабілізації $U_{ст}$. Наприклад, КС107А – Стабістор, $U_{ст} = 0,7$ В, 2С133А – стабілітрон, $U_{ст} = 3,3$ В. Якщо перша цифра 2 або 5, то останні дві цифри показують $U_{ст}$, наприклад, КС 213Б – $U_{ст} = 13$ В, 2С 291А – $U_{ст} = 91$ В, якщо цифра 6, то до останніх двох цифр слід додати 100 В, наприклад, КС 680А – $U_{ст} = 180$ В.

Маркування діодів. На корпусі діода зазвичай вказують матеріал напівпровідника, з якого він виготовлений (буква або цифра), тип (буква), призначення чи електричні властивості приладу (цифра), букву, відповідну різновиди приладу, і дату виготовлення, а також його умовне позначення. Умовне позначення діода (анод і катод) вказує, як потрібно підключати діод на платах пристроїв. Діод має два виведення, один з яких катод (мінус), а інший – анод (плюс). Умовне графічне зображення на корпусі діода наноситься у вигляді стрілки, що вказує пряме напрямком, якщо стрілки немає, то ставиться знак «+». На плоских виводах деяких діодів (наприклад, серії Д2) прямо штамповано умовне позначення діода і його тип. При нанесенні

колірного коду, кольорову мітку, точку або смужку наносять ближче до анода (рис. 9.8). Для деяких типів діодів використовується кольорове маркування у вигляді крапок і смужок (табл. 9.1). Діоди старих типів, зокрема точкові, випускалися в скляному оформленні та маркірувалися літерою «Д» з додаванням цифри і букви, що позначають підтип приладу. Германієво-індієві площинні діоди мали позначення «Д7».

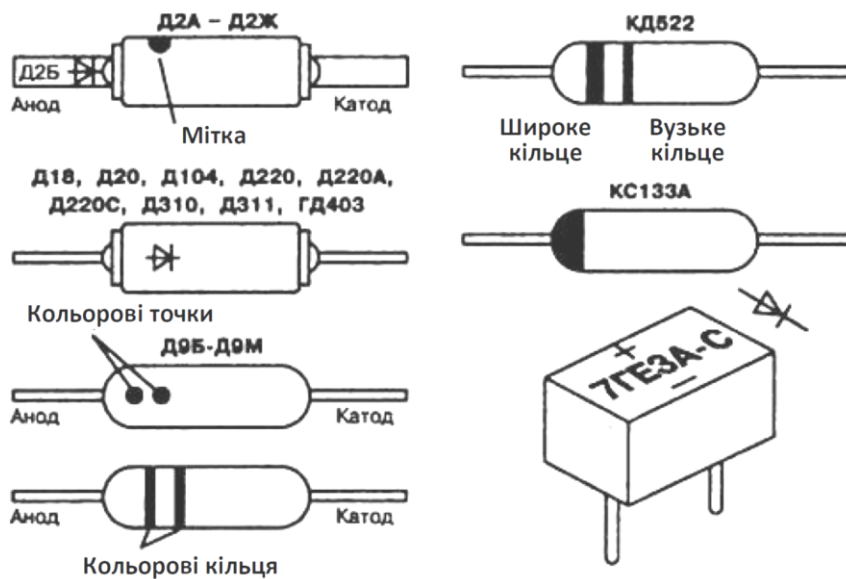


Рис. 9.8. Нанесення колірному коду на діоди

Таблиця 9.1. Колірне маркування напівпровідникових діодів

Тип діода	Колір кільця (к), точки (т)	
	з боку катоді (в середині корпусу)	з боку анода
Д2Б Д2В Д2Д Д2Е Д2Ж Д2І		Біла т. Помаранчева т Блакитна т. Зелена т. Чорна т. Червона т.

Д9Б Д9В Д9Г Д9Д Д9Е Д9Ж Д9І Д9К Д9Л	Червона т. Помаранчева т. Жовта т. Біла т. Блакитна т. Зелена і блакитна т. Дві жовті т. Дві білі т. Дві зелені т.	Червона т.
КД102А КД102Б	Жовта т. Помаранчева т.	Зелена т. Синя т.
КД103А КД103Б		Синя т. Жовта т.
КД105А КД105Б КД105В КД105Г	Біла або жовта смуга на торці корпусу	Зелена т. Червона т. Біла або жовта т.
КД106 КД209А * КД209Б, КД209В КД209Г	Мітка чорного, зеленого або жовтого кольору	Біла т. Чорна т. Зелена т.

* Колір корпусу коричневий.

Тип діода	Колір кільця (к), точки (т)	
	з боку катода (в середині корпусу)	з боку анода
КД226А КД226Б КД226В КД226Г КД226Д КД226Е		Помаранчеве кільце Червоне кільце Зелене кільце Жовте кільце Біле кільце Блакитне кільце
КД243А КД243Б КД243В КД243Г КД243Д	Фіолетове кільце Помаранчеве кільце Червоне кільце Зелене кільце Жовте кільце	

КД243Е	Біле кільце	
КД243Ж	Блакитне кільце	
КД510А	Одне широке і два вузьких зелених кільця	
2Д510А	Одне широке і одне вузьке зелене кільця	
КД521А		1 шир + 2 вузькі
КД521Б		Сині смуги
КД521В		Жовті смуги
КД522А	Одне вузьке чорне кільце	Одне широке
КД522Б	Два вузьких чорних кільця	Чорне кільце
КД522В	Три вузьких чорних кільця	+ Тип діода

Умовні позначення деяких напівпровідникових діодів зображені на рис. 9.9.

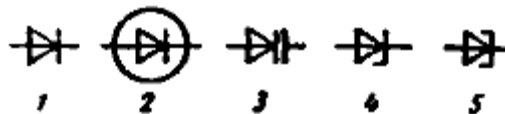


Рис. 9.9. Умовні позначення напівпровідникових діодів:

1 – випрямний діод; 2 – НВЧ-діод; 3 – варикап; 4 – стабілітрон;

5 – тунельний діод

9.4. Біполярний транзистор

Біполярним транзистором називають напівпровідниковий прилад, основу якого складають два взаємодіючих електронно-діркових переходи та який має три або більше виводів.

Біполярний транзистор здатний підсилювати, виконувати генераторні та ключові функції.

Матеріали, методи отримання p - n -переходів, параметри та конструктивне оформлення сучасних транзисторів досить різноманітні.

Транзистор, у якого тип електропровідності областей змінюється у наступному порядку: p (емітер), n (база), p (колектор) називають транзистором *типу p - n - p* . Він може бути виготовлений й на основі кремнію n -типу. Якщо у якості бази використовувати германій або кремній p -типу, а емітерний та колекторний переходи утворити за допомогою донорних матеріалів, то отримаємо транзистор типу n - p - n . Такі транзистори застосовують у високочастотних схемах.

Принцип дії транзисторів обох типів однаковий. Різниця у тому, що полярність увімкнення джерел живлення Bat1 і Bat2 для них протилежна, саме це рис. 9.10 і демонструє. На цьому рисунку зображена схема з загальним емітером на біполярних транзисторах, відповідно n - p - n і p - n - p типів. У транзисторі типу n - p - n колекторний струм створюється рухом дірок, а у транзисторі типу p - n - p – рухом електронів.

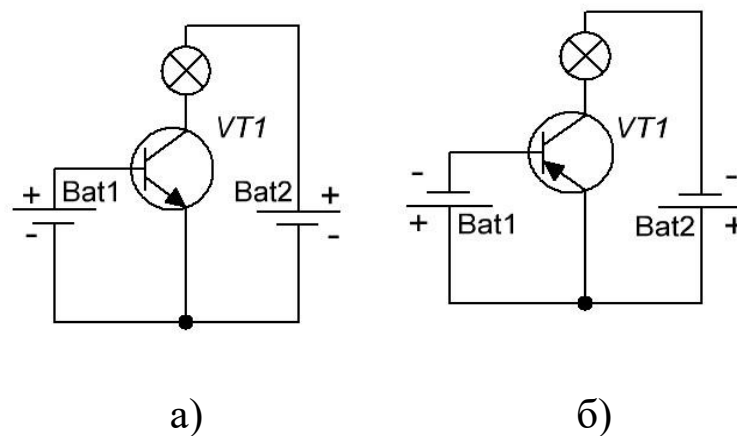


Рис. 9.10. Увімкнення джерел живлення транзистора: а – типу n - p - n
б – типу p - n - p

Відмітимо, що назви «*емітер*» (інжектор, випромінювач носіїв заряду), «*колектор*» (збирач носіїв) та «*база*» відповідають функціональному призначенню цих частин біполярного транзистору.

Полярність електродів транзисторів показана на рис. 9.11, причому база заземлена (потенціал дорівнює нулю).

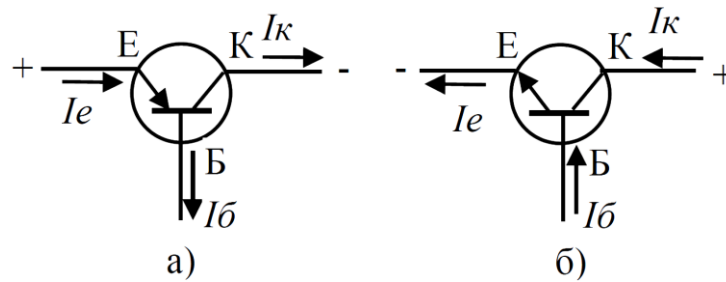


Рис. 9.11. Умовні позначення біполярних транзисторів: а – типу *p-n-p*; б – типу *n-p-n*

Розглядаючи послідовність прошарків біполярного транзистору, наважко переконатись, що у принципі працездатність приладу збережеться, якщо емітер та колектор змінити місцями. Але вмикати транзистор у схему слід у суворій відповідності з позначенням його виводів згідно типу транзистора.

Незалежно від типу транзистора (*p-n-p* або *n-p-n*) застосовують три основні схеми його увімкнення: зі *спільною базою*, зі *спільним емітером*, зі *спільним колектором*.

Коефіцієнтом підсилення сигналу назвемо відношення його приросту на виході до приросту на вході:

$$k_x^{\text{б}} = \Delta x_{\text{вих}} / \Delta x_{\text{вх}}$$

(індекс справа нагорі відповідає схемі увімкнення). Отже коефіцієнт підсилення за струмом:

$$k_i^{\text{б}} = \Delta I_{\text{вих}} / \Delta I_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{е}} = \alpha;$$

за напругою:

$$k_a^{\text{б}} = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}} = R_{\text{н}} \Delta I_{\text{к}} / (R_{\text{вх}}^{\text{б}} \Delta I_{\text{е}}) = \alpha R_{\text{н}} / R_{\text{вх}}^{\text{б}};$$

за потужністю:

$$k_p^{\text{б}} = k_i^{\text{б}} k_u^{\text{б}} = \alpha^2 R_{\text{н}} / R_{\text{вх}}^{\text{б}}$$

Тут $R_{\text{н}}$ – опір навантаження; $R_{\text{вх}}^{\text{б}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{е}}$ – вхідний опір транзистора, увімкненого за схемою зі спільною базою. Значення $R_{\text{вх}}^{\text{б}}$ лежать у межах від одиниць до десятків Ом.

Вхідні та вихідні характеристики транзистора отримують експериментально, перехідні характеристики можуть бути побудовані на основі сімейства вихідних характеристик.

При розрахунку кіл широко застосовують уявлення транзисторів у вигляді чотиріполюсників. При цьому параметри транзистора характеризують *коефіцієнтами чотиріполюсника*. Для біполярного транзистору ці коефіцієнти прийнято називати *h-параметрами*, їх можна визначити розрахунком або експериментально.

Слід відмітити, що одним з суттєвих недоліків транзисторів є відносно висока нестабільність їх параметрів та характеристик. Причини нестабільності наступні: розкид параметрів у процесі виготовлення однотипних транзисторів; вплив температури навколишнього середовища; вплив радіоактивних випромінювань; зміна параметрів за зміною частоти підсилювальних сигналів; зміна параметрів при старінні транзисторів з плином часу.

Для транзисторів характерний також відносно високий рівень власних шумів, що викликаються тепловими флуктуаціями щільності носіїв зарядів.

9.5. Польові транзистори

Фізичні принципи, покладені в основу польових транзисторів, були відомі давно, однак їх реалізація зустріла суттєві технічні важкості.

У польових транзисторах використовують ефект впливу поперечного електричного поля на провідність каналу, по якому рухаються носії електричного заряду.

Польові каналні транзистори мають суттєві переваги, до яких перш за все відносяться великий вхідний опір приладів ($10^{10} - 10^{15}$ Ом), велика стійкість до проникаючого випромінювання (допускається рівень випромінювання на 3 – 4 порядки більший, ніж для біполярних транзисторів), малий рівень власних шумів, малий вплив температури на підсилювальні властивості.

Польові транзистори виготовляють двох типів: з затвором у вигляді *p-n*-переходу та з ізольованим затвором.

Пристрій транзистора з затвором у вигляді *p-n*-переходу схематично представлений на рис. 9.12. Основу приладу складає слабо легована напівпровідникова пластинка *p*-типу, до торців якої прикладена напруга U_c , що створює струм I_c через опір навантаження R_n . У напівпровідниковій пластині цей струм забезпечується рухом основних носіїв заряду. Торець пластини, від якого рухаються носії заряду, називається *витоком*. Торець, до якого рухаються носії заряду, - *стоком*. У дві протилежні бокові поверхні основної пластини вплавлені пластинки типу. На межі розділу пластин та виникають електронно-діркові переходи. До цих переходів у

непровідному напрямку прикладена вхідна напруга $u_{\text{ВХ}}$. Значення напруги $u_{\text{ВХ}}$ можна змінювати при обов'язковому збереженні вказано на рисунку полярності. Пластини n -типу утворюють *затвор*. При вказаній полярності напруги на затворі навколо цих пластин утворюється прошарок, збіднений носіями заряду i , отже, маючий малу провідність. Між збідненими прошарками зберігається канал з високою провідністю.

Принцип дії польового транзистору заснований на зміні ширини збідненого прошарку при зміні зворотної напруги p - n переходу. Зі збільшенням напруги на затворі ширина збіднених прошарків збільшується, а поперечний переріз каналу та його провідність зменшуються.

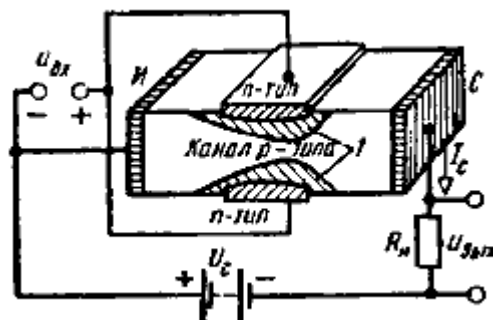


Рис. 9.12. Схематичне зображення польового транзистора з переходами: В – витік; С – стік; 1 – збіднений прошарок

Таким чином, змінюючи напругу $u_{\text{ВХ}}$ на затворі, можна змінювати струм через опір навантаження $R_{\text{Н}}$ та вихідну напругу $u_{\text{ВВХ}}$.

Роботу польового транзистору прийнято характеризувати залежністю струму стоку $I_{\text{С}}$ від напруги між виток та стоком $U_{\text{С}}$ при різних значеннях напруги на затворі $U_{\text{З}}$. Спочатку зі збільшенням $U_{\text{С}}$

струм I_c зростає практично лінійно. Потім настає режим насичення та збільшення U_c не призводить до зросту струму. Це пояснюється тим, що при насиченні напруженість поздовжнього поля та канал у області стоку звужуються. Причому чим більше напруженість поздовжнього про шарку (чим більше U_c), тим більше звужується канал в області стоку. Струм при цьому залишається постійним. Струм насичення тим менший, чим більша напруга на затворі (зворотна напруга p - n -переходу).

Будова польового транзистору з ізолюваним затвором схематично показана на рис. 9.13. Основу приладу складає пластина напівпровідника p -типу. На невеликій відстані один від одного у поверхню основної пластини вплавляють донорну домішку. Потім поверхню пластини кремнію піддають термічній обробці, у результаті чого на ній нарощується тонкий (0,1 мкм) прошарок діоксиду, що є гарним ізолятором.

Транзистори з ізолюваним затвором частіше називають транзисторами *типу МДН* (метал – діелектрик – напівпровідник). Спрощено принцип його роботи можна представити наступним чином: за відсутності напруги на затворі області n витоку та стоку розділені непровідним прошарком основної пластини; при подачі на затвор позитивної напруги електрони витягуються з основної пластини та накопичуються під ізолюваним прошарком. При певній різниці потенціалів концентрація електронів під діелектриком перевищить концентрацію дірок та області n будуть з'єднані провідним електронним каналом.

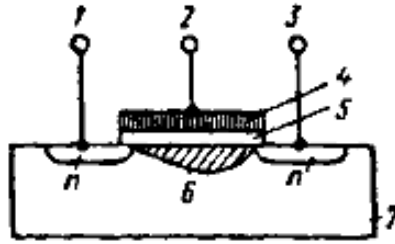


Рис. 9.13. Схематичне зображення польового транзистора з ізольованим затвором: 1 – виток; 2 – затвор; 3 – стік; 4 – метал; 5 – діелектрик; 6 – канал *n*-типу; 7 – напівпровідник *p*-типу

У розглянутому випадку провідний канал між витком та стоком індукований напругою затвору. Напруга затвору змінює концентрацію носіїв та провідність вбудованого каналу.

