

621.382(076)

Е 50

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**ЕЛЕМЕНТНА БАЗА
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ
ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Лабораторний практикум

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.382
ББК 32.85я73
Е50

Автори:

М. А. Філінюк, О. О. Лазарев, О. В. Войцеховська, О. Л. Пастушенко

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 28.11.2013 р.)

Рецензенти:

Й. Й. Білинський, доктор технічних наук, професор

С. М. Злепко, доктор технічних наук, професор

В. Г. Красиленко, кандидат технічних наук

Елементна база радіоелектронної апаратури та телекомунікаційних Е50 систем : лабораторний практикум / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев, О. В. Войцеховська, О. Л. Пастушенко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 90 с.

В лабораторному практикумі розглянуто вісім лабораторних робіт з дисциплін «Елементна база радіоелектронної апаратури та електронні прилади», «Елементна база телекомунікаційних систем». Роботи присвячені дослідженню основних параметрів та характеристик різних електронних елементів, зокрема резисторів, конденсаторів, котушок індуктивностей, трансформаторів, напівпровідникових діодів, біполярних та польових транзисторів.

УДК 621.382
ББК 32.85я73

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1. Дослідження резисторів	5
Лабораторна робота № 2. Дослідження конденсаторів	20
Лабораторна робота № 3. Дослідження котушок індуктивності.....	32
Лабораторна робота № 4. Дослідження трансформаторів	41
Лабораторна робота № 5. Дослідження напівпровідникових діодів.....	56
Лабораторна робота № 6. Дослідження біполярних транзисторів	64
Лабораторна робота № 7. Дослідження польових транзисторів	73
Лабораторна робота № 8. Дослідження фотодіодів.....	81
Література	87
Глосарій.....	88

ВСТУП

Ефективність електронного устаткування значною мірою залежить від елементної бази, що використовується в ньому. Виходячи з цього, вивчення фізичних основ роботи елементної бази, основних характеристик і параметрів є необхідною умовою підготовки кваліфікованого фахівця в галузі конструювання і експлуатації електронних апаратів різного функціонального призначення.

Лабораторний практикум присвячено лабораторним роботам, метою яких є закріплення теоретичного матеріалу та дослідження основних характеристик та параметрів сучасної елементної бази радіоелектронних апаратів та телекомунікаційних систем.

Лабораторний практикум складається з 8 лабораторних робіт. Перші чотири присвячено пасивним елементам: резисторам, конденсаторам, котушкам індуктивності, трансформаторам. Лабораторні роботи 5–8 присвячено напівпровідниковим приладам: діодам, біполярним та польовим транзисторам, фото- та світлодіодам. Розглянуто класифікацію, умовні графічні параметри, основні характеристики та параметри елементів.

Лабораторні роботи виконуються як на фізичних макетах, так і на віртуальних з використанням демоверсії програми Electronic Work Bench (EWB 5.12), що дозволяє студентам набути як практичних навичок, так і навичок комп'ютерного моделювання, та пов'язати теорію з практикою.

Після кожної теми в посібнику наведені контрольні запитання, що сприяють кращому самостійному засвоєнню теоретичного матеріалу.

Навчальний посібник написаний відповідно до програм дисциплін «Елементна база радіоелектронної апаратури та електронні прилади», «Елементна база телекомунікаційних систем», що викладаються авторами на другому курсі студентам за напрямками підготовки «Радіоелектронні апарати», «Телекомунікації». Від студентів вимагається знання основних положень фізики, вищої математики, основ радіоелектроніки.

При підготовці навчального посібника автори використовували матеріали робіт, які наведено в переліку літератури, що рекомендується студентам для більш детального вивчення.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗИСТОРІВ

Мета роботи: вивчити призначення, класифікацію, систему маркування, умовні графічні позначення резисторів, їх основні параметри та характеристики, еквівалентні схеми та типові схеми включення, освоїти методику розрахунку дротяних резисторів.

Теоретичні відомості

Означення

Резистор(resistor) – пасивний елемент електричного кола, основним параметром якого є опір електричному струму.

Він є найпоширенішим елементом електричних схем. Принцип їх дії базується на використанні властивості тіл чинити певний опір проходженню через них електричного струму. Величина цього опору залежить від матеріалу провідника, його розмірів, температури.

Основою резистора є резистивний елемент, виготовлений із спеціальних матеріалів, які отримали назву *резистивних матеріалів (resistor materials)*. Основними вимогами, що висуваються до резистивних матеріалів, є гранично слабкі залежності їх номінального опору від температури, освітленості та інших зовнішніх факторів. Крім того, всі резистивні матеріали повинні мати високу термостійкість, стабільність всіх електрофізичних властивостей в процесі експлуатації, корозійну стійкість, створювати достатньо малу термо-ЕРС при контакті з іншими матеріалами. Номінали резисторів вимірюються в межах від часток *ома* до десятків *мегаомів*, тому як резистивні використовують різні матеріали.

До резистивних матеріалів відносяться вуглецеві плівки (графітоподібні – піровуглець); металеві тонкі плівки та високоомні провідники (Ta, Re, Cr, NiCr); кермети (двофазна суміш окислів SiO); широкозонні напівпровідники (наприклад, SnO₂ – для терморезисторів).

Класифікація

За *постійністю значення опору* резистори поділяються на постійні (з фіксованим значенням опору), змінні (зі змінним опором) та спеціальні (зі значенням опору, що залежить від дії зовнішніх факторів) (рис. 1.1).

Постійні резистори залежно від призначення підрозділяються на загального й спеціального призначення.