9.6. Тиристори

Перші промислові зразки тиристорів з'явилися наприкінці п'ятдесятих років. У теперішній час ці прилади отримали широке розповсюдження. Переваги тиристорів наступні: малі маса та габарити, великий строк служби, високий ККД, мала чуттєвість до вібрацій та механічних перевантажень, здатність працювати при низьких (прямих) та високих (зворотних) напругах, а також за дуже великих струмів, що досягають сотні ампер.

Основна властивість тиристора, що забезпечує йому найрізноманітніші застосування у автоматиці, електроніці, енергетиці, – це здатність знаходитись у двох стійких станах: *закритому* та *відкритому*. У закритому стані опір тиристорів складає

десятки мільйонів Ом та він практично не пропускає струм при напругах до тисячі вольт; у відкритому – опір тиристорів незначний. Падіння напруги на ньому десь 1 В при струмах у десятки та сотні ампер. Перехід тиристорів з одного стану в інший відбувається за дуже короткий час, практично стрибком. Серед тиристорів виділяють *диністори* та *триністори*.

Диністор – це тиристор з двома електродами (виводами). Перехід диністора з одного стану в інший здійснюється зміною значення або полярності напруги на виводах.

Тиристор, що забезпечений третім (керуючим) електродом, називаються *триністором*. Керуючий електрод дозволяє за допомогою невеликого сигналу керування (імпульсу напруги) перевести тиристор з закритого стану у відкритий при незмінній (заданій) напрузі на основних електродах. Зворотній перехід з відкритого стану у закритий за допомогою керуючої напруги неможливий. Структура тиристорів складає чотири (*p-n-p-n*) або п'ять (*p-n-p-n-p*) прошарку. В останньому випадку називають *симетричним*. Чотирипрошаркова структура тиристора зображена на рис. 9.14. Тиристор складає три переходи: Π_1, Π_2, Π_3 .

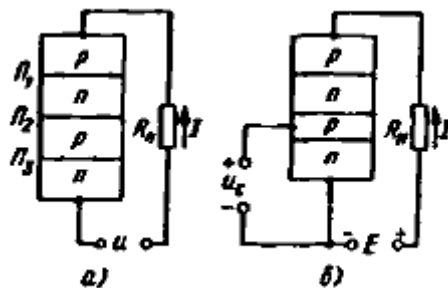


Рис. 9.14. Схематичне зображення тиристора: а – диністор;
б – триністор

Основною для тиристорів є *вольт-амперна* характеристика, що показує залежність струму у навантаженні від напруги кола. Ця характеристика (рис. 9.15) має складний вигляд, так як при зміні напруги змінюється не тільки струм I_0 , але й коефіцієнти α_1, α_2 .

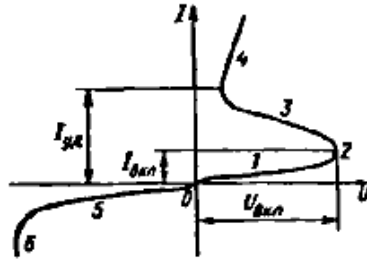


Рис. 9.15. Вольт-амперна характеристика диністора

Струм, за якого опір тиристорів стає негативним, називають *струмом включення* $I_{вкл}$. Для того щоб перевести тиристор з відкритого (увімкненого) стану закритий, необхідно знизити струм через нього до значень, менших значення струму, що утримується $I_{уд}$.

Сімейство вольт-амперних характеристик тиристорів представлено на рис. 9.16.

Подаючи на керуючий електрод відповідний сигнал, можна змінювати напругу увімкнення тиристора. Чим більше струм керування I_y , тим менше напруга увімкнення тиристора.

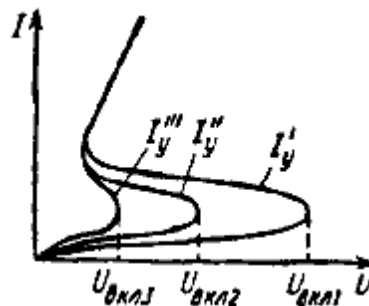


Рис. 9.16. Вольт-амперна характеристика триністора

Вольт-амперна характеристика симетричного тиристора з п'ятипрошарковою структурою ($p-n-p-n-p$) зображена на рис. 9.17. У відповідності з симетрією структури симетрична й характеристика приладу.

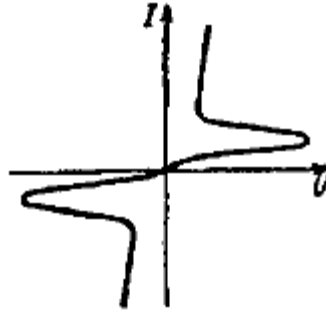


Рис. 9.17. Вольт-амперна характеристика симетричного тиристора

Раніше відмічалось, що керуючий електрод може змінювати тільки момент увімкнення (напруги увімкнення) тиристора. Для переведення тиристора з відкритого стану у закритий необхідно зменшити струм тиристора до значень, менших $I_{уд}$. У колах змінного струму це відбувається при зміні полярності живлючої напруги. У колах постійного струму зворотнo переключення тиристора потребує спеціальних пристроїв. Один з можливих варіантів схеми наведений на рис. 9.18.

При подачі на базу транзистора імпульсу напруги струм через транзистор різко зростає та відповідно зменшується струм тиристора.

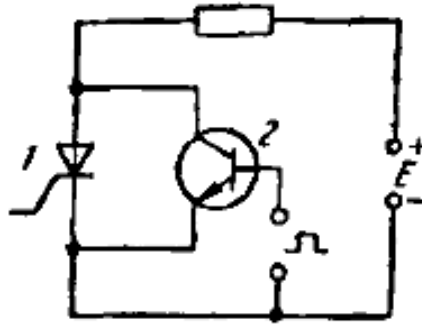


Рис. 9.18. Увімкнення тиристора за допомогою шунтованого транзистору: 1 – тиристор; 2 – транзистор

Увімкнення тиристора здійснюється подачею імпульсу напруги на керуючий електрод К, який на схемі не позначений.

9.7. Області застосування транзисторів та тиристорів

Транзистори та тиристори виявились економічно ефективними при заміні електронно-вакуумних пристроїв, їх застосування дало можливість вирішити рід нових задач у електроніці, у приладобудуванні.

Слід відмітити, що у багатьох випадках схеми з одним й тим самим функціональним призначенням можуть бути зібрані як на транзисторах, так і на тиристорах. Тому перед конструктором стоїть задача – використовуючи сучасну елементну базу, розробити найбільш ефективні та економічні пристрої.

Транзистори та тиристори застосовують у провідному зв'язку та радіозв'язку, у телебаченні та радіолокації, радіонавігації, автоматичі

та телемеханіці. Всі галузі сучасного народного господарства потребують постійного розширення асортименту та збільшення кількості напівпровідникових приладів.

Особливою областю застосування потужних та надпотужних (та струми в тисячі ампер та напруги в тисячі вольт) тиристорів є електроенергетика. Можливість створення малогабаритних, надійних та економічних статичних перетворювачів будь-яких параметрів струму відкриває великі перспективи для подальшого вдосконалення систем передачі та розподілу електроенергії, керування електроприводом та іншими електротехнічними пристроями.

Схеми електро- та радіотехнічних пристроїв містять десятки та сотні транзисторів. Для їх зображення введені спеціальні стандартизовані умовні позначення, які наводяться нижче.

Різноманітність типів транзисторів та тиристорів потребувала їх класифікації (за матеріалом та конструктивному оформленню, за принципом дії, за умовами експлуатації та інше). Основні типові особливості транзисторів та тиристорів відображені у їх маркуванні.

Маркування приладів здійснюється буквено-цифровим кодом. Буква або цифра, що стоїть попереду, характеризує вихідний напівпровідниковий матеріал: Г (або 1) – германій; К (або 2) – кремній. Буква, що стоїть на другому місці, визначає клас приладу: Т – біполярний транзистор; П – польовий транзистор; Н – диністор; У – триністор. На третьому місці ставиться цифра, що визначає параметри приладу (потужність, струм, діапазон частот). Далі слід двозначне число від 01 до 99, що значить номер розробки, та буква, що вказує різновид технологічного типу.

Умовні позначення польових транзисторів та тиристорів дані на рис. 9.19.

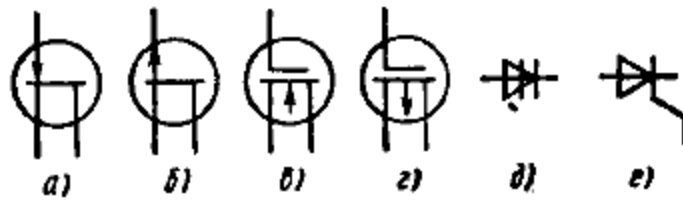


Рис. 9.19. Умовні позначення польових транзисторів та тиристорів: а – польовий транзистор з керуючим p - n -переходом та каналом n -типу; б – те саме, з каналом p -типу; в – польовий МДН-транзистор з каналом n -типу; г – те саме, з каналом p -типу; д – диністор; е – триністор.

Контрольні запитання

1. Охарактеризувати провідники, ізолятори та напівпровідники.
2. Що таке електропровідність напівпровідників?
3. Що таке електронно-дірковий перехід?
4. Охарактеризувати дію напівпровідникових діодів.
5. Охарактеризувати дію біполярного транзистору.
6. Розкажіть про роботу польового транзистора.
7. Розкажіть про роботу тиристора.
8. Яке призначення електродів транзисторів і тиристорів?
9. Приведіть приклад умовних позначень діодів, транзисторів, тиристорів.
10. Наведіть приклади застосування транзисторів, тиристорів.

Глава 10. Випрямлячі змінного струму

10.1. Загальні відомості про випрямлячі

Випрямлячі – це пристрої, які служать для перетворення змінного струму у постійний. Вони широко застосовуються у різних електронних апаратах, так як більшість блоків цих апаратів потребують живлення постійним струмом.

На рис. 10.1 показана структурна схема випрямляча, у склад якого входять: силовий трансформатор, що служить для перетворення змінної живленої напруги; вентиль, що володіє односторонньою провідністю та забезпечує перетворення змінного струму у випрямлений (струм одного напрямку); фільтр, що згладжує, який служить для перетворення випрямного струму у струм, близький за формою до постійного.



Рис. 10.1. Структурна схема випрямляча

Сучасні випрямлячі розрізняють за типом вентилів, схеми їх включення та числу фаз джерела змінної напруги. Випрямлячі підрозділяють також на *керовані* та *некеровані*. Для живлення блоків електронної апаратури, як правило, застосовують випрямлячі малої потужності з живленням від однофазних мереж змінного струму. У тих випадка, коли необхідно отримати підвищену постійну напругу,

а первинне джерело також виробляє постійну напругу, застосовують спеціальні перетворювачі – *інвентори*.

10.2. Однопівперіодний випрямляч

На рис. 10.2 представлена схема однопівперіодного випрямляча. Змінну синусоїдальну напругу u_2 (рис. 10.3, а) подають на діод D . За рахунок односторонньої провідності діодів струм i_2 (рис. 10.3, б) проходить тільки позитивні напівперіоди напруги u_2 і, отже, має імпульсну форму. Постійна складова цього струму I_0 визначається середнім значенням струму i_2 , що проходить через навантаження R_H за напівперіод.

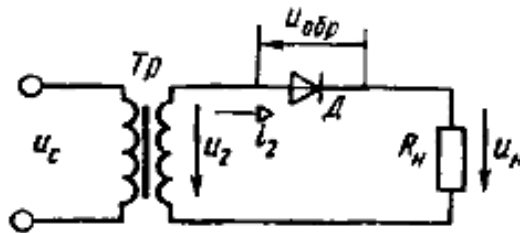


Рис. 10.2. Схема однопівперіодного випрямляча

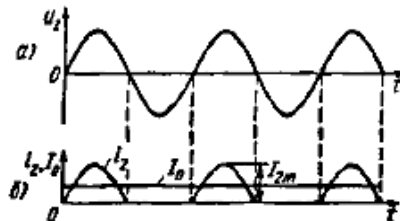


Рис. 10.3. Напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора (а); випрямлений струм i_2 , постійна складова струму I_0 (б)

Важливим параметром, що характеризує роботу випрямляча, є коефіцієнт пульсації:

$$k_{\text{п}} = U_{1m}/U_0, \quad (10.1)$$

де U_{1m} – амплітуда першої гармоніки змінної напруги на навантаженні випрямляча (імпульсна напруга на навантаженні може бути розкладена у ряд Фур'є). Так як для однопівперіодного випрямляча $U_{1m} = U_{2m}/2 = \pi U_0/2 = 1,57U_0$, то на підставі (10.1) отримуємо $k_{\text{п}} = 1,57$.

Таким чином, для $k_{\text{п}}$ однонапівперіодного випрямляча великий, що є головним недоліком цієї схеми.

Наряду з цим, у такому випрямлячі погано використовуються обмотки трансформатора. Дійсно, згідно (10.1), так як при однопівперіодному випрямленні $I_{2m} = 2I_2$, то $I_0 = 0,636I_2$, тобто постійна складова значено менше діючого значення струму у вторинній обмотці.

10.3. Двохнапівперіодний випрямляч

Найбільш широке поширення отримала мостова схема двохпівперіодного випрямляча (рис. 10.4). Схема складається з силового трансформатора T_p та чотирьох діодів $D_1 - D_4$. До діагоналі мосту ac підключена вторинна обмотка трансформатора, до діагоналі bd опір навантаження R_H . У позитивний півперіод напруги u_2 (рис. 10.5, а), коли потенціал точки a вище потенціалу точки c (див. рис. 10.4), відкриті діоди D_1 та D_3 і струм проходить по колу: точка a , діод D_1 , опір навантаження R_H , діод D_3 , точка c .

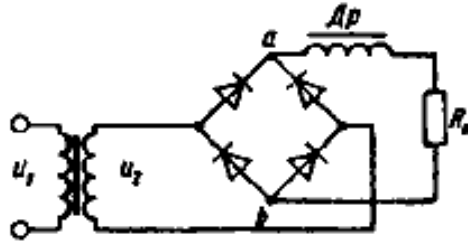


Рис. 10.4. Мостова схема двохпівперіодного випрямляча

У негативний півперіод напруги u_2 відкриті діоди D_2 та D_4 , і тепер струм проходить по колу: точка c , діод D_2 , R_H , діод D_4 , точка a . Через опір навантаження R_H струм проходить весь час у незмінному напрямку. Таким чином, струм у навантаженні має форму, показану на рис. 10.5, б, що і відповідає двохнапівперіодному випрямленню.

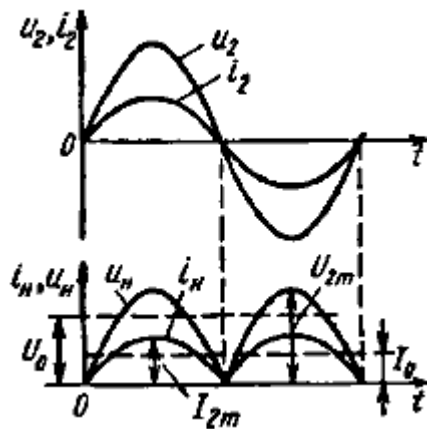


Рис. 10.5. Графіки напруги та струмів у мостовій схемі випрямляча

Постійна складова струму навантаження I_0 визначається, як і в схемі однопівперіодного випрямляча, середнім значенням струму i_H і, згідно (10.1),

$$I_0 = 2I_{2m}/\pi = 0,636I_{2m}, \quad (10.2)$$

тобто у двохпівперіодному випрямлячі постійна складова струму у двічі більше, ніж у однопівперіодному.

Так як у мостовій схемі через вторинну обмотку трансформатора проходить синусоїдальний струм i_2 , то, і, згідно (10.2), $I_0 = 0,9I_2$.

Знайдемо тепер співвідношення між U_0 та U_2 . Так як постійна складова напруги $U_0 = I_0 R_H$, то $U_0 = 0,636I_{2m}R_H$. Якщо врахувати, що $R_H \gg R_{пр.д}$, то $I_{2m}R_H = U_{2m}$, тобто:

$$U_0 = 0,636U_{2m}, \quad (10.3)$$

але так як $U_{2m} = \sqrt{2}U_2$, то отримаємо $U_0 = 0,9U_2$.

Зворотна напруга, що діє на кожний діод у даній схемі така сама, як і в схемі однопівперіодного випрямляча. Дійсно, коли діоди D_1 та D_3 відкриті, то до діоду D_2 прикладена повна зворотна напруга вторинної обмотки через відкритий діод D_1 . Так само зворотна напруга прикладена й до діоду D_4 . Отже, $U_{звм} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ і, згідно (10.3), $U_{звм} = 1,57U_0$.

Мале значення коефіцієнта пульсації $k_{\Pi} = 0,67$ також є перевагою даної схеми.

10.4. Випрямлячі на тиристорі. Стабілізатор напруги

По даному розділі були розглянуті схеми випрямлячів, у яких регулювання випрямленої напруги та струму можна здійснювати або у колі змінного струму за допомогою автотрансформатора, або у колів випрямленого струму за допомогою потенціометру та реостату. Але ці способи управління мають суттєві недоліки. По-перше, вони володіють низьким ККД через значні втрати у регулювальних

пристроях та, по-друге, в них неможливо застосовувати сучасні схеми автоматичного регулювання.

У теперішній час широко розповсюджені випрямлячі з керованими напівпровідниковими діодами – тиристорами.

Проаналізуємо роботу простого однопівперіодного випрямляча на тиристорі (рис. 10.6). Дана схема аналогічна розглянутій раніше, тільки діод у ній замінений тиристором.

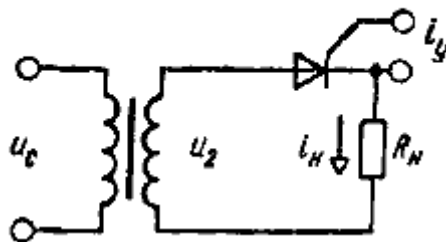


Рис. 10.6. Схема однопівперіодного випрямляча на тиристорі

У схемі з тиристором діод відкривається тільки при подачі на нього керуючого імпульсу.

Пристрій, що підтримує автоматично постійну напругу на навантаженні при зміні дестабілізуючих факторів у певних межах, називається *стабілізатором напруги*. Такими дестабілізуючими факторами є вхідна напруга та опір навантаження, які змінюються у процесі роботи пристрою.

Існує два методи стабілізації напруги: *параметричний* та *компенсаційний*.

У параметричних стабілізаторах використовуються елементи з нелінійною вольт-амперною характеристикою, розглянуті раніше (іонний та кремнієвий стабілізатори).

Компенсаційні стабілізатори володіють більш оптимальними параметрами. Робота таких стабілізаторів заснована по порівнянні вхідної напруги з заданою стабільною. У залежності від різниці між стабільною та вихідною напругою (неузгодженість) здійснюється автоматичний вплив (регулювання), направлений на зменшення цієї неузгодженості. У якості прикладу розглянемо схему стабілізатора, наведену на рис. 10.7.

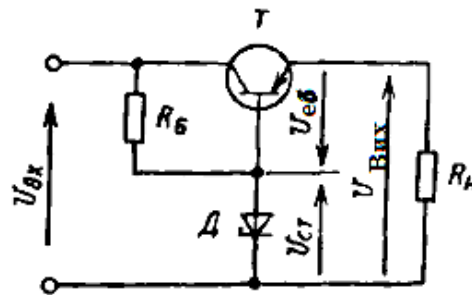


Рис. 10.7. Схема стабілізатора напруги

Стабільна (опорна) напруга $U_{ст}$ створюється на кремнієвому стабілітроні D . Транзистор T відіграє роль порівняльного та регулюючого елементу. Між емітером та базою діє невелика позитивна напруга $U_{еб} = U_{ст} - U_{вих}$. Таким чином, $U_{вих} \approx U_{ст}$.

При збільшенні опору навантаження схема працює так само. Зменшення вхідної напруги визве збільшення $U_{еб}$ та інше. У кінцевому висновку $U_{еб}$ майже не зміниться.

Важливим параметром, що характеризує роботу схеми стабілізатору, є *коефіцієнт стабілізації*, що представляє собою відношення відносної зміни вхідної напруги до відносної зміни вихідної напруги (при $R_{н} = const$):

$$k_{\text{ст}U} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вих}}/U_{\text{вих}}},$$

де $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{вих}}$ – номінальні значення вхідної та вихідної напруги.

10.5. Фільтри, що згладжують. Випрямлення з помножувачем напруги

Живлення ряду вузлів електронної апаратури зазвичай потребує сталої напруги. Напруга ж, що отримується на виході розглянутих випрямлених схем, є або пульсуючою (трифазний випрямляч), або імпульсною (одно- та двохпівперіодний випрямляч). Для того, щоб випрямлена напруга мала бажану форму, застосовують фільтри, що згладжують.

Кількісно робота фільтра характеризується *коефіцієнтом згладжування пульсації q* , який показує, у скільки разів зменшується пульсація при проходженні сигналу через даний фільтр:

$$q = k_{\text{п}}/k'_{\text{п}},$$

тут $k_{\text{п}}$ та $k'_{\text{п}}$ – коефіцієнти пульсації сигналу до та після.

Наряду з малим значенням коефіцієнту пульсації у фільтрі не повинно бути значних втрат постійної складової випрямленої напруги.

Фільтри, що згладжують, підрозділяються на *ємнісні, індуктивні, індуктивно-ємнісні та резистивно-ємнісні*.

Найбільш простим є ємнісний фільтр, який складається з конденсатора $C_{\text{ф}}$, увімкненого паралельно з навантаженням $R_{\text{н}}$ (рис. 10.8, а). Робота фільтру заснована на здатності конденсатора швидко

запасати електричну енергію, а потім відносно повільно віддавати її у навантаження.

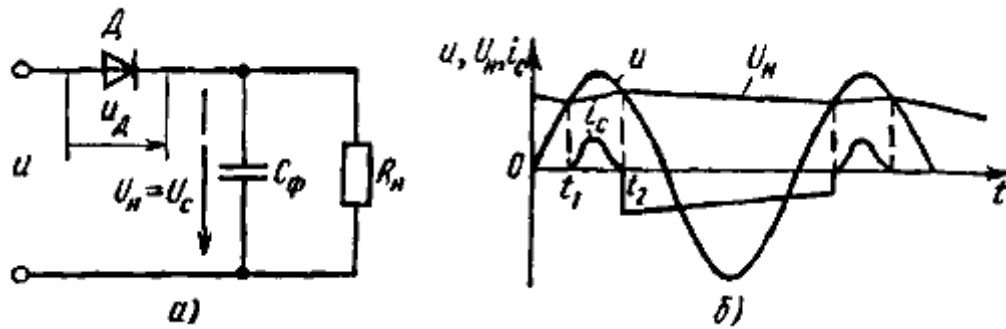


Рис. 10.8. Схема ємнісного фільтру (а); графіки напруги та струмів у ньому (б)

Коли напруга на діоді D , що рівна різниці напруги джерела і напруги на конденсаторі, позитивна, тобто $U_d = u - U_c > 0$, то діод відкритий та C_ϕ заряджається. Як видно з графіка на рис. 10.10, б, зарядка відбувається в інтервалі часу від t_1 до t_2 . Так як опір діода D малий, конденсатор встигає зарядитися майже до u . Потім, коли $u - U_c < 0$, діод закритий та конденсатор повільно розряджається до тих пір, доки напруга джерела знову не стане більше U . Час розрядки залежить від сталої часу $\tau = C_\phi R_n$, яка показує, на протязі якого часу напруга на конденсаторі зменшиться у 2,72 рази.

Ємнісні фільтри, як правило, використовують у випрямлячах малої потужності.

Типовою схемою випрямляча із застосуванням ємнісних фільтрів є *помножувач* напруги. На рис. 10.9 показана схема подвоювача напруги. В один з півперіодів напруги, коли відкритий діод D_1 , конденсатор C_1 заряджається майже до напруги джерела. У

цей час діод D_2 закритий. У наступний напівперіод відкривається D_2 та відбувається зарядка конденсатора C_2 . Діод D_1 закритий. Так як конденсатори C_1 та C_2 увімкнені послідовно, напруга на навантаженні R_H подвоюється. При відповідному виборі параметрів схеми розрядка конденсаторів через R_H відбувається достатньо повільно.

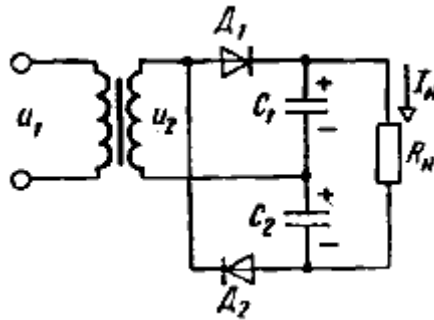


Рис. 10.9. Схема подвоювача напруги

У випрямлячах з великими струмами застосовують індуктивні фільтри (рис. 10.10), які є індуктивною котушкою (дроселем) з відносно великою індуктивністю. Індуктивні фільтри працюють достатньо ефективно у двохпівперіодних випрямлячах, так як за рахунок явища самоіндукції струм у навантаженні i_H не падає до нуля при нульовій нарузі між точками a та b кола і коефіцієнт пульсації помітно зменшується (рис. 10.11).

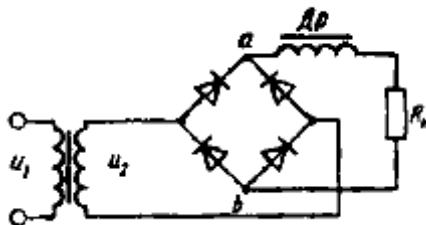


Рис. 10.10. Схема індуктивного фільтру у колі випрямляча

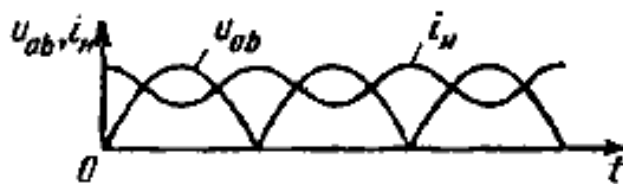


Рис. 10.11. Графік напруги та струму у двохпівперіодному випрямлячі з індуктивним фільтром

В однопівперіодному випрямлячі застосування індуктивного фільтру недоцільно, так як під час негативного півперіоду струм у навантаженні падає до нуля і коефіцієнт пульсації практично не знижується.

На практиці, як правило, застосовують комбіновані фільтри: Г-подібні та П-подібні (рис. 10.12). Ці фільтри забезпечують гарне згладжування струму у навантаженні. Їх роботу зручно пояснювати, уявляючи напругу на вході фільтру як суму постійної складової та цілого ряду гармонік (змінних складових). Тоді індуктивність та ємність фільтру представляють собою як дільник. На індуктивному опорі дільника виділяється велика частина змінної, а на ємнісній – велика частина постійної складової напруги випрямляча.

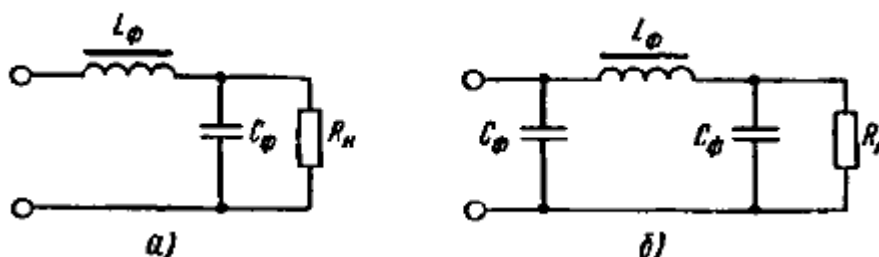


Рис. 10.12. Схема фільтрів: а – Г-подібного; б – П-подібного

У малопотужних схемах дросель може бути замінений резистором. Це дає можливість зменшити масу, габарити та вартість фільтру, однак згладжування при цьому погіршується.

Контрольні запитання

1. Наведіть загальні відомості про випрямлячі.
2. Охарактеризуйте однопівперіодний випрямляч.
3. Охарактеризуйте двохпівперіодний випрямляч.
4. Охарактеризуйте трифазний випрямляч.
5. Пояснити процес випрямлення на тиристорі.
6. Пояснити дію стабілізатора напруги.
7. Наведіть загальні відомості про фільтри, що згладжують.

Глава 11. Електронні підсилювачі

11.1 Загальні відомості

Підсилювач - це схема, призначена для збільшення амплітуди вхідного сигналу. Підсилювачі характеризуються коефіцієнтами підсилення по напрузі K_u , по струму K_I , по потужності K_P .

$$U_{\text{вих}} = K_u U_{\text{вх}},$$

$$\Delta U_{\text{вих}} = K_u \Delta U_{\text{вх}}$$

$$P(\text{дБ}) = 10 \lg K_P.$$

Коефіцієнт підсилення часто виражається в децибелах. При цьому коефіцієнт підсилення визначається наступним чином:

$$K_u(\text{дБ}) = 20 \lg K_u.$$

Частотні властивості підсилювача описують за допомогою амплітудно - частотні та фазо - частотних характеристик.

- Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) - це залежність коефіцієнта підсилення від частоти. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача змінного струму запропонована на рис.11.1.

Зазначені на рисунку частоти f_n і f_v визначають нижню і верхню граничні частоти підсилення, а їх різниця визначає смугу пропускання підсилювача. В залежності від смуги пропускання підсилювачі розрізняють:

- підсилювачі постійного струму;
- підсилювачі змінного струму;
- підсилювачі низької частоти;
- підсилювачі високої частоти;

- вузькосмугові підсилювачі;
- резонансні підсилювачі;
- широкосмугові підсилювачі.

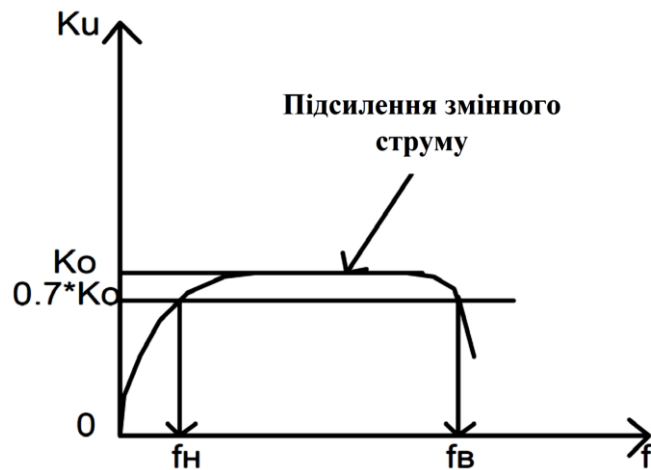


Рис. 11.1 – АЧХ підсилювача змінного струму

На рис. 11.2 запропонована амплітудно-частотна характеристика підсилювача постійного струму, відмінність якої полягає в тому, що на частотах, близьких до нуля коефіцієнт підсилення великий.

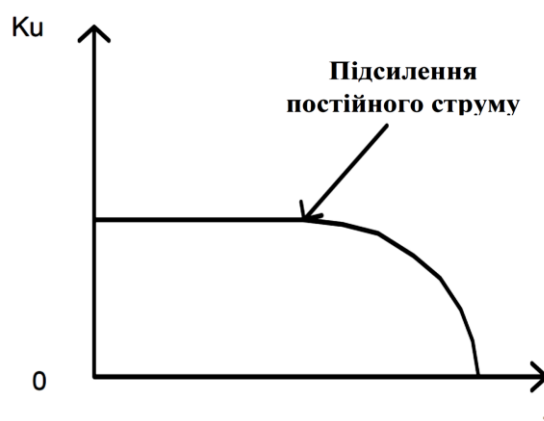


Рис. 11.2. АЧХ підсилювача постійного струму

Фазо-частотна характеристика - це залежність фазового зсуву (затримка синусоїдального сигналу) від частоти.

Підсилувачі характеризують також вхідним і вихідним опором, вихідною потужністю на заданому опорі навантаження, коефіцієнтом корисної дії, коефіцієнтом нелінійних спотворень та іншими параметрами.

Підсилувач зображується у вигляді прямокутника з символом функції у верхньому рядку умовного позначення (рис. 11.3, а). У засобах автоматики підсилувач зображується у вигляді трикутника (рис. 11.3, б), до якого можуть бути підведені зображення проводів живлення.

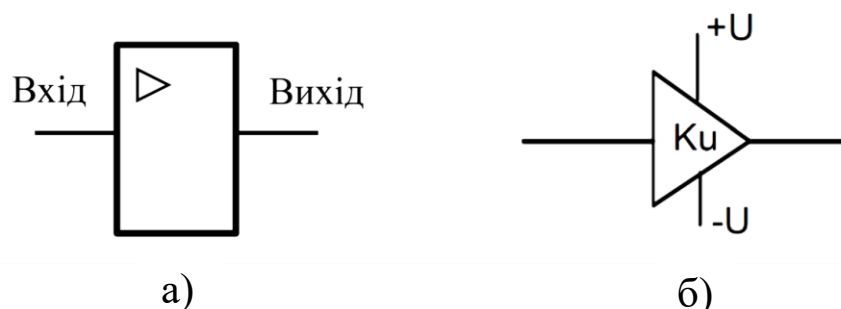


Рис. 11.3. Умовні позначення підсилувачів

Щоб підсилувач володів необхідним коефіцієнтом підсилення, його будують з використанням послідовно включених підсилювальних каскадів.

Каскад - найпростіший підсилувач, організований за функціонально закінченим схемою. Каскад може будуватися на одному або декількох транзисторах. За місцем положення в підсилувачі розрізняють: вхідні, вихідні, проміжні каскади.

Вхідні каскади вирішують проблему сполучення підсилювача з джерелом сигналів і зазвичай вони володіють великим вхідним опором.

Вихідні каскади забезпечують задану навантажувальну здатність і часто володіють великим коефіцієнтом підсилення по струму при невеликому коефіцієнт підсилення по напрузі. Розрахунок підсилювача ведуть, починаючи з вихідних каскадів, чим забезпечується необхідна навантажувальна здатність.

Структура багатокаскадного підсилювача показана на рис. 11.4.