Резистори загального призначення використовуються як різні навантаження, подільники напруги у колах живлення, елементи фільтрів і т. п. Діапазон номінальних значень опорів цих резисторів від 1 Ом до 10 МОм, номінальні потужності розсіювання 0,062 – 100 Вт.

Резистори спеціального призначення мають специфічні властивості й параметри. Їх поділяють на прецизійні, високочастотні, високомегаомні й високовольтні.

Прецизійні резистори відрізняються великою точністю виготовлення (високоточні) (допуск від 0,001 до 1%) і високою стабільністю параметрів при експлуатації. Застосовуються, в основному, у вимірювальних приладах, ЕОМ і системах автоматики. Діапазон номінальних значень опорів прецизійних резисторів перевищує діапазон номінальних значень опорів загального застосування. Наприклад, як шунти використовуються резистори з опором менше 1 Ом, а в еталонних котушках застосовують дротяні резистори з допуском 0,01% і номінальним значенням опорів до десятків *гігаомів*, проте потужність розсіювання їх порівняно невелика – не більше 2 Вт. Пояснюється це високими вимогами щодо стабільності, які важко виконати при більших потужностях розсіювання.

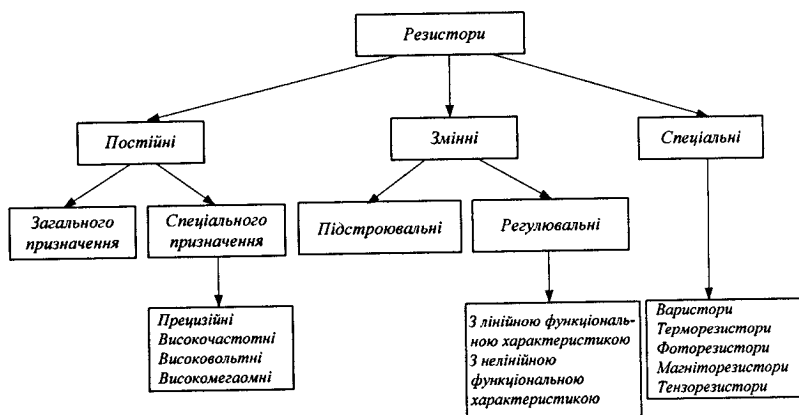


Рисунок 1.1 – Класифікація резисторів за постійністю опору

Високочастотні резистори відрізняються малою власною індуктивністю і ємністю. Призначені для роботи у високочастотних колах, кабелях і хвилеводах як навантаження узгодження, атенуатори, еквіваленти антен тощо. Недротяні високочастотні резистори здатні працювати на частотах до сотень *мегагерців* і більше, а дротяні високочастотні резистори – до сотень *кілогерців*.

Високовольтні резистори розраховані на більші робочі напруги (робоча напруга від одиниць до десятків кіловольт). Застосовуються як подільники напруги у високовольтних колах, іскрогасники тощо.

Високомегаомні резистори мають діапазон номінальних значень опорів від десятків *мегаомів* до сотень *тераомів*. Розраховані на невеликі робочі напруги від 100 до 400 Вт, тому вони працюють у ненавантаженому

режимі й потужності розсіювання їх малі (менше 0,5 Вт). Використовуються в приладах нічного бачення, дозиметрах і вимірювальній апаратурі.

Змінні резистори поділяються на *підстроювальні* (опір змінюється при налаштуванні електричних режимів роботи після виробництва та ремонтів) та *регулювальні* (опір змінюється під час експлуатації апаратури).

Підстроювальні резистори розраховані на періодичне налаштування апаратури, їх зносостійкість невелика, приблизно до 1000 циклів переміщення рухливої системи резисторів.

Регулювальні резистори використовуються при багаторазових регулюваннях апаратури, мають велику зносостійкість (більше 5 тис. циклів), за характером залежності опору резисторів від переміщення його рухливої системи вони підрозділяються на резистори з лінійною А й нелінійними функціональними характеристиками (логарифмічна Б, антилогарифмічна В, і характеристики типу И, Е), зображеними на рис. 1.2, де α – кут повороту.

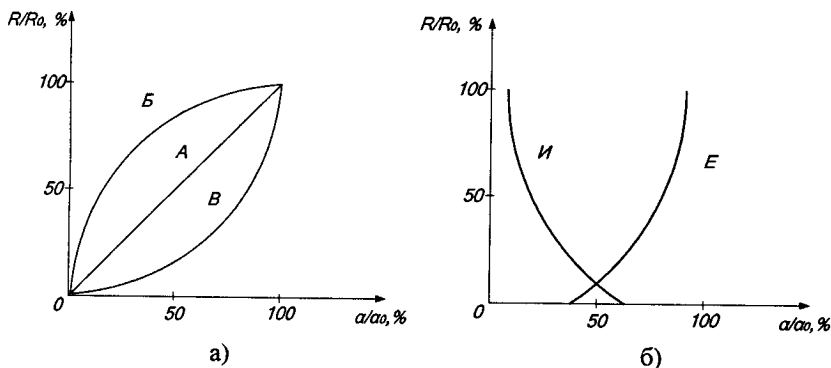


Рисунок 1.2 – Залежності відносної зміни опору резистора від кута повороту рухомої частини

Змінні резистори за конструктивним виконанням поділяються на одноеlementні, багатоelementні, з круговим переміщенням рухомого контакту, з прямолінійним переміщенням рухомого контакту, однооберткові, багатооберткові, з вимикачем, без вимикача, з додатковими виводами.

До спеціальних резисторів відносяться:

варистори – опір залежить від напруженості електричного поля;

терморезистори – опір залежить від температури;

фоторезистори – опір залежить від освітленості резистора;

магніторезистори – опір залежить від магнітного поля;

тензорезистори – опір залежить від тиску.