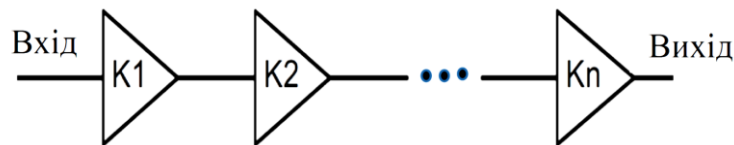


Рис. 11.4. Структура багатокаскадного підсилювача

Загальний коефіцієнт підсилення підсилювача визначається добутком коефіцієнтів підсилення всіх послідовно ввімкнених каскадів:

$$K_1 \cdot K_2 \dots K_n = 1 \cdot 2 \dots .$$

Зауважимо, що при дії перешкоди на підсилювач найбільш небезпечна та перешкода, яка діє на входи перших каскадів, оскільки вона підсилюється всіма каскадами підсилювача. Тому часто вхідні ланцюги першого каскаду екранують, намагаючись тим самим захистити їх від впливу наведених із зовнішнього середовища електромагнітних перешкод.

11.2 Зворотний зв'язок

Зворотній зв'язок - це подача вихідного сигналу або його частини на вхід підсилювача. В залежності від того, підвищує сигнал зворотного зв'язку сумарний коефіцієнт підсилення схеми або зменшує його, розрізняють позитивну і негативну зворотний зв'язок.

В залежності від способу введення сигналу зворотного зв'язку розрізняють зворотний зв'язок по напрузі, зворотний зв'язок по струму і змішаний зворотний зв'язок.

У першому випадку сигнал зворотного зв'язку залежить від амплітуди вихідної напруги, у другому випадку від величини споживаного навантаженням струму.

Розрізняють також зворотний зв'язок по постійному і змінному струму. Негативний зворотний зв'язок по постійному струму дозволяє стабілізувати стан робочої точки підсилювального каскаду і підсилювача в цілому. При аналізі властивостей підсилювача із зворотним зв'язком використовують запропоновану на рис. 11.5 структуру.

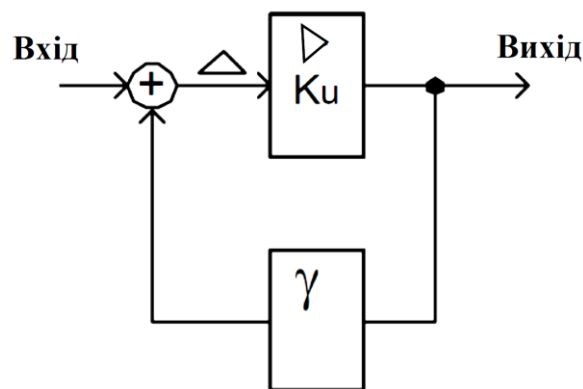


Рис. 11.5. Схема структури підсилювача із зворотним зв'язком

Для цієї схеми справедливі наступні співвідношення:

$$\Delta = U_{\text{вх}} + \gamma U_{\text{вих}},$$

$$U_{\text{вих}} = K_u \Delta,$$

$$U_{\text{вих}} = K_u (U_{\text{вх}} + \gamma U_{\text{вих}}),$$

$$U_{\text{вих}} (1 - \gamma K_u) = K_u U_{\text{вх}},$$

$$K_{\text{зз}} = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} = K_u / (1 - \gamma K_u),$$

де K_u – коефіцієнт підсилення підсилювача без зворотного зв'язку;

γ – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку;

$K_{\text{зз}}$ - коефіцієнт підсилення підсилювача із зворотним зв'язком.

Зазвичай ланцюг зворотного зв'язку не інвертує полярність сигналу.

Якщо коефіцієнт підсилення підсилювача $K_u > 0$, то маємо справу з позитивним зворотним зв'язком. При наближенні K_u до одиниці коефіцієнт підсилення схеми нескінченно зростає і підсилювач перетворюється на генератор електричних сигналів або, подібно тригеру, формує на виході підсилювача максимально можливе граничне значення напруги. В залежності від умов генерується або гармонічний сигнал, або імпульсний.

Якщо коефіцієнт підсилення підсилювача негативний ($K_u < 0$), тобто підсилювач інвертує полярність сигналу, то в знаменнику сума визначиться як: $1 + \gamma |K_u|$ й маємо справу з від'ємним зворотним зв'язком. Можна зауважити, що коефіцієнт підсилення схеми зі зворотним зв'язком при прагненні коефіцієнта підсилення використовуваного підсилювача до нескінченності, він прагне до величини, яка залежить тільки від коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку, тобто

$$K_{зз} = (K_u / (1 + \gamma K_u)) |_{K_u \rightarrow \infty} = -1/\gamma.$$

Негативний зворотний зв'язок, як видно зі сказаного, дозволяє стабілізувати коефіцієнт підсилення по напрузі, тобто зробити його залежним тільки від параметрів зовнішніх компонентів. Крім того, негативний зворотній зв'язок дозволяє розширити смугу пропускання схеми, підвищити або знизити вхідний опір, істотно знизити вихідний опір.

11.3 Схемні рішення підсилювальних каскадів

Розглянемо кілька варіантів схемних рішень підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах.

На рис. 11.6 запропоновано підсилювальний каскад, виконаний за схемою з загальним емітером.

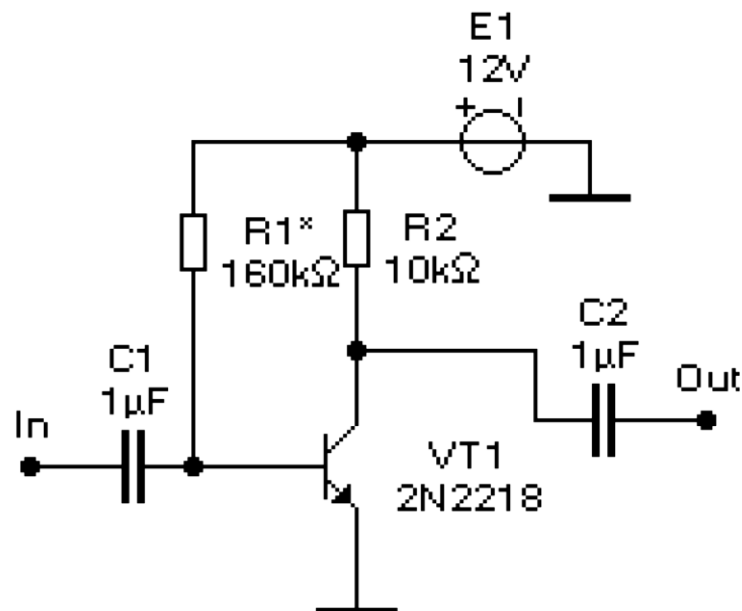


Рис. 11.6. Підсилювальний каскад, виконаний за схемою з загальним емітером

Каскад призначений для підсилення сигналу змінного струму, оскільки розділові конденсатори виключають постійну складову сигналу. Якщо при заданій напрузі живлення E_1 визначено опір резистора в колекторній ланці R_2 (наприклад, задано) і відома початкова напруга на колекторі $U_{ке}$ (стала складова напруги), то легко розрахувати початковий колекторний струм I_k з виразу:

$$I_k = (E_1 - U_{ке})/R_2.$$

Знаючи коефіцієнт підсилення струму в схемі з загальним емітером ($\beta \approx h_{21e}$), легко розрахувати опір резистора R_1 , який гарантує вибраний режим роботи каскаду по постійному струму:

$$R_1 = (E_1 - U_{бe})/I_b,$$

$$I_b = I_k/\beta.$$

Початкову напругу на колекторі $U_{ке=}$ можна задати рівним $E_1/2$, що дозволить на виході отримати неспотворений сигнал з максимальною амплітудою.

Каскад підсилює сигнал по напрузі і струму. Часто представляє інтерес коефіцієнт підсилення каскаду по напрузі, який може бути оцінений з виразу:

$$K_u = (R_2 h_{21e})/h_{11e},$$

де h_{11e} – вхідний диференціальний опір транзистора у схемі із загальним емітером.

Недоліком каскаду є висока чутливість до параметрів транзистора і опору резистора R_1 . Зазвичай передбачається підстроювання опору резистора в процесі налаштування схеми під вибраний транзистор. Незначні зміни коефіцієнта підсилення транзистора при його заміні або при зміні температури приводять до

істотних змін початкової напруги на колекторі, до зміни положення робочої точки.

Щоб істотно знизити нестабільність положення робочої точки при зміні параметрів деталей використовують ланцюги стабілізації положення робочої точки, які припускають застосування негативного зворотного зв'язку. Для стабілізації положення робочої точки можна обмежитися застосуванням негативного зворотного зв'язку по постійному струму. Тоді на змінному струмі зберігається високий коефіцієнт підсилення сигналу.

На рис. 11.7 запропоновано можливе схемне рішення каскаду зі стабілізацією положення робочої точки.

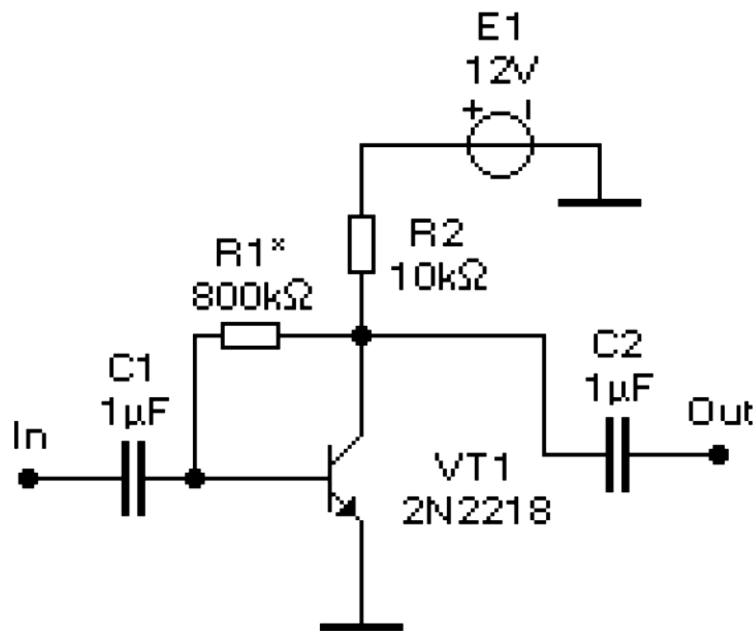


Рис. 11.7. Підсилювальний каскад зі стабілізацією положення робочої точки

По постійному струму справедлива система двох рівнянь:

$$I_{R2} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}},$$

$$I_{\text{б}} = I_{\text{к}} / \beta,$$

де I_{R2} – струм через резистор $R2$.

Ці рівності дозволяють розрахувати при необхідності відсутні параметри схеми або входять в схему компонентів. Наприклад, якщо відомий коефіцієнт підсилення транзистора за струмом β і опір колекторного резистора $R2$ або струм що протікає через нього, то, задавши потрібне значення початкової напруги на колекторі, легко розрахувати опір у базовій ланцюга $R1$.

Легко розрахувати і величину зміщення положення робочої точки каскаду (напруги на колекторі) при зміні параметрів деталей схеми.

Оскільки резистор зворотного зв'язку $R1$ створює негативний зворотний зв'язок, що діє на будь-якій частоті, то коефіцієнт підсилення цього каскаду при однакових умовах з попередньою схемою виявиться нижче.

Широке застосування, особливо у складі операційних підсилювачів, знаходять так звані диференціальні або балансні каскади (рис. 11.8). Особливостями цих каскадів є невисокий дрейф нуля завдяки симетрії і взаємної компенсації змін параметрів транзисторів, наявність прямого та інверсованого входів (диференціальний вхід) і наявність двох виходів (диференціальний вихід). Вхідні сигнали U_+ і U_- формуються відносно потенціалу загального проводу. Каскад підсилює тільки різницевий сигнал. Вихідний диференціальний сигнал каскаду дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{out}+} - U_{\text{out}-} = K_u (U_+ - U_-),$$

де $K_u = (\beta R2) / (R1 + R2)$ – коефіцієнт підсилення каскаду за умови $R1 = R2$.

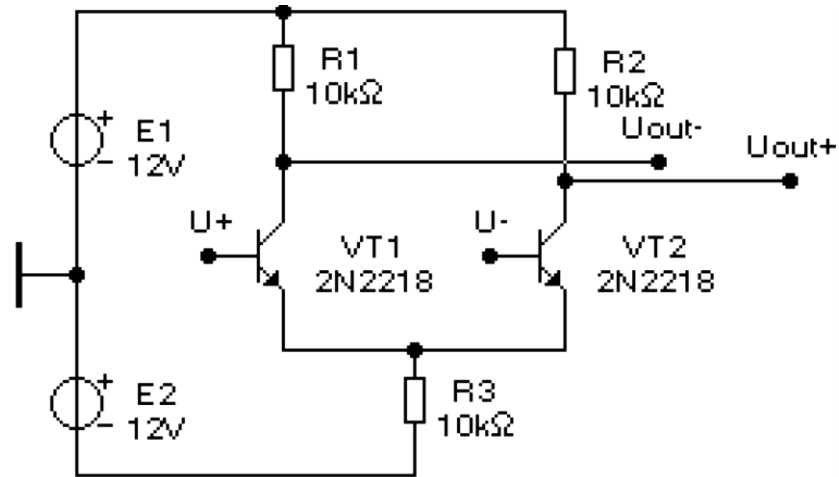


Рис. 11.8. Схема диференціального каскаду підсилення

З метою підвищення навантажувальної здатності у вихідних каскадах підсилювачів або з метою підвищення вхідного опору вхідних каскадів підсилювачів використовуються емітерні повторювачі (рис. 11.9).

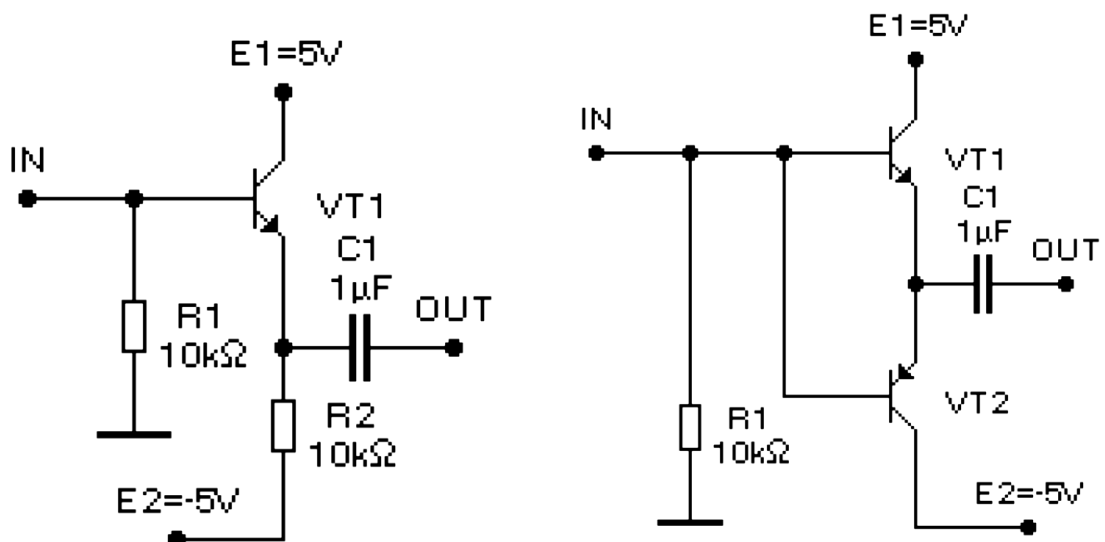


Рис. 11.9. Схема емітерних повторювачів

Запропонована на рис. 11.9, а, схема використовує лінійний режим роботи єдиного транзистора, а в схемі рис. 11.9, б, транзистори працюють по черзі в залежності від полярності сигналу, що передається. При малих значеннях напруги на вході повторювача, виконаного за схемою рис. 11.9, б проявляються нелінійні властивості каскаду. Вихідний сигнал виявиться спотворений, що видно з рис. 11.10. При гармонійному входньому сигналі вихідний сигнал має нелінійну залежність від входнього поблизу нульового рівня.

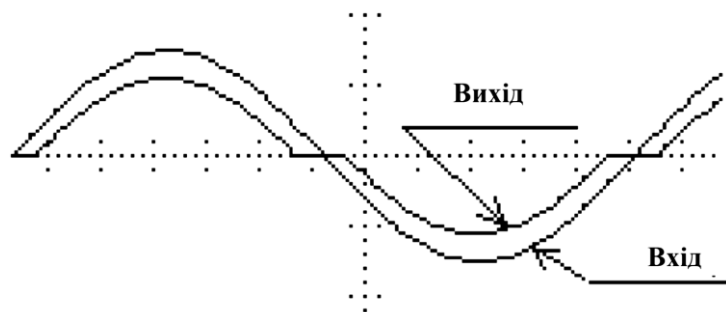


Рис. 11.10. Вигляд синусоїдального вихідного сигналу з нелінійною залежністю від входнього поблизу нульового рівня

11.4 Операційні підсилювачі

11.4.1 Загальні відомості

Операційний підсилювач (ОП) - це підсилювач постійного струму, пристосований до роботи з ланцюгами негативного зворотного зв'язку. Тобто, ОП повинен неодмінно мати інвертований вхід, подача на який вихідного сигналу або його частини відповідає визначенню негативного зворотного зв'язку. Сучасний ОП має два

входи: не інвертований або прямий і, що інвертується. Умовне позначення ОП на принципових схемах запропоновано на рис.11.11.

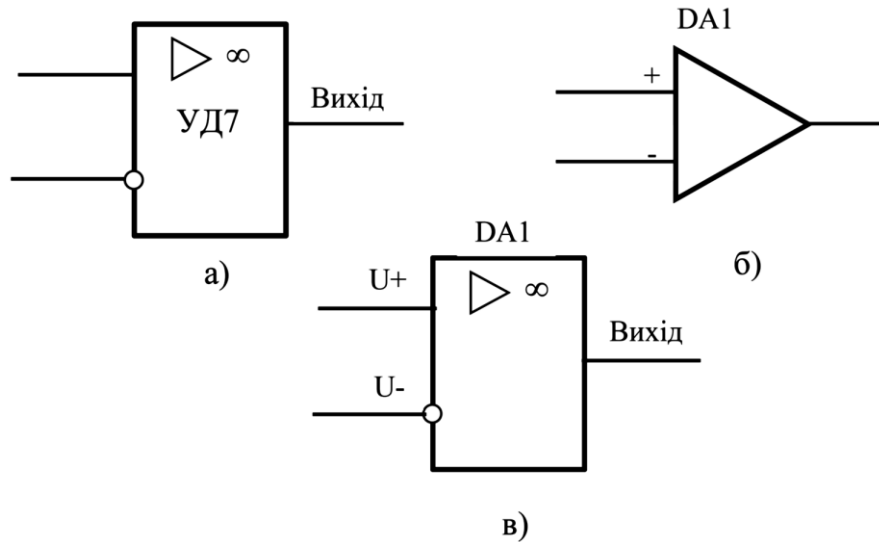


Рис. 11.11. Умовні позначення ОП

Позначення ОП, що запропоновані на рис. 11.11,а і 11.11,б відповідають позначенням, які часто використовуються в літературі.

Підсилювач реагує на різницю вхідних сигналів, тобто справедливо:

$$U_{out} = K_u \cdot (U_+ - U_-),$$

де U_{out} - вихідна напруга, K_u - коефіцієнт підсилення підсилювача по напрузі, $+U$ і $-U$ - напруга на прямому і інвертованому входах відповідно.

Крім коефіцієнта підсилення по напрузі ОП характеризують диференціальним вхідним опором, вхідним струмом, напругою зміщення нуля, температурним дрейфом нуля, смугою пропускання, швидкістю стеження, тобто максимальною швидкістю зміни вихідного сигналу, діапазоном зміни вихідної напруги. Ідеальний ОП повинен

володіти прагнуть до нескінченності коефіцієнтом підсилення і високим вхідним опором, смуга пропускання ОП повинна починатися з нульової частоти і тягнутися до нескінченності. У багатьох застосуваннях реальний підсилювач має досить хороші параметри, що дозволяє знехтувати його вхідними струмами і вважати його коефіцієнт надзвичайно великим. Це дозволяє значно спростити розрахунок схем з операційними підсилювачами.

При використанні операційних підсилювачів з ланцюгами негативного зворотного зв'язку в припущенні, що вихідний сигнал підсилювача не досягає своїх граничних значень, (тобто, ОП працює в лінійній області, коли справедлива лінійна залежність вихідного сигналу від різниці вхідних сигналів) для розрахунку схеми можна користуватися двома простими правилами:

- вхідний опір підсилювача надзвичайно великий, що дозволяє не враховувати вхідний струм;
- підсилювач за рахунок зворотного зв'язку завжди забезпечує рівність напруги на своїх входах:

$$U_+ = U_-.$$

Щоб мати можливість формувати на виході ОП напругу будь-якої полярності, підсилювачі живлять від двох різнополярних джерел напруги, наприклад, $\pm 15\text{В}$. Можливе живлення і від однополярної напруги з формуванням середнього рівня на прямому вході ОП за допомогою, наприклад, резистивного дільника.

Операційні підсилювачі знаходять широке застосування в складі вирішальних підсилювачів аналогових обчислювальних пристроїв. Вирішальний підсилювач - це підсилювач, що виконує в аналоговому

вигляді математичні операції. Відомою гідністю аналогових пристроїв є можливість роботи в реальному часі, теоретично виключно з високою швидкістю. Але в даний час найбільше застосування ОП знаходять у вимірювальній техніці, в різних вузлах і пристроях спеціального застосування. Наприклад, ОП використовуються в аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачах, у складі стабілізаторів напруги в джерелах живлення ЕОМ і інших електронних пристроїв.

11.4.2. Масштабні підсилювачі

В системах автоматики дуже часто використовуються операції множення аналогового вхідного сигналу на константу. Цю операцію можна реалізувати масштабним підсилювачем, шляхом визначення співвідношення застосовуваних для замикання негативного зворотного зв'язку резисторів. Оскільки стабільність коефіцієнта визначається стабільністю відношення опорів резисторів і практично не залежить від властивостей ОП, може бути досягнута висока точність установки коефіцієнта підсилення всього підсилювача. Підсилювач з точним і стабільним коефіцієнтом підсилення вважають вимірювальним.

Виділимо дві основні схеми масштабних підсилювачів, що: інверсують і не інверсують полярності вхідного сигналу.

Схема інверсованого полярність масштабного підсилювача запропонована на рис. 11.13,а. Для цього підсилювача справедлива рівність:

$$K_{зз} = -R2/R1,$$

де $K_{зз}$ – коефіцієнт підсилення по напрузі з замкнутим зворотним зв'язком. Доведемо справедливність запропонованого виразу.

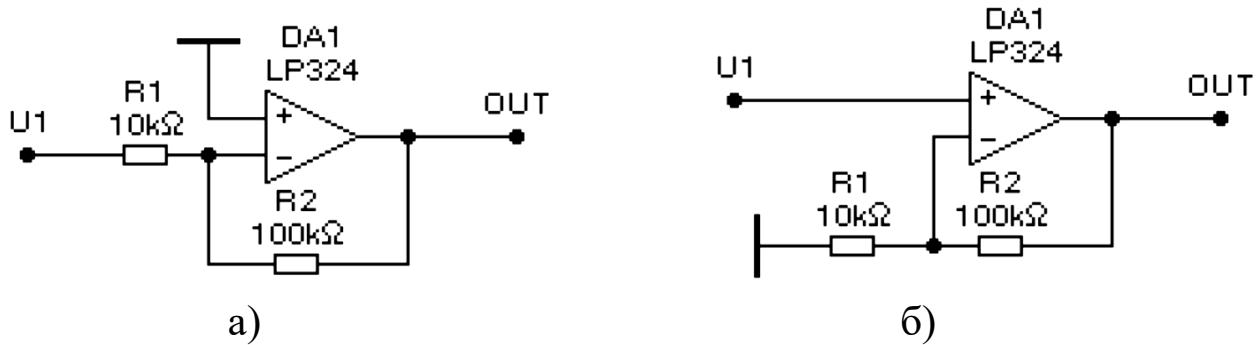


Рис. 11.13. Схема, що інвертує (а) і не інвертує (б) полярність масштабного підсилювача

Оскільки справедлива рівність: $U_+ = U_-$, а $U_+ = 0$, потенціал інвертованого входу U_- завжди дорівнює нулю. А оскільки входні струми ОП дуже малі, то справедливі рівності струмів через резистори $R1$ і $R2$. Виразимо струми через напруги і прирівняємо їх. В результаті отримаємо рівність:

$$\frac{U_1 - U_-}{R1} = \frac{U_- - U_{out}}{R2},$$

де U_{out} - вихідна напруга підсилювача. Враховуючи рівність нулю напруги U_- , отримаємо:

$$\frac{U_1}{R1} = \frac{-U_{out}}{R2}.$$

Це дозволяє визначити коефіцієнт підсилення схеми:

$$K_{oc} = \frac{U_{out}}{U_1} = -\frac{R2}{R1}.$$

Вхідний опір схеми буде дорівнювати R_1 , що обмежує застосування її при високому вихідному опорі джерела сигналу.

Схема, що не інвертує полярність масштабного підсилювача запропонована на рис. 11.13, б.

Для цього підсилювача справедлива рівність:

$$K_{зз} = (R_1 + R_2) / R_1.$$

Вхідний опір підсилювача в цьому разі високий. Він визначається вхідним опором використовуваного ОП. Використовувані в запропонованих схемах ОП типу LP324 мають коефіцієнт підсилення по напрузі з розірваним зворотним зв'язком 100000, вхідний опір 100 кОм, зміщення нуля не вище 2 мВ, швидкість стеження 50 В/мкс, частота одиничного посилення 100 кГц, діапазон вихідної напруги ± 3 В.

Смуга пропускання запропонованих схем простягається від нуля до частоти, яка визначається властивостями використовуваного ОП. Недоліком схеми є множення в $K_{зз}$ раз початкового зсуву нуля ОП. Якщо підсилення частот, близьких до нуля, не потрібно, то послідовно з R_1 в схемах ставиться конденсатор, який виключає зазначений недолік. Але ємність цього конденсатора визначає нижню смугу пропускання схеми.

У вимірювальній апаратурі часто виникає необхідність підсилення диференціального сигналу і придушення синфазних перешкод. Схемні рішення підсилювачів з диференціальними входами запропоновані на рис. 11.14.

Для схеми запропонованої на рис. 11.14, а вхідний опір виявляється рівним $(R1+R2)$. Крім того, виявляються справедливі рівності:

$$R1 = R2; R3 = R4; U_{out} = K_{зз} (U1 - U2);$$

$$K_{зз} = R3/R1,$$

де U_{out} – вихідна напруга підсилювача.

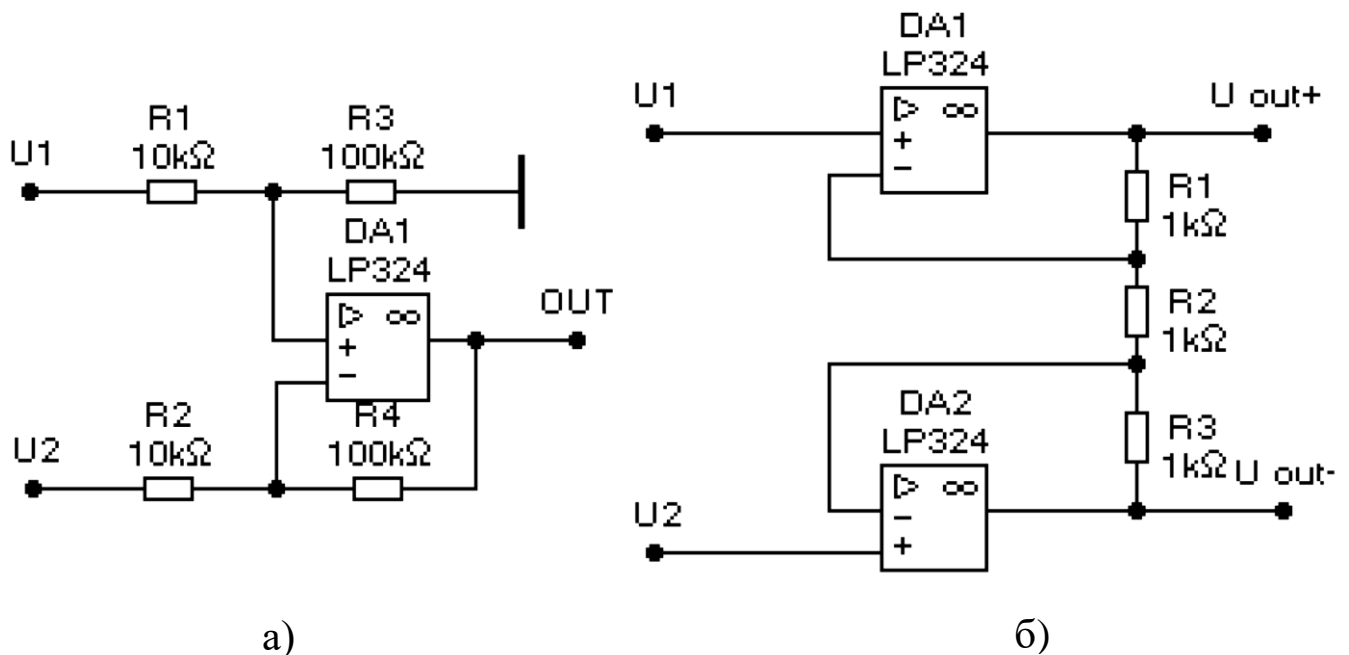


Рис. 11.14. Схеми підсилювачів з диференціальними входами

Для схеми, запропонованої на рис. 11.14, б, вхідний опір виявляється високим. Крім того, виявляються справедливі рівності:

$$R1 = R3; (U_{out+} - U_{out-}) = K_{зз}(U1 - U2);$$

$$K_{зз} = (2R1+R2)/R2.$$

Особливістю другої схеми є диференціальний вихідний сигнал, що створює незручності в застосуванні. Тому часто вихідні ланцюги цієї схеми навантажують на каскад, запропонований на рис. 11.14, а, щоб отримати сигнал щодо загального проводу.

11.4.3. Проблема дрейфу нуля і її вирішення

Оскільки операційний підсилювач підсилює сигнал починаючи з нульової частоти, виникає проблема температурного дрейфу напруги зміщення нуля. Напруга зсуву нуля – різниця вхідних напруг, яка в реальному підсилювачі призводить до нуля на виході. Ця напруга може бути компенсована застосуванням ланцюгів балансування нуля при налаштуванні схеми. Але проблема полягає в тому, що зі зміною температури ця напруга змінюється, що призводить до порушення режиму підсилювача, до появи паразитного сигналу на виході.

Якщо вхідний каскад підсилювача виконаний за схемою з загальним емітером і на вхід подається нуль, за допомогою балансування на виході можемо отримати нуль. Але зі зміною температури на кожен 1°C пряме падіння напруги на переході база-емітер зміниться на 2-3 мВ. Ця зміна сприймається як корисний вхідний сигнал, що унеможлиблює побудову операційного підсилювача з використанням схеми із загальним емітером.

Проблема температурного дрейфу нуля вирішується двома способами:

1) Застосуванням диференціального каскаду на вході ОП. Диференціальний каскад має два входи: прямий, інверсний і реагує на різницю вхідних сигналів. Його застосування зменшує дрейф нуля приблизно в 700 разів.

2) Застосуванням в операційному підсилювачі М-DM каналу (модуляція і демодуляція). У цьому випадку вхідний сигнал з частотою, близькою до нуля, перетворюється в сигнал з частотою

$f > 0$, підсилюється підсилювачем змінного струму, який не відчуває температурний дрейф нуля, вихід якого здійснює зворотне перетворення сигналу. Такий прийом дозволяє значно зменшити температурний дрейф, але смуга пропускання схеми виявляється невисокою. Найчастіше проблема вирішується застосуванням диференціальних каскадів.

Контрольні запитання

1. За допомогою яких характеристик визначаються частотні властивості підсилювача?
2. Як визначається коефіцієнт підсилення?
3. Дайте характеристику схемних рішень підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах.
4. Яка роль зворотного зв'язку в підсилювачах?
5. Яка будова операційного підсилювача?
5. Де використовується операційний підсилювач?
8. У чому полягає сутність дрейфу нуля в підсилювачі ?
9. Які шляхи подолання дрейфу нуля?

Глава 12. Електронні генератори коливань

12.1. Загальні відомості

Електронний генератор – це пристрій, що перетворює електричну енергію джерела постійного струму у енергію незатухаючих електричних коливань заданої форми та частоти.

Електронні генератори широко використовують у радіоапаратурі, вимірювальній техніці, пристроях автоматики, електронно-обчислювальних машинах та інше.

За способом збудження генератори підрозділяють на генератори з незалежним збудженням та генератори з самозбудженням (автогенератори). Генератори з незалежним збудженням є підсилювачами коливань, які виробляють сторонні джерела.

Серед автогенераторів можна виділити генератори синусоїдальних коливань та імпульсні генератори. Генератори синусоїдальних коливань підрозділяють на автогенератори типу LC та автогенератори типу RC .

12.2. Транзисторний автогенератор типу LC

Автогенератори типу LC розрізняють за способом створення позитивного зворотного зв'язку як автогенератори з ємнісним, автотрансформаторним та індуктивним (трансформаторним) шляхом. Вони складаються з коливального контуру, у якому збуджуються коливання потрібної частоти; підсилювального елемента (транзистору), що підсилює сигнал, який потрапляє на його вхід через

коло зворотного зв'язку; кола позитивного зворотного зв'язку, що забезпечує подачу енергії з виходу схеми на її вхід у потрібній кількості та у належній фазі; джерела з постійною ЕРС, енергія якого перетворюється у коливальну енергію у контурі.

На рис. 12.1 наведена схема транзисторного автогенератора з індуктивним зв'язком. При підключенні до джерела живлення E_K конденсатор контуру C_K заряджається по колу: $+E_K$, резистор R_e , емітер, база, колектор транзистора T , $C_K(-E_K)$. Конденсатор C_K та індуктивна котушка утворюють паралельний коливальний контур, і, так як конденсатор C_K накопичив певну енергію, у контурі виникають вільні коливання з частотою f_0 , яка визначається параметрами цього контуру. У результаті індуктивного зв'язку між котушками L_K та $L_{зз}$ у котушці зворотного зв'язку $L_{зз}$ наводиться змінна напруга тієї ж частоти, що і в контурі. Ця напруга підводиться до ділянки емітер – база транзистору, що викликає пульсацію колекторного струму з частотою f_0 .