Залежно від способу захисту від зовнішніх факторів резистори поділяються на ізольовані, неізольовані, герметизовані та вакуумні.

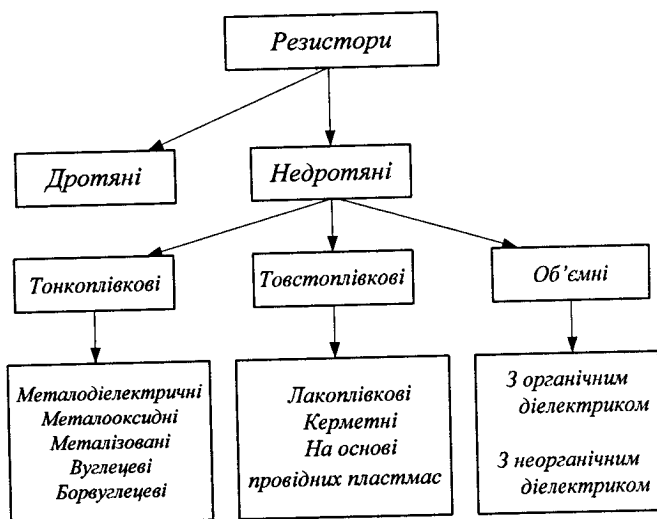
Ізольовані резистори мають ізоляційне покриття (лак, компаунд, пластмаса) і допускають дотикання корпусом шасі й струмоведучих частин радіоелектроапаратури.

Герметизовані резистори мають герметичну конструкцію корпусу, що виключає вплив навколишнього середовища на його внутрішній простір. Герметизація здійснюється за допомогою обпресування спеціальним компаундом.

Вакуумні резистори мають резистивний елемент, поміщений у скляну колбу.

За способом монтажу розрізняють резистори для друкованого, поверхневого монтажу (*SMD – surface mount devices*), для мікромодулів та інтегральних мікросхем.

За матеріалом резистивного елемента розрізняють дротяні та недротяні резистори (рис. 1.3).



Рисунку 1.3 – Класифікація резисторів за матеріалом резистивного елемента

Дротяні резистори – у яких резистивним елементом є високоомний дріт (виготовляється з високоомних сплавів, константану, ніхрому, нікеліну).

Недротяні – у яких резистивним елементом є плівки або об'ємні композиції з високим питомим опором. Недротяні резистори можна розділити на тонкоплівкові (товщина шару до 1 мкм), товстоплівкові (товщина шару 10 – 70 мкм) і об'ємні (товщина в одиницях міліметрів).

Металофольгові резистори – резистивним елементом яких є фольга певної конфігурації.

Тонкоплівкові резистори підрозділяються на металодіелектричні, металоксидні й металізовані, з резистивним елементом у вигляді мікрокомпозиційного шару з діелектрика й металу або тонкої плівки окису металу чи сплаву металу; вуглецевий та борвуглецевий, де провідний елемент являє собою плівку вуглецю або борорганічних сполук.

До *товстоплівкових* відносять лакоплівкові, керметні й резистори на основі провідних пластмас. Провідні резистивні шари товстоплівкових і об'ємних резисторів являють собою гетерогенну систему (композицію) з декількох фаз, одержувану механічним зсувом провідного компоненту (графіту або сажі, металу або окисла металу, з органічними або неорганічними наповнювачами, пластифікаторами або затверджувачами). Після термообробки утвориться монолітний шар з необхідним комплексом параметрів.

В *об'ємних резисторах* як сполучний компонент використовують органічні смоли або склоемалі. Провідним компонентом є вуглець.

В *резистивних керметних* шарах основним провідним компонентом є металеві порошки та їх суміші, що являють собою керамічну основу з рівномірно розподіленими частками металу.

Умовні графічні позначення

Відповідно ГОСТ 2.728-74 на схемах електричних принципових резистори позначаються у вигляді прямокутника розміром 4×10 мм з позначенням порядкового номера та, за необхідності, опору та потужності. Умовні графічні позначення деяких резисторів наведено на рис. 1.4.

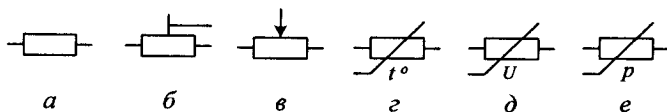









Рисунок 1.4 – Умовні графічні позначення резисторів: *a* – постійного опору; *б* – підстроювальний; *в* – змінний; *г* – терморезистор; *д* – варистор; *е* – тензорезистор

Величина потужності вказується похилими, повздовжніми та поперечними рисками всередині прямокутника, як подано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Умовні графічні позначення постійних резисторів різної потужності

	0,05 Вт
	0,125 Вт
	0,25 Вт
	0,5 Вт
	1 Вт
	2 Вт
	5 Вт

Параметри

До основних параметрів резисторів відносяться такі.

Номинальний опір R – значення опору резистора, яке він повинен мати відповідно до нормативної документації (ГОСТ, ТУ), вимірюється в омах. Опір резистора визначає силу струму, що проходить через нього, при заданій різниці потенціалів на його кінцях. Згідно з ГОСТ 2825-67 встановлено шість рядів номіналів опорів: E6, E12, E24, E48, E96, E192 (табл. 1.2). Цифра вказує кількість номіналів в ряду. Ряди E являють собою геометричну прогресію зі знаменником q_n , що дорівнює, наприклад, для ряду E6 $q_6 = \sqrt[6]{10} = 1,47$.