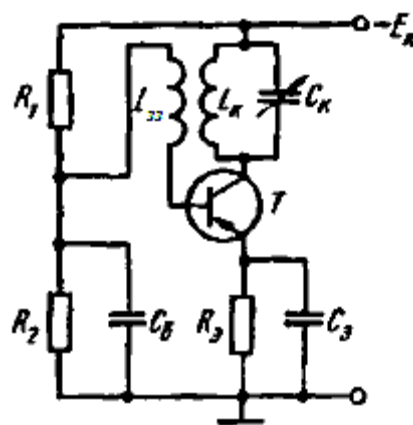


Рис. 12.1. Схема транзисторного автогенератора з індуктивним зв'язком

Якщо зворотній зв'язок позитивний, змінна складова колекторного струму підсилює коливання у контурі, що викликає збільшення амплітуди змінної напруги на вході транзистора. Це, у свою чергу, викликає нове збільшення амплітуди змінної складової колекторного струму і т. д.

Таким чином, незатухаючі коливання у контурі генератора, встановлюються при виконанні двох умов, які називають *умовами самозбудження*. Ця умова балансу фаз, яка забезпечується позитивним зворотним зв'язком, та умова балансу амплітуд, яка залежить від значення коефіцієнту зворотного зв'язку β .

12.3. Транзисторний автогенератор типу RC

Автогенератори типу LC застосовують в основному на частотах вище 20 кГц, так як для більш низьких частот конструкція таких коливальних контурів громіздка. Для отримання синусоїдальних коливань на низьких частотах застосовують більш прості та дешеві генератори типу RC . Найпростіша схема такого генератора наведена на рис. 12.2.

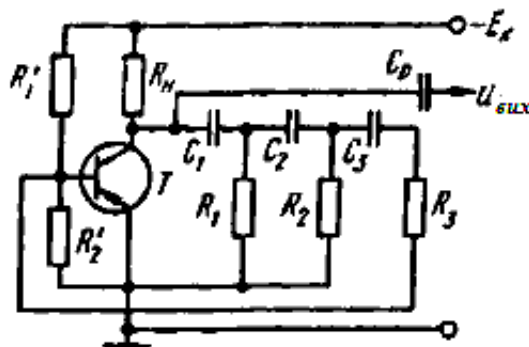


Рис. 12.2. Схема транзисторного автогенератора типу RC

Замість коливального контуру у схемі увімкнений резистор R_H , а позитивний зворотний зв'язок здійснюється через фазообертальне коло, яке складається з трьох ланок RC . Якщо вихід даної схеми з'єднати безпосередньо з входом, забезпечивши при цьому умови самозбудження, то коливання, що генеруються, не будуть синусоїдальними. Для того, щоб схема виробляла саме синусоїдальні коливання, позитивний зворотний зв'язок повинен забезпечуватись тільки для однієї певної гармоніки несинусоїдальних коливань. Цю функцію й виконує фазообертальне коло RC .

Напруга на колекторі й на базі повинні знаходитись у протифазі. Це і є умова балансу фаз.

Для виконання умови балансу амплітуд коефіцієнт підсилення підсилювача повинен визначати більше послаблення, що вноситься фазообертальним колом.

12.4. Генератори напруги, що змінюється лінійно

Генератори напруги, що змінюється лінійно (пилкоподібної), повинні виробляти напругу, графік якої наведений на рис. 12.3. Цю напругу використовують для отримання розгортки електронного променя у різних пристроях (осцилографіях, телевізійних та радіолокаційних індикаторах та інше). Отримання коливань, як правило, забезпечується процесом зарядки або розрядки конденсатора.

Найпростіший автогенератор пилкоподібної напруги побудований на неоновій лампі (рис. 12.4).

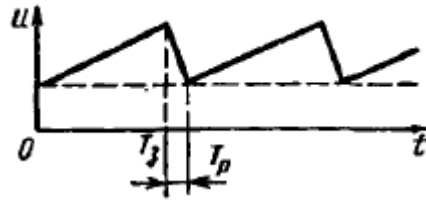


Рис. 12.3. Графік ідеальної ЛЗН

У момент підключення схеми до джерела постійної ЕРС E_a конденсатор C починає заряджатись (через резистор R) і напруга на ньому зростає так, як це показано на рис. 12.5 (період часу T_3). У момент часу t_1 напруга на конденсаторі C опиняється рівною напрузі запалювання U_3 неоновій лампі. При цьому опір лампи різко падає та конденсатор C дуже швидко розряджається до напруги затухання лампи $U_{п}$ (період часу T_p). У момент часу t_1 , коли газовий розряд у неоновій лампі припиняється та її опір знову різко зростає, конденсатор C знову починає відносно повільно заряджатись до напруги U_3 і т. д. Таким чином, на виході схеми виникає пилкоподібна напруга.

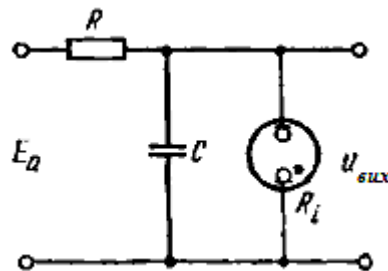


Рис. 12.4. Схема автогенератора ЛЗН на неоновій лампі

Необхідно відмітити, що зарядка конденсатора у даній схемі відбувається не за лінійним, а за експоненціальним законом.

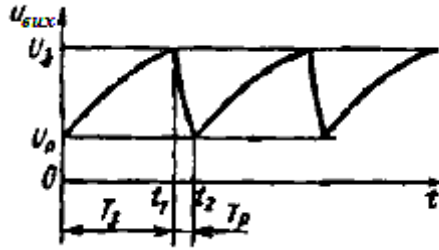


Рис. 12.5. Графік реальної ЛЗН

На рис. 12.6. показані криві, що відповідають законам зарядки та розрядки конденсатора через резистор R .

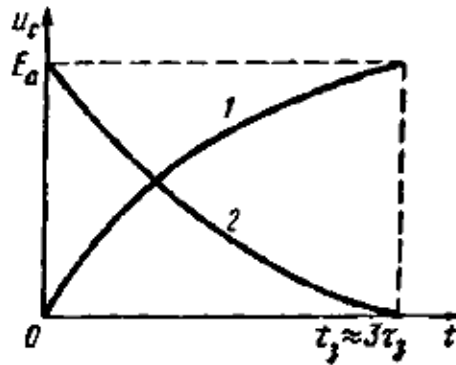


Рис. 12.6. Графіки зарядки (1) та розрядки (2) конденсатору

Для підвищення стабільності роботи генератора ЛЗН використовують генератори зі стороннім збудженням. Схема такого генератора, зібраного на транзисторі, представлена на рис. 12.7.

На базу транзистора T подають позитивний імпульс, що запускає, і транзистор замикається, а конденсатор C починає заряджатись по колу $+E_K, C, R, -E_K$.

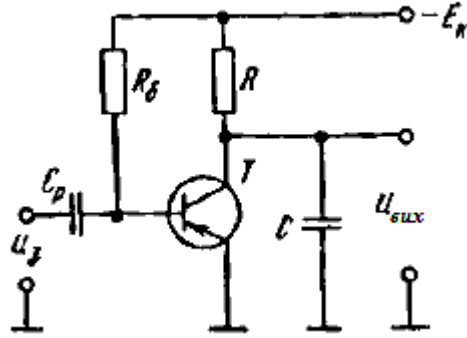


Рис. 12.7. Схема генератора на транзисторі

Таким чином, на протязі терміну часу дії імпульсу, що запускає, T_z напруга на конденсаторі зростає. По закінченню дії імпульсу, що запускає, у момент певного часу, транзистор відкривається і конденсатор C швидко розряджається через транзистор T . Потім процес зарядки повторюється і т. д.

13.5. Мультивібратор

Мультивібратор представляє собою генератор несинусоїдальних коливань, близьких за формою до прямокутних.

Такі коливання можна розглядати як суму великої кількості гармонічних коливань. Звідси і назва «мультивібратор» або буквально «генератор множини простих коливань».

Мультивібратори широко використовують в імпульсній техніці, в ЕОМ та пристроях автоматики у якості пускових або перемикаючих пристроїв.

Розрізняють три режими роботи мультивібраторів: автоколивальний, синхронізації і той, що чекає.

Розглянемо симетричний мультивібратор, який працює у режимі автоколивань (рис. 12.8). При підключенні даної схеми до джерела живлення E_K виникає режим нестійкої рівноваги, так як, не дивлячись на симетрію схеми, у будь-який момент порушиться рівність колекторних струмів.

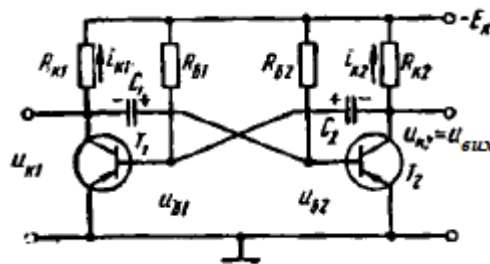


Рис. 12.8. Схема симетричного транзисторного мультивібратору

Якщо, наприклад, декілька зменшиться струм i_{K1} , то це призведе до зменшення потенціалу на колекторі T_1 . А так як напруга на конденсаторі C_1 не може змінитись миттєво, то негативний стрибок напруги на колекторі T_1 передається на ділянку база – емітер транзистора T_2 . Це викличе збільшення струму колектору i_{K2} і, отже, підвищення потенціалу колектора T_2 . Підвищення потенціалу колектора T_2 через конденсатор C_2 передається на базу T_1 та i_{K1} струм ще більше зменшується і т. д. Даний процес наростає лавиноподібно, тим більше що стрибки напруги на базах збільшуються за рахунок підсилювальної дії транзисторів. У підсумку транзистор T_1 опиниться замкненим, а потенціал його колектора практично стане рівним $-E_K$.

Транзистор T_2 буде повністю відкритий та насичений, а потенціал на його колекторі – близьким до нуля.

Контрольні запитання

1. Наведіть загальні відомості про електронні генератори коливачів.
2. Охарактеризуйте роботу транзисторного автогенератора типу *LC*.
3. Охарактеризуйте роботу транзисторного автогенератора типу *RC*.
4. Охарактеризуйте роботу генератора напруги, що змінюється лінійно.
5. Проаналізуйте дію автогенератора ЛЗН на неоновій лампі
6. Розкажіть про дію мультівібратора.

Глава 13. Інтегральні мікросхеми

13.1. Загальні відомості

Розвиток електроніки визначається постійним вдосконаленням характеристик елементної бази та апаратури за наступними напрямками: зменшення габаритів та маси (мініатюризація); підвищення надійності за рахунок скорочення ліній, що з'єднують, вдосконалення контактних вузлів та взаємного резервування елементів; зменшення потужності, що споживається; ускладнення задач та відповідних їм схемних рішень при одночасному здешевленні кожного окремого елемента.

Існують зміни у напівпровідниковій техніці, що пов'язані з переходом до нової елементної бази - інтегральних мікросхем (ІМС).

Інтегральною називають мікросхему з певним функціональним призначенням, що виготовляється не збіркою та розпайкою окремих активних та пасивних елементів, а повністю, у єдиному технологічному процесі. Прикладами інтегральних схем можуть служити підсилювачі різних сигналів, логічні схеми обчислювальної техніки, генератори синусоїдальної напруги, тригери, мікропроцесори, виготовлені як єдине ціле в об'ємі одного напівпровідникового кристалу або у тонких плівках. Ці схеми зазвичай доповнюють навісними компонентами.

До пасивних елементів електронних схем відносять резистори, конденсатори, індуктивні котушки, трансформатори, до активних – діоди, транзистори, тиристори та інші. Інтегральні мікросхеми містять сотні та мільйони пасивних та активних елементів. Показник

ступеня складності мікросхеми характеризується числом елементів та компонентів, що містяться у ній.

Ступінь та характер інтеграції елементів мікросхем визначаються передусім рівнем технології.

13.2. Гібридні інтегральні мікросхеми

Технологія гібридних інтегральних мікросхем базується на використанні товстих та тонких плівок, нанесених на керамічну основу. Плівки виготовляються зі спеціальних паст.

Пасивні елементи формуються у плівці, а активні у вигляді мініатюрних безкорпусних напівпровідникових приладів розміщуються над плівкою та з'єднуються з плівковими елементами повздовжніми виводами (рис. 13.1).

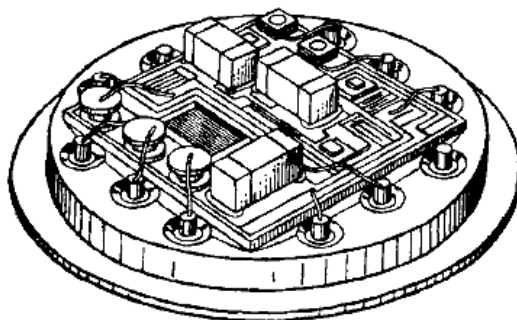


Рис. 13.1. Гібридна мікросхема

Навісними можуть виготовлятися також і деякі пасивні елементи: конденсатори відносно великої ємності, індуктивні котушки, трансформатори.

При створенні схеми на круглій або квадратній підкладці за спеціальною технологією наносять різні плівки, з яких формуються резистори, конденсатори, лінії, які з'єднують, та контактні площадки.

Навісні елементи розташовують на підкладці або над підкладкою. Розміри навісних елементів обирають найбільш мінімальних розмірів. Діоди і транзистори зазвичай виготовляють у вигляді кристалів об'ємом біля 1 мм^3 .

Важливу роль у забезпеченні надійності мікросхеми та зниження її власних шумів грає якість контактних з'єднань. Для отримання хорошого контакту широко застосовують лазерну техніку, термокомпресію, ультразвукове зварювання.

Контакти навісних елементів виготовляють у вигляді тонких дротів, стрічок або шариків. Для дровових контактів (рис. 13.2) застосовують золотий або позолочений мідний дріт діаметром у декілька десятків мікрометрів. Балочні контакти мають вигляд плоских консолей довжиною 100 мкм . Жорсткі шарикові та балочні контакти зручні при автоматизації процесу зборки та пайки схеми.



Рис. 13.2. Дрововий монтаж кристалів

Найбільші технологічні складності виникають при виготовленні індуктивних котушок та трансформаторів. Тому мікросхеми прагнуть проектувати так, щоб вони містили мінімум таких елементів. У випадку необхідності, мікроіндуктивності можуть бути сформовані з

плівки, а елементи з відносно підвищеною індуктивністю – у вигляді навісних котушок. Таким котушкам часто надають плоску форму, а осердя їх роблять розімкненими.

Зібрану гібридну мікросхему замикають у металевий або пластмасовий корпус, який ізолює її від зовнішніх впливів (вологи, пилу та інших). Розміри корпусу складають одиниці міліметрів. Контактні виводи розміщують у певному порядку, а корпус нерідко має зріз або виступ для забезпечення орієнтування при монтажі.

13.3. Товстоплівкові мікросхеми

Товстими прийнято називати плівки, товщина яких перевищує 1 мкм. Частіше за все використовують плівки товщиною у декілька десятків мікрометрів. Іноді товщина плівки досягає 150 – 200 мкм.

Основою товстоплівкової схеми служить відполірована пластинка зі спеціального скла, кварцу або кераміки. На цю підкладку методом трафаретного друку наносять прошарок пасти, склад якої залежить від характеру елементів, що виготовляють.

Після зняття трафарету (маски) підкладку з рисунком з нанесеної пасти піддають термічній обробці при температурі порядку 1000 К. У результаті утворюється фігурна плівка, товщина якої залежить від товщини фольги, з якої виготовлений трафарет. На отриманий рисунок накладають інший трафарет і за допомогою пасти іншого складу наносять нову плівку. При виготовленні складних схем ці процеси можуть повторюватись багатократно. Процес нанесення пасти на підкладку показаний на рис. 13.3, Для забезпечення

необхідної точності та відтворення параметрів схеми, а також підвищення продуктивності праці цей процес автоматизований. Товщина підкладки 1 мм, ширина та довжина – декілька сантиметрів.



Рис. 13.3. Нанесення пасти на підкладку: 1 – паста; 2 – трафарет; 3 – підкладка

Для виготовлення провідників та контактних площадок товстоплівкових схем застосовують пасту, яка містить порошки металів з високою провідністю, стійких до хімічних та температурних впливів (платина, золото, срібло, паладій), та скло, яке у складі пасти забезпечує міцне зчеплення плівки з підкладкою після випалу. Ширина товстоплівкових провідників, отриманих за цією технологією, від 100 мкм до 0,5 мм.

Товстоплівкові резистори виготовляють з суміші порошків срібла та паладію зі склом. Чим більший вміст скла, тим вище опір пасти. На значення опору впливають також розміри та форма резистора (рис. 13.4). Опір виготовлених резисторів може суттєво відрізнятись від номінального значення, тому після контролю його доводять до потрібного, зменшуючи товщину плівки за допомогою абразивів або роблячи надрізи лазерним променем.

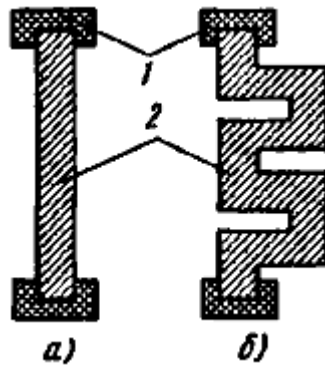


Рис. 13.4. Плівкові резистори з малим (а) та великим (б) опорами: 1 – контактна площадка; 2 – резистор

Товстоплівкові конденсатори (рис. 13.5) отримують послідовним формуванням плівок з провідникової та діелектричної паст. Для діелектричної плати використовують порошки титанату барія та сегнетокерамічних матеріалів з високим значенням діелектричної проникності.

Конденсатори підвищеної ємності, а також індуктивні котушки та трансформатори у товстоплівкових схемах зазвичай роблять навісними.

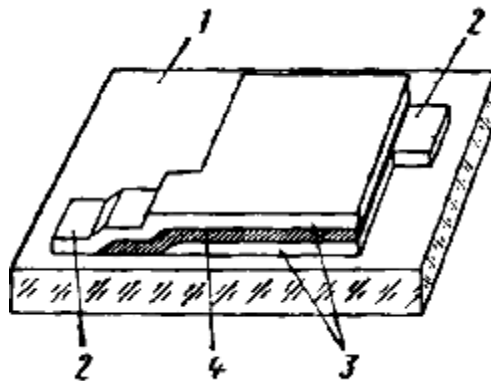


Рис. 13.5. Плівковий конденсатор: 1 – підкладка; 2 – контактна площадка; 3 – прошарок, що проводить; 4 – діелектричний прошарок

Вони надійні та порівняно недорогі, а використання навісних елементів дозволяє зменшити кількість перетинів у площині та кількість вихідних контактів.

Сформовану схему поміщують у герметичний корпус або заливають компаундом.

13.4. Тонкоплівкові мікросхеми

До тонких відносять плівки, товщина яких складає десяті та соті долі мікрометра.

При виготовленні ІМС по тонкоплівковій технології для струмопровідних ліній, за допомогою яких з'єднуються плівкові елементи мікросхеми, та контактних площадок для під'єднання навісних елементів застосовують різні метали, які мають високу електропровідність: алюміній, мідь, срібло, золото, нікель, хром, олово, їх солі на сплави.

Для виготовлення обкладок конденсаторів частіше за все застосовують алюміній та мідь; індуктивні елементи (рис. 13.6) виготовляють з нікелю, срібла або хрому.



Рис. 13.6. Плівкові індуктивні котушки

Для отримання резистивних елементів використовують тантал, титан, нікель, хром та їх сплави, а також вуглець та кремній.

Ізольуючі діелектричні плівки отримують окисленням зовнішніх шарів металевих плівок або нанесенням покриттів з діелектричних матеріалів.

Для нанесення тонких плівок на підкладку застосовують різні методи: вакуумне напилення, катодне розпилення, хімічне осадження та електролітичне анодування.

13.5. Фотолітографія

Процес фотолітографії починається з виготовлення негативу. На двохпрошарковій плівці з прозорою основою та зачерненою поверхнею викреслюють необхідний малюнок. З негативу розміром 1 м² роблять зменшений відбиток за допомогою спеціальної камери. Зазвичай зменшення відбувається у дві-три ступені, доки відбиток не досягне потрібних розмірів. Кінцевий відбиток роблять на фотопластинці, яку називають *фотошаблоном*. Скляна основа фотошаблону повинна бути ідеально чистою та плоско паралельною.

Наступний етап фотолітографії складається у нанесенні *фоторезисту* на підкладку мікросхеми або на напилену раніше плівку. *Фоторезистами* називають речовини (зазвичай емульсії на основі високомолекулярних з'єднань), які мають властивість після опромінення змінювати здатність до розчинення у спеціально підібраних середовищах.

Фоторезисти поділяються на *негативні* та *позитивні*. У перших під дією опромінення утворюються нерозчинні, а у других, навпаки, розчинні ділянки. Фоторезист можна наносити зануренням підкладки в емульсію, за допомогою пульверизатору або центрифугуванням. В останньому випадку отримують найбільш однорідну та міцну плівку фоторезисту.

При центрифугуванні на підкладку наносять краплю фоторезисту та поміщують у центрифугу. Нанесений фоторезист просушують спочатку при температурі навколишнього середовища, а потім у сушильній шафі при 400 К.

Після цього на поверхню, покриту плівкою фоторезисту, накладають фотошаблон та експонують в ультрафіолетовому світлі. У плівці з негативного фоторезисту при опроміненні утворюються нерозчинні ділянки, які після проявлення залишаються на підкладці та екранують її від напилення. У позитивному фоторезисті опромінення формує розчинні ділянки, на місці яких після проявлення утворюються вікна. Через ці вікна матеріал, що напиляє, досягає підкладки та осідає на ній.

Після напилення плівки, що проводить, або резистивної плівки фоторезист змивають, а на поверхні залишаються необхідні елементи тонкоплівкової схеми.

13.6. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми

Напівпровідникові інтегральні мікросхеми виготовляють на одному кристалі введенням легуючих домішок у певні мікро області.

Сучасні технології дозволяють створювати у при поверхневому об'ємі кристалу весь набір активних та пасивних елементів, а також міжелементні з'єднання у відповідності з топологією схеми.

У якості активних елементів ІМС наряду з біполярними широко застосовуються транзистори типу МДН. МДН-транзистори простіші у виготовленні, дають великий процент виходу придатних виробів, дозволяють отримати більш високу щільність розміщення приладів, споживають меншу потужність, дешевше біполярних.

Один з важливих критеріїв оцінки ІМС, що характеризує рівень інтеграції, це відношення числа *p-n-p*-переходів до числа зовнішніх виводів (вентиль/контакт). Чим більше це відношення та чим менше споживча потужність (краще умови тепловіддачі), тим надійніше електронні блоки на базі мікросхем (порівнювати слід блоки однакової функціональної складності). У простих логічних схем це відношення менше одиниці.

Основою напівпровідникових інтегральних мікросхем частіше за все служить кремній. На одній пластинці кремнію діаметром 75 мм та товщиною 0,2 мм можна сформувати більш ніж 1000000 напівпровідникових ІМС.

Широке застосування кремнію для виробництва напівпровідникових ІМС обумовлене передусім здатністю кремнію зберігати напівпровідникові властивості при відносно високих температурах (до 400 К).

Суттєвим є і те, що при нагріванні пластини кремнію у кисневому середовищі на її поверхні утворюється плівка SiO₂. Вона захищає кристал та сформовані у ньому міні області з заданим типом

електропровідності від забруднень, далі з неї формується маска для локальної дифузії домішок.

ІМС у відполірованій пластині кремнію виготовляють груповим методом: тисячі однакових схем формують одночасно. Потім у пластині алмазним різцем роблять насічки по межах схем та розламують її на кристалики. Отримані заготовки постачають зовнішніми виводами, герметизують, поміщують у корпуси та оформлюють у вигляді серійних електронних приладів.

Групова обробка забезпечує високу стандартизацію та економічність виробництва.

Можливість серійного виробництва ІМС була підготовлена створенням та вдосконаленням планарно-епітаксіальної технології.

13.7. Планарно-епітаксійна технологія виготовлення інтегральних мікросхем

Процес осадження молекул речовини на кристалічну пластину (підкладку) з утворенням плівки, що повторює її структуру, називають *епітаксією*.

Процес епітаксії може бути *прямим* та *непрямим*. При прямому процесі напівпровідниковий матеріал розпилюють і його атоми осаджуються на підкладці. У непрямому процесі розпилюють хімічні з'єднання напівпровідникового матеріалу, молекули якого дисоціюють, та іони напівпровідника осідають на підкладці, повторюючи її кристалічну решітку.

У практиці розповсюджені два методи створення кремнієвого епітаксіального прошарку: відновлення кремнію з його тетрахлориду воднем та термічне розкладання з'єднань кремнію (піроліз).

У процесі нарощування епітаксіальний прошарок кремнію можна легувати донорними та акцепторними домішками. При цьому у кварцовий реактор, де розміщена монокристалічна підкладка, разом з парами SiCl_4 та молекулами H_2 подають газоподібні з'єднання водню з миш'яком (AsH_3), фосфором (PH_3) або бором (B_2H_6). Підкладки у кварцовому реакторі кріплять на графітовій основі. Нагрів здійснюється індукційними струмами високої частоти.

Процес термічного розкладання з'єднань кремнію протікає при температурах на 150 – 200 К менших, ніж відновлювальний процес. У реакції піролізу $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$ виділяється атомарний кремній, який осідає на монокристалічній підкладці.

Розрізняють однопрошаркові та багатопрошаркові епітаксіальні структури кремнію. Однопрошаркові структури діаметром 26 – 40 мм представляють собою кремнієву монокристалічну пластину товщиною 0,2 мм, покриту епітаксіальною кремнієвою плівкою товщиною від 8 до 15 мкм. У багатопрошаркових структур плівка нарощується з двох сторін пластини.

Основу планарної технології складають вже відомі процеси:

- 1) окислення кремнієвої підкладки з метою захистити її поверхні плівкою двоокису кремнію (іноді у якості захисної плівки використовують інший діелектрик, наприклад нітрид кремнію Si_3N_4);
- 2) перетворення захисної плівки у маску заданої конфігурації за допомогою фотолітографії;

3) дифузія легованих домішок у верхній шар підкладки через вікна у масці.

Планарна технологія дозволяє отримувати у підкладці або в епітаксiальному прошарку леговані області, що вимірюються одиницями мікрометрів.

Виготовлення напівпровідникової мікросхеми починається з формування у підкладці ізольованих областей («карманів»). Існують різні способи отримання та ізоляції таких областей.

Технологічний процес складається з десяти етапів:

1) на монокристалічну кремнієву пластинку *p*-типу товщиною 0,2 – 0,4 мм нарощують епітаксiальний прошарок кремнію *n*-типу товщиною 15 – 200 мкм;

2) при нагрівні у кисневому середовищі на поверхні епітаксiального прошарку утворюється плівка діоксиду кремнію SiO₂;

3) у центрифuzі або за допомогою пульверизатора на поверхню оксидної плівки наносять фоторезист;

4) на висушену багатопрошаркову пластину накладають скляний фотошаблон з заданим мікромалюнком та здійснюють експозицію фоторезисту в ультрафіолетовому світлі;

5) фотошаблон знімають; засвічений фоторезист має змінену структуру;

6) спеціально підібраним розчинником засвічені ділянки фоторезисту та розташовану під ними плівку діоксиду кремнію розчиняють, оголюючи епітаксiальний прошарок;

7) розчинником, не діючим на плівку діоксиду кремнію, змиваються залишки фоторезисту;

8) у газовому середовищі здійснюють дифузію акцепторної домішки у відкриті ділянки епітаксіального прошарку;

9) під дією акцепторної домішки оголені ділянки епітаксіального прошарку змінюють тип електропровідності (n -тип на p -тип); ділянки, захищені плівкою діоксиду, зберегли електропровідність n -типу;

10) змивають захисну плівку діоксиду кремнію.

Пластина зі сформованими «карманами» поступає на наступні, передбачені технологією, операції.

13.8. Елементи напівпровідникових мікросхем та їх з'єднання

Універсальним елементом монокристалічної мікросхеми служить p - n -перехід, який є прошарком, що ізолює мікрообласті, сформовані у кристалі.

Цей перехід може виконувати роль вентиля (діоду). Структури з декількох p - n -переходів служать транзисторами, тиристорами та іншими активними елементами. Замкнений зворотною постійною напругою p - n -перехід виконує роль конденсатора. Зворотній опір p - n -переходу відіграє роль високоомного резистора. Для отримання резисторів з опором у сотні кОм використовують вхідні клеми емітерних повторювачів, зібраних на p - n -переходах. У якості невеликих опорів використовують просто ділянки

напівпровідникового кристалу (епітаксiального прошарку), від якого зроблені контактні виводи.

Певні труднощі пов'язані з отриманням індуктивних котушок, тому монокристалічні мікросхеми зазвичай проектують без них.

Багатошарові структури з декількома $p-n$ - переходами отримують, повторюючи процеси, розглянуті у попередньому параграфі: окислення, формування маски, дифузiю донорних або акцепторних домішок у мікро області. Приклад багатошарової структури наведений на рис. 13.7.

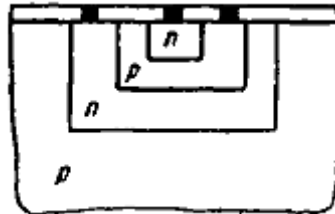


Рис. 13.7. Багатошарова структура з трьома $p-n$ - переходами

На рис. 13.8 наведена частина напівпровідникової мікросхеми, яка представляє собою однокаскадний підсилювач на транзисторі.

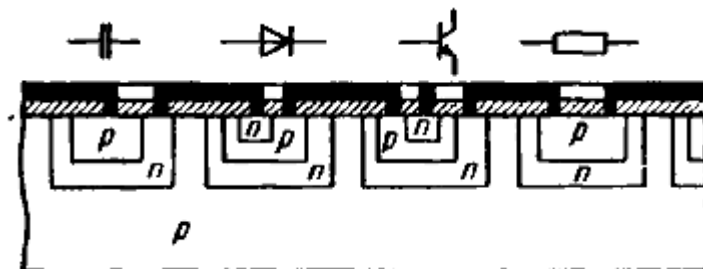


Рис. 13.8. Структура частини напівпровідникової ІМС

Повністю сформовані та випробувані на відсутність браку інтегральні мікросхеми кріплять на керамічній основі корпусу, що має зовнішні виводи. Контактні площадки з'єднують із зовнішніми виводами за допомогою тонких золотих дротів (рис. 13.9). Для підвищення міцності з'єднання та зменшення перехідного опору між контактною площадкою та дротом застосовують термокомпресійну (нагрів та тиск) або ультразвукову зварку.

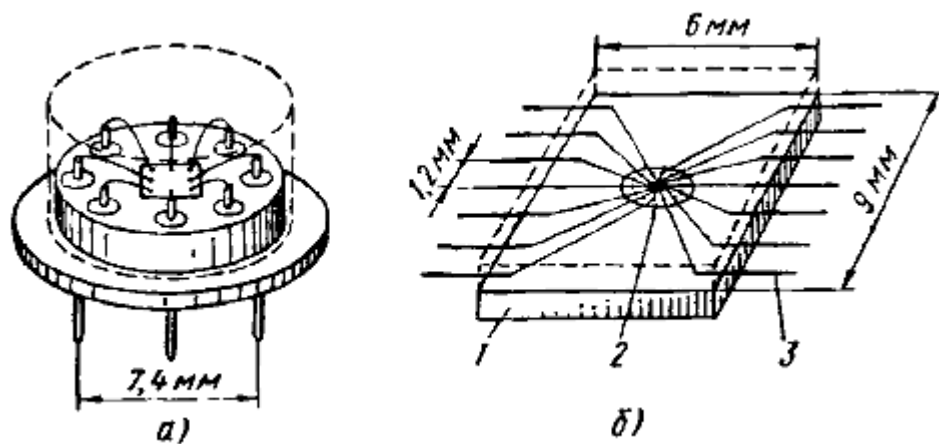


Рис. 13.9. Монтаж інтегральних схем: а – у круглому корпусі;
б – у плоскому корпусі; 1 – кераміка; 2 – контактні площадки;
3 – виводи

Після виконання дротових з'єднань схеми герметизують, заливаючи компаундами на основі епоксидних та кремнійорганічних смол.

Корпуси інтегральних мікросхем виготовляють з металевих сплавів, скла, кераміки та різних пластмас, які володіють механічною та електричною міцністю, корозійною стійкістю та не викликають хімічного забруднення кристалу мікросхеми.

13.9. Застосування інтегральних мікросхем

Інтегральні мікросхеми застосовуються у всіх областях сучасної техніки, де використовують напівпровідникові прилади. Малі габарити та маси, велика надійність, висока стабільність та відтворення параметрів, низький рівень власних шумів, мале споживання енергії дозволяють ІМС вдало конкурувати зі схемами, забраними на дискретних елементах.

Особливо велике значення інтегральних мікросхем для подальшого розвитку обчислювальної техніки, телевимірювальної техніки, систем керування технологічними процесами у промисловості та сільському господарстві, провідному, радіо- та телевізійному зв'язку, усіх видів транспорту.

Мікроелектроніка дозволила розширити теоретичні та експериментальні дослідження у космосі, біології, фізиці. Вона застосовується і в автоматах, що працюють на Місяці та Марсі, та при вивченні біострумів у клітинах живого організму. Мікроелектроніка дозволила створити приймач - радіопередавач, який вміщується у дужці окулярів, телевізор, вбудований у браслет ручних годинників, карману обчислювальну машину і т. д.

Контрольні запитання

1. Надайте загальні відомості про інтегральні мікросхеми
2. Охарактеризуйте гібридні інтегральні мікросхеми.
3. Що таке товстоплівкові мікросхеми?