Таблиця 1.2 – Шкала номінальних опорів для постійних резисторів загального застосування за рядами E6, E12, E24

Індекс ряду	Числові коефіцієнти (число номіналів у ряді)					
	E6	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7
E12	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
E24	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1

Допустиме відхилення опору (допуск) – величина, на яку може відрізнятись фактичний опір резистора від номінального і вимірюється у відсотках. Згідно з ГОСТ 9664-74 встановлено ряд допусків: $\pm 0,001$; $\pm 0,002$; $\pm 0,005$; $\pm 0,01$; $\pm 0,02$; $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; ± 1 ; ± 2 ; ± 5 ; ± 10 ; ± 20 ; $\pm 30\%$. Допуск відповідає рядам номінальних значень, наприклад ряд E6 має допуск $\pm 20\%$, E12 – $\pm 10\%$, E24 – $\pm 5\%$,

Номинальна потужність (P) – максимальна потужність, що резистор може розсіяти протягом гарантійного терміну служби (напрацювання) при збереженні параметрів у встановлених межах. Значення P залежить від

конструкції резистора, фізичних властивостей матеріалів і температури навколишнього середовища. Конкретні значення номінальних потужностей розсіювання у ватах установлюються згідно з ГОСТ 24013-80 вибираються з ряду: 0,01; 0,025; 0,05; 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 160; 250; 500 Вт.

Номінальна потужність вказується на корпусах великогабаритних резисторів, а для малогабаритних визначається за розміром корпусу.

Гранична напруга $U_{гр}$ – максимальна напруга, при якій резистор може працювати без електричного пробую і яка характеризує електричну міцність резистора. Вона залежить від температури, атмосферного тиску та вологості повітря..

Температурний коефіцієнт опору (ТКО) – відносна зміна величини опору резистора у відсотках, при зміні його температури на 1 °С:

$$TKO = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta T} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де R_0 – початкове значення величини опору, Ом;

ΔR – зміна опору, Ом.

Значення ТКО резисторів загального призначення лежить у межах ($\pm 0,0015 \div \pm 0,12$) %/°С.

Рівень власних шумів резисторів – відношення електричної напруги завад резистора, що виникають при проходженні через нього електричного струму, до прикладеної напруги.

Власні шуми резисторів складаються з теплових і струмових шумів.

Напруга теплового шуму залежить від величини опору резистора і його температури:

$$U_T = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}, \quad (1.2)$$

де k – стала Больцмана;

Δf – смуга частот, при яких визначається U_T ;

T – температура;

R – опір резистора.

При протіканні струму по резистору виникають струмові шуми. Вони найбільш характерні для недротяних резисторів.

Напруга струмового шуму визначається виразом:

$$U_I = K_I \cdot U, \quad (1.3)$$

де K_I – коефіцієнт, що залежить від конструкції резистора, властивостей його резистивного елемента;

U – напруга на резисторі, B .

Значення рівня шумів для недротяних резисторів знаходяться у межах від часток одиниць до сотень $мкВ/В$.

Резистори змінного опору мають вищий рівень шумів за рахунок шумів перехідного контакту.

Власна ємність та індуктивність характеризують частотні властивості резисторів. *Власна ємність резистора* складається з ємності резистивного елемента і ємності виводів. *Власна індуктивність* визначається довжиною резистивного елемента, розмірами каркаса й геометрією виводів. Найменшу власну ємність й індуктивність мають недротяні резистори, дротяні – найбільшу.

На відміну від постійних резисторів, змінні резистори мають, крім вище перерахованих, додаткові характеристики й параметри. До них відносяться:

- функціональна характеристична здатність;
- шуми ковзання;
- розбаланс опору (для багатоелементного резистора).

Маркування резисторів

Маркування резисторів здійснюється

– згідно з *ОСТ 11.074.009-78*:

I-й елемент – буква або сполучення букв, позначає підклас резистора:

Р – резистор постійний;

РП – резистор змінний;

НР – набір резисторів;

ВР – варистор постійний;

ВРП – варистор змінний;

ТР – терморезистор з від’ємним ТКО;

ТРП – терморезистор з додатним ТКО;

II-й елемент – цифра, що позначає тип резистора за матеріалом резистивного шару:

1 – недротяні;

2 – дротяні або металофольгові;

III-й елемент – порядковий номер резистора.

Наприклад, Р1-4; РП1-46.

До введення цього стандарту до 1980 р. система маркування була згідно з ГОСТ 3453-68:

I-й елемент – буква або 2 букви:

С – резистор постійний;

СП – резистор змінний;

СН – нелінійний резистор (варистор);

СТ – терморезистор;

СФ – фоторезистор;

II-й елемент – цифра, що позначає тип резистора за матеріалом резистивного шару:

- 1 – недротяні тонкошарові вуглецеві й бор-вуглецеві;
- 2 – недротяні тонкошарові металодіелектричні або металооксидні;
- 3 – недротяні композиційні плівкові;
- 4 – недротяні композиційні об'ємні;
- 5 – дротяні;
- 6 – недротяні тонкошарові металізовані.

Для нелінійних резисторів:

- 1 – карбідокремнієві.

Для терморезисторів:

- 1 – кобальто-марганцеві;
- 2 – мідно-марганцеві;
- 3 – мідно-кобальто-марганцеві;
- 4 – нікель-кобальто-марганцеві.

Для фоторезисторів:

- 1 – сірчано-свинцеві;
- 2 – сірчано-кадмієві;
- 3 – селеністо-кадмієві;

III-й елемент – порядковий номер резистора.

Наприклад, С2-33.

На резисторах наводиться маркування, яке може бути повним або скороченим. Повне містить:

- вид;
- номінальну потужність;
- номінальний опір;
- допуск;
- дату виготовлення.

При малих розмірах резистора застосовується скорочене кодове позначення номінальних значень і допусків.

Система зображення номінальних опорів показана в табл. 1.3. Кодове позначення допустимого відхилення номінального опору – в табл. 1.4.

Таблиця 1.3 – Система зображення номінальних опорів

Одиниці вимірювання	Кодоване позначення одиниці вимірювання	Межі номінального опору	Приклад повного позначення	Приклад скороченого позначення
<i>Ом</i>	E(R)	До 99	0,47 <i>Ом</i> 4,7 <i>Ом</i>	E47 4E7
<i>кОм</i>	K	0,1...99	470 <i>Ом</i> 4,7 <i>кОм</i>	K470 4K7
<i>МОм</i>	M	0,1...99	470 <i>кОм</i> 4,7 <i>МОм</i>	M470 4M7
<i>ГОм</i>	G(G)	0,1...99	470 <i>МОм</i> 4,7 <i>ГОм</i>	G470 4G7

Таблиця 1.4 – Кодоване позначення допустимого відхилення номінального опору

Допуск %	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	30
Код позн.	Ж(В)	У(С)	Д(D)	Р(F)	Л(G)	И(J)	С(K)	В(М)	Ф(N)

Для автоматизованих ліній використовують кольорове маркування. Воно складається з трьох, чотирьох або п'яти кольорових стрічок. Значення кольорів наведено в табл. 1.5, а приклад – на рис. 1.5. Для резисторів з трьома стрічками перша та друга стрічки – це номінальний опір, третя – множник.

Таблиця 1.5 – Колір знака та маркування номінального опору й допусків

Колір знака	Номінальний опір				Допуск, %
	I	II	III (є тільки у резисторів з п'ятьма стрічками)	Множник	
Сріблястий	-	-	-	10^{-2}	± 10
Золотий	-	-	-	10^{-1}	± 5
Чорний	-	0	-	1	-
Коричневий	1	1	1	10	± 2
Червоний	2	2	2	10^2	± 1
Помаранчевий	3	3	3	10^3	-
Жовтий	4	4	4	10^4	-
Зелений	5	5	5	10^5	$\pm 0,5$
Голубий	6	6	6	10^6	$\pm 0,2$
Фіолетовий	7	7	7	10^7	$\pm 0,1$
Сірий	8	8	8	10^8	$\pm 0,05$
Білий	9	9	9	10^9	-

Приклад:

47 кОм $\pm 5\%$

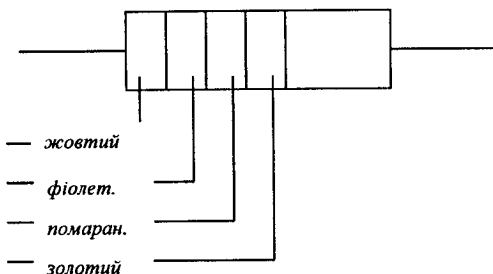


Рисунок 1.5 – Приклад розпізнання резистора (його номінального опору та допуску) за допомогою табл. 1.4

Еквівалентна схема резисторів

Резистор є радіоелементом, основним параметром якого є опір. Однак він має паразитні параметри – власну ємність і власну індуктивність, які з'являються через наявність виводів резистора та особливостей його конструкції. Тому використовують еквівалентну схему резистора, зображену на рис. 1.6.

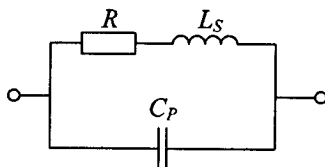


Рисунок 1.6 – Еквівалентна схема резистора

Тут R – номінальний опір в Ом ; L_S – власна паразитна послідовна індуктивність, Гн ; C_P – власна паразитна ємність, Ф .

Повний опір резистора (імпеданс) на частоті f [Гц] визначається виразом:

$$Z = U/I = (R + j2\pi fL_S) / [(R + j2\pi fL_S) \cdot j2\pi fC_P + 1] \text{ [Ом]}. \quad (1.4)$$

На рис. 1.7 показано типові залежності імпедансу резисторів від частоти. Подане сімейство кривих має дві особливості: імпеданс високоомних резисторів спочатку не залежить від частоти, а потім зменшується, у той час як імпеданс низькоомних резисторів спочатку не залежить від частоти, потім різко зростає, утворює пік і спадає.

У табл. 1.6 наведено значення паразитних складових і власних резонансних частот резисторів, що найчастіше використовуються.

Таблиця 1.6 – Значення паразитних складових і власних резонансних частот

Тип резистора	L_S , нГн	C_P , нФ	f , МГц
Металевий об'ємний	3-100	0,1-1,0	500-3000
Композиційний	5-30	0,1-1,5	750-2000
Вуглеводневий	15-700	0,1-0,8	300-1500
Металоплівковий	15-700	0,1-0,8	300-1500
З поверхневим монтажем	0,2-3	0,01-0,08	500-4000
Дротяний	47-25000	2-14	8-200
Дротяний (безіндуктивний)	2-600	0,1-5	90-1500

У загальному випадку бажано, щоб резонансна частота резистора набагато перевищувала робочу частоту схеми для запобігання різких змін імпедансу.