4. Охарактеризуйте тонкоплівкові мікросхеми.
5. Надайте визначення фотолітографії.
6. Охарактеризуйте технологію виготовлення напівпровідникових інтегральних мікросхем.
7. Назвіть основні ознаки планарно-епітаксіальної технології виготовлення інтегральних мікросхем.
8. Надайте загальні відомості про елементи напівпровідникових мікросхем та їх з'єднання.

Глава 14. Електропостачання і споживання електричної енергії

14.1. Електропостачання промислових підприємств

Джерелами електричної енергії служать теплові електричні станції (ТЕС), гідравлічні (ГЕС) та атомні (АЕС) електростанції, що мають загальний режим виробництва енергії. Лінії електропередачі, трансформаторні та розподільчі пристрої забезпечують спільну роботу електростанцій та розподіл енергії між споживачами.

На великих підприємствах з великим споживанням електроенергії (хімічні, металургійні заводи) живлення споживачів може здійснюватися при напрузі 660 В. Більшість підприємств використовує трифазні мережі 380/220 В. На деяких (старих) підприємствах застосовують систему 220/127 В.

У приміщеннях з підвищеною небезпекою допустима напруга живлення споживачів не повинна перевищувати 36 В, в особливо небезпечних умовах (котли, металеві резервуари) – 12 В.

За необхідною надійністю живлення споживачі електричної енергії поділяються на три категорії. До першої категорії відносяться такі споживачі, перерва у постачанні яких електроенергією пов'язана з небезпекою для людей або тягне за собою великий матеріальний збиток (доменний цех, котельні виробничого пару, підйомні та вентиляційні установки шахт, аварійне освітлення та інше). Вони повинні працювати безперервно. Для споживачів другої категорії (найчисленніших) допускаються перерви у живленні на обмежений час. До споживачів третьої категорії відносяться допоміжні цехи та

інші об'єкти, для яких допускається перерва у електропостачанні до однієї доби.

Для підвищення надійності енергопостачання передбачається живлення споживачів від двох незалежних мереж та автоматичного вмикання резервного джерела електроенергії. Розрізняють «гарячі» та «холодні» резервні джерела. «Гаряче» резервне джерело забезпечує негайне аварійне живлення, його використовують для безаварійної зупинки споживача.

Подальше покращення систем електропостачання промислових підприємств пов'язане з підвищенням напруги живлення (з 220 до 380 В, з 6 до 10 кВ та інші) при максимально можливому наближенні високої напруги до споживачів (глибоке введення) та зменшенні кількості ступенів трансформації.

14.2. Падіння та втрата напруги у лініях електропостачання

У дротах виникає падіння напруги, що пропорційна струму та опору лінії. Напруга на затискачах споживача U менше напруги на затискачах джерела U_1 . Різниця $\Delta U = U_1 - U$ називається втратою напруги.

Втрату напруги часто виражають у відсотках від номінального значення напруги споживача $\frac{\Delta U}{U} \cdot 100$.

При заданій напрузі джерела від втрати напруги залежить напруга на затискачах споживача, тому значення втрати напруги суворо регламентується. У лініях, по яким здійснюється живлення силового (електродвигуни, гальванічні ванни та інше) навантаження,

допускається втрата напруги, що не перевищує 6 % від номінальної напруги споживача. В освітлювальних мережах допускається втрата напруги не більше 2,5 %. В залежності від конкретних умов можуть бути встановлені й інші граничні значення втрати напруги.

Недотримання норм втрати напруги призводить до порушення роботи споживачів, зменшення пускових та обертальних моментів двигунів, зміни світлового потоку освітлювальних установок. Наприклад, при зменшенні напруги на 10 % світловий потік ламп розжарювання зменшується на 1/3. Незначне підвищення напруги відносно номінальної призводить до різкого скорочення строку служби ламп розжарювання.

Неважко бачити, що у колах постійного струму визначення падіння напруги та її втрати співпадають: $\Delta U = IR_{\text{др}}$, де I – струм в лінії; $R_{\text{др}}$ – опір дроту лінії.

Дещо складніше виглядає залежність у колах змінного струму.

14.3. Розрахунок дротів за допустимою втратою напруги у лініях постійного, однофазного та трифазного струму

Схема кола постійного струму зображена на рис. 14.1.

Виразимо втрату напруги через струм у лінії та опір дротів:

$$\Delta U = U_1 - U = IR_{\text{др}}.$$

Опір дротів:

$$R_{\text{др}} = 2l/(\delta S),$$

де l – довжина лінії, м; S – площа поперечного перерізу дроту, мм²; δ – питома електропровідність матеріалу дроту, м/(Ом·мм²).

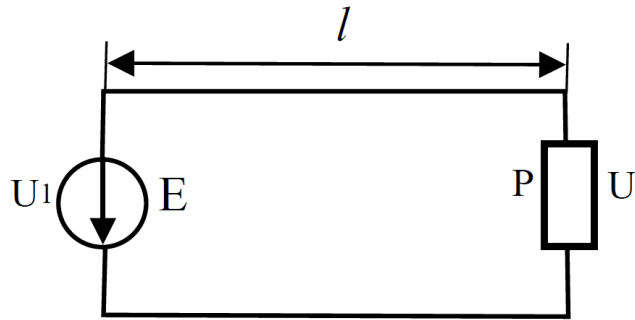


Рис. 14.1. Схема мережі постійного струму

Для міді, $\delta_m = 53 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$, для алюмінію, $\delta_a = 32 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$.

Оскільки лінія двох дротова, то у формулу ведено коефіцієнт 2.

Таким чином,

$$\Delta U = I 2l / (\delta S),$$

звідки $S = 2Il / (\delta \Delta U)$.

Для зручності розрахунків останню формулу перетворюють,

для чого чисельник та знаменник множать на напругу U :

$$S = \frac{2Il}{\delta \Delta U} \cdot \frac{U}{U} = 2lP / (\delta \Delta U U).$$

Тут втрата напруги ΔU виражена у вольтах. Окрім того, у формулу вводять відсоткову втрату напруги. У результаті отримують:

$$S = \frac{200lP}{\delta \Delta U U^2}$$

де S – у мм^2 ; l – у м; P – а у Вт, U – у В; ΔU – у %.

На рис. 14.2 зображене електричне коло однофазного струму.

Реактивний опір лінії не враховуємо. $\Delta U = IR_{\text{др}} \cos \varphi$.

Введемо відсоткову втрату напруги:

$$\frac{\Delta U U}{100} = \frac{I 2l}{\delta S} \cos \varphi.$$

Звідси:

$$S = \frac{I^2 l \cos \varphi 100}{\delta \Delta U U}$$

де ΔU – у %.

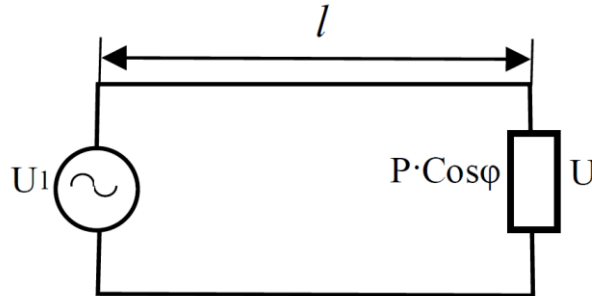


Рис. 14.2. Схема мережі однофазного змінного струму

Помноживши чисельник та знаменник на U , отримаємо:

$$S = \frac{200 l U I \cos \varphi}{\delta \Delta U U^2} = \frac{200 l P}{\delta \Delta U U^2}$$

де $P = UI \cos \varphi$ – активна потужність споживача.

На рис. 14.3 зображене трифазне коло змінного струму з симетричним навантаженням, для якого $\Delta U_{\phi} = U_{\phi 1} - U_{\phi} = IR_1 \cos \varphi$, де I – лінійний струм; $R_1 = l/(\delta S)$ – опір одного дроту тридротової лінії.

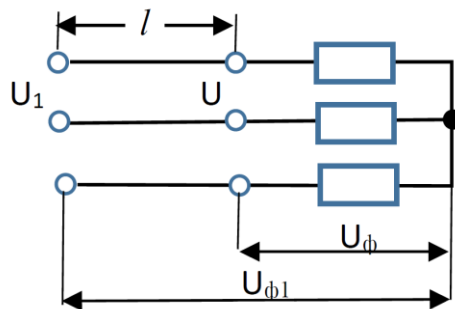


Рис. 14.3. Схема трифазної мережі змінного струму

У довідникових таблицях зазвичай вказується втрата лінійної напруги, яка у $\sqrt{3}$ разів більше втрати фазної напруги. Таким чином, $\Delta U = \sqrt{3}\Delta U_{\phi} = \sqrt{3}lR_1 \cos \varphi = \sqrt{3}l \frac{l}{\delta S} \cos \varphi$. Отже,

$$S = \frac{100l\sqrt{3}I \cos \varphi}{\Delta U \delta U}, \text{ де } \Delta U - \text{ у } \%.$$

Помноживши чисельник та знаменник останнього виразу на лінійну напругу U , кінцево знайдемо $S = \frac{100lP}{\Delta U \delta U^2}$, де $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$ – активна потужність, що споживається симетричним трифазним навантаженням.

14.4. Плавкі запобіжники

Запобіжники призначені для захисту електричних мереж від перевантажень та коротких замикань. Найбільше розповсюдження отримали плавкі запобіжники. Вони дешеві та прості за пристроєм.

Плавкий запобіжник складається з двох основних частин: корпусу (патрону) з електроізоляційного матеріалу та плавкої вставки. Кінці плавкої вставки з'єднані з клеммами, за допомогою яких запобіжник вмикається у лінію послідовно із запобіжником, що захищає, або ділянкою кола. Плавка вставка обирається з таким розрахунком, щоб вона плавилась раніше, ніж температура дротів лінії досягне небезпечного рівня або перевантажений запобіжник вийде з ладу.

За конструктивними особливостями розрізняють пластинчаті, патронні, трубочні або пробкові запобіжники. Сила струму, на який розрахована плавка ставка, вказується на корпусі. Оговорюється

також максимально допустима напруга, при якій може використовуватись запобіжник.

Номінальний струм плавкої вставки можна визначити і за наступною емпіричною формулою:

$$I_{\text{НОМ}} = k\sqrt{d^3}/2,5,$$

де d – діаметр проволочки, мм; k – коефіцієнт, що залежить від матеріалу плавкої вставки (для міді $k = 80$). Мінімальний струм визначають з наближеного співвідношення $I_{\text{min}} \approx (1,3 \div 1,5)I_{\text{НОМ}}$.

14.5. Дія електричного струму на організм людини. Допустимі значення напруги дотику

При проходженні струму через організм людини у першу чергу вражається центральна нервова система, у результаті чого порушується робота серцевого м'яза та органів дихання. Ступінь ураження залежить від сили та частоти струму, а також від шляху проходження струму через організм людини. При інших рівних умовах найбільший фізіологічний вплив на організм людини мають струми частотою 50 - 60 Гц. Що стосується сили струму, то неприємні відчуття виникають уже при струмах у декілька міліампер. При струмі 25 мА (0,025 А) настає судорожне скорочення м'язів і людина стає не в змозі самостійно розтиснути пальці та вивільнитись від дроту, що знаходиться під струмом. При струмі 100 мА (0,1 А) практично миттєво настає параліч дихання та серця. Правилами техніки безпеки за безумовно небезпечний прийнятий струм 50 мА (0,05 А).

Значним електричним опором володіє тільки поверхневий прошарок шкіри людини. Цей опір залежить від багатьох причин (вологості шкіри, ступеню розширення шкіряних капілярів та інше), та коливається у широких межах – від 800 до 100 000 Ом. Опір різко знижується, наприклад, при вживанні алкоголю. Якщо прийняти опір людини рівним 1000 Ом, то небезпечним буде струм при напрузі $U = IR_{\text{люд}} = 0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ В}$.

При несправності ізоляції струмонесучих частин електротехнічних установок не ізольовані металеві конструкції можуть опинитись під напругою. Під напругою опиниться й людина, що доторкнеться такої металевої конструкції. Назвемо цю напругу напругою дотику $U_{\text{дот}}$.

Правила техніки безпеки вважають небезпечними для людини наступні напруги при дотику: в сухому приміщенні $U_{\text{дот}} = 65 \text{ В}$; в сирих приміщеннях з відносною вологістю 75 % та струмопровідними підлогами $U_{\text{дот}} = 36 \text{ В}$; в особливо небезпечних приміщеннях (металеві kabіни, котли, приміщення з відносною вологістю 100 %) $U_{\text{дот}} = 12 \text{ В}$.

При занурюванні у воду опір тіла людини значно знижується внаслідок збільшення поверхні дотику тіла з середовищем, що проводиться, та зменшення питомого опору шкіри, там навіть порівняно невисокі напруги можуть опинитись смертельно небезпечними. З цієї причини, зокрема, у ванних кімнатах не встановлюють розеток електроживлення та вимикачів, а освітлювальні прилади закривають прозорими ковпаками.

Контрольні запитання

1. Надайте загальні відомості про призначення та класифікацію електричних мереж, їх будова та графічне зображення.
2. Охарактеризуйте дроти, кабелі, електроізоляційні матеріали у мережах напругою до 1000 В.
3. Надайте загальні відомості про електропостачання промислових підприємств.
4. Розкажіть про падіння та втрата напруги у лініях електропостачання.
5. Надайте загальні відомості про розрахунок дротів за допустимої втрати напруги у лініях постійного, однофазного та трифазного струму.
6. Пояснити методику розрахунку дротів за допустимим нагрівом.
7. Що таке плавкі запобіжники?
8. Надайте загальні відомості про вибір плавких вставок.
9. Вибір площі перерізу дротів в залежності від встановлених запобіжників.
10. Яка дія електричного струму на організм людини? Визначити напруги дотику. Навести допустимі значення напруги дотику.
11. Охарактеризуйте захисне заземлення трипровідних кіл трифазного струму.

Список рекомендованої літератури

1. Китаев В. Е. Электротехника с основами промышленной электроники: [Учеб. для ПТУ] / В. Е. Китаев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1985. - 224 с.

2. Криштафович А.К., Трифонюк В.В. Основы промышленной электроники: учебник для электрорадиотехн. и электроприборостроит. спец. техникумов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1985. - 287 с.

3. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.

4. Кузнецов М.И. Основы электротехники - Москва: Высшая школа, 1970 - 368 с.

5. Четверухин Б.М. Основы электротехники и электроники: Конспект лекцій / Б.М. Четверухин. - К.: Издательство Европейского ун-та, 2002. – 149 с.

6. Гальперин М.В. Электротехника и электроника: учебник / М.В. Гальперин. - М.: ИНФРА-М, 2010. - 480 с.

7. Колонтаєвський Ю.П. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. – К.: Каравела, 2006. – 384 с.

8. Панчевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: теорія і практика. 2-е вид. – К.: Каравела, 2004.- 440 с.

9. Касаткин А.С, Немцов М.В. Электротехника. -М.: Высшая школа, 2005. - 544 с.

10. Электротехника и электроника: учебник / Под ред. Б.И. Петленко. – 2-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2004. – 320 с.: ил. – (Среднее профессиональное образование)

11. Данилов, И.А. Общая электротехника с основами электроники: учебник / И.А. Данилов, П.М. Иванов. – 4-е изд., стереотип. - М.: Выс. шк, 2000. – 752 с.: ил.

12. Петленко Б.И., Иньков Ю.М., Крашенинников А.М. Электротехника и электроника: Учебник для среднего профессионального образования – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 320 с.

13. Сосков А.Г. Полупроводниковые аппараты: Учебник – К.:Каравелла, 2005. – 344 с.

14. Попов В.С. Теоретическая электротехника: Учебник для техникумов / Под ред. Б.Я. Жуховицкого – М.: Энергоатомиздат, 2013. – 544 с.: ил.

15. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайченко. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,73 Мбайт). – Київ : Освіта України, 2010. 159 с. – Назва з екрана. – Доступ:<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.

16. Макаренко, В.В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Акустотехніка» / В. В. Макаренко, В. М. Співак; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 11,12 Мбайт). – Київ : НТУУ КПІ; 2015. – 314 с. : іл. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19099>

17. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник –К.: Обереги, 2000.– 584 с.

18. Основи схемотехніки електронних систем / БОЙКО В.І., ГУРЖІЙ А.М., ЖУЙКОВ В.Я., ЗОРІ А.А., СПІВАК В.М., ТЕРЕЩЕНКО Т.О. ЗАТВЕРДЖЕНО МІНІСТЕРСТВОМ ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ЯК ПІДРУЧНИК ДЛЯ СТУДЕНТІВ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ 1-ГО ТА 2-ГО РІВНІВ АКРЕДИТАЦІЇ (*лист МОН України № 1/11 -4043 від 23 вересня 2003 р.*). – К.: Вища школа, 2004. – 527 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

АВТОРИ:

Співак Віктор Михайлович

Гуржій Андрій Миколайович

Нельга Анатолій Тимофійович

Ітякін Олександр Сергійович

ЗАГАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

РЕДАКТОР В.М. СПІВАК

Підп. до друку 15.03.2020 р. ФОРМАТ 60x80/16.

ПАПІР ДРУК. № 1. СПОСІБ ДРУКУ РИЗОГРАФІЯ

УМ.-ДРУК. АРК. 18,2. ТИРАЖ 100 ПРИМ. ЗАМОВЛ. № 85

РЕДАКЦІЙНО-ВИДАВНИЧИЙ ВІДДІЛ