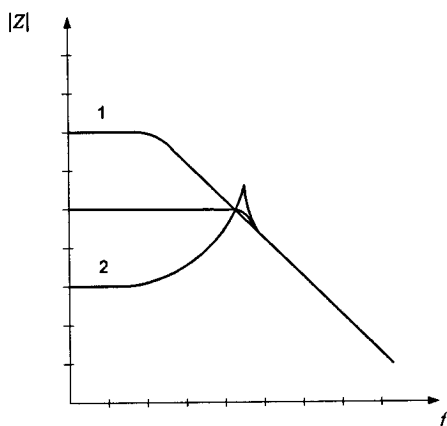


Рисунок 1.7 – Типові залежності імпедансу $|Z|$ резисторів від частоти (1 – для високоомних резисторів; 2 – для низькоомних)

Розрахунок дротяного резистора

Вхідними даними для розрахунку є опір R та потужність P резистора.

1. Визначаємо силу струму, що протікає через резистор за формулою:

$$I = \sqrt{P/R}. \quad (1.5)$$

2. Визначаємо діаметр дроту за формулою

$$d = \sqrt[3]{1,27 \cdot I / \nabla}, \quad (1.6)$$

де $\nabla = 2 \text{ А/мм}^2$ – норма навантаження.

3. Обираємо високоомний матеріал з табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Матеріали дротів та їх робочі характеристики

Матеріал	Питомий опір, <i>Ом·мм²/м</i>	Питома вага, <i>г/см³</i>	Темп. коеф. опору	$T_{пл}$, <i>град.</i>	Мах $T_{роб}$, <i>град.</i>
Мідь	0,0175	8,9	+0,004	1085	-
Алюміній	0,0281	2,7	+0,004	685	-
Залізо	0,135	7,8	+0,005	1530	-
Сталь	0,176	7,95	+0,0052	-	-
Нікелін	0,4	8,8	+0,00022	1100	200
Константан	0,49	8,9	-0,000005	1200	200
Манганій	0,43	8,4	+0,00002	910	110
Ніхром	1,1	8,2	+0,00017	1550	1000

4. Визначаємо довжину дроту за формулами:

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho}, \quad (1.7)$$

$$l = \frac{0,787 \cdot R \cdot d^2}{\rho}, \quad (1.8)$$

де ρ – питомий опір (табл. 1.7);

l – довжина дроту, m ;

S – площа поперечного перерізу дроту, mm^2 , $S = 0,787 \cdot d^2$;

d – діаметр дроту, mm .

Порядок виконання роботи

1. Визначити тип та основні параметри резисторів, виданих викладачем. Дані занести в табл. 1.8.

2. Виміряти за допомогою омметра значення опорів резисторів в кількості 100 штук, виданих викладачем. Дані занести в табл. 1.9.

Таблиця 1.8 – Тип та основні параметри резисторів

№ резистора	Тип резистора	Номинальний опір, Ω	Допуск, %	Номинальна потужність, W

Таблиця 1.9 – Результати вимірювань

№ вимірювання	Опір, Ω	№ вимірювання	Опір, Ω

3. Побудувати гістограму, що відображає кількість резисторів та відповідні їм значення опорів, і показати на ній відхилення опорів від номінальних. Зробити висновок, чи знаходяться виміряні значення в межах допуску.

4. Розрахувати дротяний опір і зобразити ескіз резистора за заданими варіантами (табл. 1.10).

Таблиця 1.10 – Варіанти завдань для розрахунків

Варіант	Опір, Ω	Потужність, W	$U_{\text{кв}}$, V	R_1 , Ω	R_2 , Ω	Допуск, %
1	100	2	12	200	30	0,5
2	1,5 k	5	9	33 k	180 k	10
3	47 k	15	5	16 k	3,3 k	5
4	1	1	3,3	24 k	470 k	2
5	12 k	10	15	560 k	48 k	20

5. Визначити параметри еквівалентної схеми резистора та побудувати частотну залежність повного імпедансу, користуючись табл. 1.6.
6. Розрахувати подільник напруги (рис. 1.8).

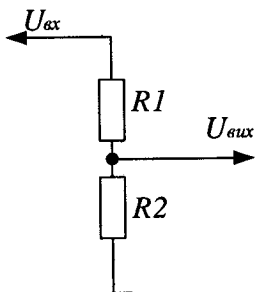


Рисунок 1.8 – Подільник напруги

Знайти коефіцієнт передачі K_n і напругу U_{aux} , користуючись вхідними даними з табл. 1.10.

Розрахувати вплив допуску на вихідні параметри резисторного подільника.

7. Провести комп'ютерне моделювання в Electronic Workbench 5.12:
- скласти схему подільника напруги, яку зображено на рис. 1.9;
 - задати значення джерела напруги та опорів резисторів $R1$, $R2$ відповідно до проведених вище розрахунків;
 - визначити напругу на виході схеми; струм, що протікає через подільник, а також розрахувати потужності, що розсіюються на резисторах;
 - порівняти одержані дані з результатами розрахунків.

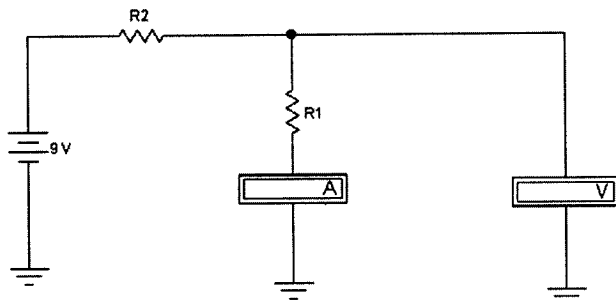


Рисунок 1.9 – Схема подільника напруги в Electronic Workbench

8. Оформити звіт та зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте означення резистора.
2. Якими основними параметрами характеризуються резистори?
3. Наведіть класифікацію резисторів.
4. Охарактеризуйте спеціальні резистори.
5. Поясніть маркування резисторів. Наведіть приклади скороченого та повного маркування.
6. Зобразіть еквівалентну схему резистора та поясніть призначення кожного елемента.
7. Поясніть характер залежності імпедансу резисторів від частоти.
8. Які матеріали використовуються для виготовлення дротяних резисторів?
9. Наведіть схему подільника напруги та формулу для розрахунку його вихідної напруги.
10. Наведіть методику розрахунку дротяного резистора.
11. Наведіть умовні графічні позначення резисторів.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРІВ

Мета роботи: вивчити призначення, класифікацію, систему маркування, умовні графічні позначення конденсаторів, їх основні параметри та характеристики, еквівалентні схеми та типові схеми включення, освоїти методику розрахунку плоского конденсатора.

Теоретичні відомості

Означення

Конденсатор (capacitor) – це пасивний радіоелемент, основним параметром якого є електрична ємність (*capacitance*).

Конструктивно конденсатор – це дві провідні пластини, розділені діелектриком. Якщо до пластин прикласти напругу, то між ними виникнуть електричні силові лінії, що будуть проходити через діелектрик. Основною одиницею вимірювання ємності є фарад – Φ . Проте ця одиниця занадто велика для практичного застосування, тому зазвичай використовують її частинні одиниці: мікрофарад ($1 \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi$), нанофарад ($1 \text{ н}\Phi = 10^{-9} \Phi$) і пікофарад ($1 \text{ п}\Phi = 10^{-12} \Phi$).

Якщо до виводів конденсатора прикласти постійну напругу, то на пластинках з'явиться заряд:

$$q = C \cdot U, \quad (2.1)$$

де q – заряд, Кл;

C – ємність, Φ ;

U – прикладена напруга, В.

Під час заряджання конденсатора в ньому накопичується електрична енергія. Накопичена конденсатором енергія визначається виразом:

$$W = C \cdot U^2 / 2. \quad (2.2)$$

Якщо до конденсатора прикласти змінну напругу, то він буде по чергово заряджатися і розряджатися. Реактивний опір конденсатора:

$$X_c = \frac{1}{j2\pi fC}, \quad (2.3)$$

де $1/j = -j$ – поворот вектора за годинниковою стрілкою на -90° ;

C – ємність, Φ ;
 f – частота, $\Gamma\text{ц}$.

Класифікація конденсаторів

Конденсатори поділяються на конденсатори постійної, змінної та підстроювальної ємності. За способом зміни ємності конденсатори бувають з механічною та електричною зміною ємності.

За типом діелектрика між обкладинками конденсатори поділяються на вакуумні; повітряні; з газоподібним діелектриком; з твердим діелектриком; керамічні; кварцові; скляні; склокерамічні; склоемалеві; слюдяні; паперові з обкладинками із фольги; паперові з металізованими обкладинками; електролітичні фольгові алюмінієві; електролітичні фольгові танталові, ніобієві та ін.; електролітичні об'ємно-пористі; напівпровідникові оксидні; металічні оксидні; полістирольні; фторопластові; поліетилентерефталатні; комбіновані; лакоплівкові; полікарбонатні.

Умовні графічні позначення

Умовні графічні позначення конденсаторів на схемах електричних принципів (ГОСТ 2.728-74) зображено на рис. 2.1, а їх розміри – на рис. 2.2.

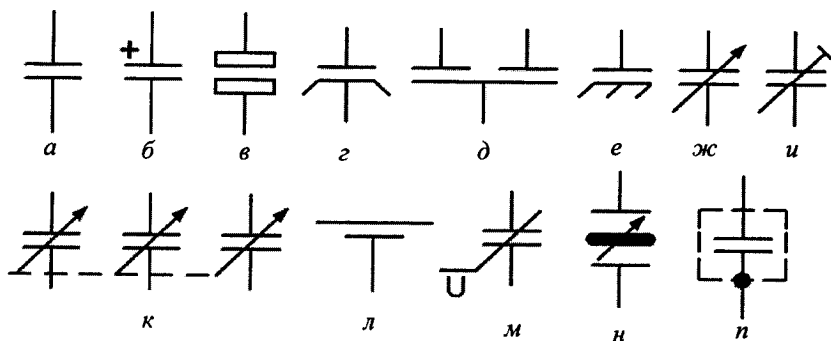


Рисунок 2.1 – Умовні графічні позначення конденсаторів на схемах електричних принципів: *a* – постійної ємності; *b* – електролітичний поляризований; *v* – електролітичний неполяризований; *z* – постійної ємності з позначеним виводом; *d* – диференціальний; *e* – опорний; *ж* – змінної ємності; *u* – підстроювальний; *к* – багатосекційний змінної ємності; *л* – прохідний; *м* – вариконд; *н* – змінної ємності двостаторний; *п* – з екраном, з'єднаним з виводом

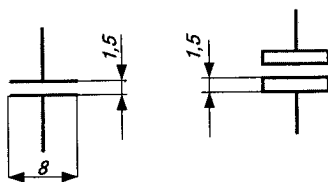


Рисунок 2.2 – Розміри умовних графічних позначень конденсаторів згідно з ГОСТ 2.728-74

Основні параметри конденсаторів

До основних параметрів конденсатора відносяться такі.

Номинальна ємність конденсатора – ємність, яку повинен мати конденсатор відповідно до нормативної документації (ДСТУ або ТУ). Фактична ємність кожного конденсатора відрізняється від номінальної, але не більше, ніж на допустиме відхилення. Значення номінальної ємності всіх типів конденсаторів постійної ємності встановлені стандартом ССВ 1076-78, згідно з яким номінальна ємність повинна відповідати рядам номінальних значень Е (див. лаб. роб. № 1).

Допустиме відхилення ємності від номінальної (допуск) – характеризує точність значення ємності. Значення цих відхилень встановлені ГОСТ 9661-73 в відсотках для конденсаторів ємністю 10 нФ і більше, і в пікофарадах для конденсаторів з меншою ємністю.

Номинальна робоча напруга конденсатора – максимальна напруга, при якій конденсатор може працювати протягом мінімального напрацювання в умовах, вказаних в технічній документації (ГОСТ 21415-75). Значення номінальної напруги встановлені згідно з ГОСТ 9665-77.

Електричний опір ізоляції конденсатора – електричний опір конденсатора на постійному струмі, визначається відношенням $R_{i3} = U/I_{вт}$, де U – прикладена напруга, $I_{вт}$ – струм втрат. Опір ізоляції конденсаторів усіх видів, крім електролітичних і напівпровідникових, великий і виражається в мегаомах, гігаомах і, навіть, тераомах. Його вимірюють при нормальних кліматичних умовах (температура 25 ± 10 °С, відносна вологість 45 – 75%, атмосферний тиск 86 – 106 кПа). З підвищенням температури опір ізоляції зменшується.

Частотні властивості. Ємність конденсатора залежить від частоти прикладеної напруги. При зміні частоти змінюється діелектрична проникність діелектрика і ступінь впливу паразитних параметрів: власної індуктивності і опору втрат. На високих частотах будь-який конденсатор можна розглядати як послідовний коливальний контур, який містить ємність C , власну індуктивність L_C і опір втрат R_B . Резонанс цього контуру відбувається на частоті $f_p = 1/2\pi\sqrt{L_C C}$. При $f_p < f$ конденсатор в колі змінного

струму поводить себе як котушка індуктивності, отже його доцільно використовувати лише на частотах $f_p > f$, на яких його опір носить ємнісний характер. Зазвичай максимальна робоча частота конденсатора в 2-3 рази менша за резонансну.

Характер частотної залежності діючої ємності конденсатора C_D (при врахуванні дії параметрів L_C і R_B) в діапазоні частот від нуля до f_p обумовлюється відношенням параметрів C, L_C, R_B .

Тангенс кута діелектричних втрат ($tg\delta$) конденсатора – відношення активної потужності конденсатора до його реактивної потужності при синусоїдальній напрузі певної частоти (ГОСТ 21415-75). Активна потужність конденсатора характеризує втрати енергії в ньому, обумовлені провідністю діелектрика, нагріванням металевих елементів, контактом між електродами і выводами та іншими явищами. Тангенс кута діелектричних втрат визначається за виразом:

$$tg\delta = 1/\omega CR_B . \quad (2.4)$$

Величина, обернена до $tg\delta$, називається добротністю конденсатора і позначається Q .

$$Q = 1/tg\delta . \quad (2.5)$$

Чим більша Q , тим менші втрати енергії в конденсаторі при інших рівних умовах.

Допустима амплітуда змінної напруги на конденсаторі $U_{m\text{доп}}$ – амплітуда змінної напруги, при якій втрати в конденсаторі не перевищують допустимі. Значення $U_{m\text{доп}}$ наводяться в довідниках або визначаються за формулою:

$$U_{m\text{доп}} = \sqrt{P_{r,\text{доп}}/\pi fC} , \quad (2.6)$$

де $P_{r,\text{доп}}$ – допустима реактивна потужність, В·А;

f – частота змінної напруги на конденсаторі, Гц;

C – ємність конденсатора, Ф.

Перевищення $U_{m\text{доп}}$ може викликати тепловий пробій діелектрика та інші небажані явища.

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) характеризує зворотні зміни ємності конденсатора із зміною температури. Він являє собою відношення похідної від ємності за температурою до ємності конденсатора. Практично ТКЄ визначають як відносну зміну ємності конденсатора при зміні температури на 1 °С.

$$TKC = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot \Delta T} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

де C_0 – початкове значення величини ємності, Φ ;

ΔC – зміна ємності, Φ .

Слюдяні, керамічні і деякі плівкові конденсатори залежно від температурної стабільності поділяються на групи, кожна з яких характеризується своїм TKC . Незворотні зміни ємності конденсаторів при впливі тепла характеризуються остаточною відносною зміною ємності, яку називають коефіцієнтом температурної нестабільності ємності ($KTHE$).

З підвищенням температури зменшується електрична міцність та строк служби конденсатора. Зниження атмосферного тиску призводить до зменшення електричної міцності, змін ємності внаслідок деформації елементів конструкції конденсаторів, можливого порушення герметичності конденсатора. При поглинанні вологи діелектриком конденсатора збільшується ємність і різко зменшується опір ізоляції. В результаті зменшення опору ізоляції збільшуються втрати енергії, особливо при підвищених температурах та зменшується електрична міцність (збільшується імовірність пробою). При тривалому зберіганні конденсаторів змінюється їх ємність.

Типові основні параметри конденсаторів постійної ємності наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри конденсаторів постійної ємності

Типи конденсаторів	Діапазон ємностей	Максимальна робоча напруга, В	Максимальна робоча температура, °C	Допуск, %	Опір ізоляції, МОм
слюдяні	1 нФ – 0,1 мкФ	50000	150	±(0,25-5)	>10000
паперові	500 нФ – 50 мкФ	1000000	125	±(10-20)	100
полістирольні	50 нФ – 10 мкФ	1000	85	±0,5	1000
полікарбонатні	0,001 – 1 мкФ	600	140	±1	1000
поліефірні	5000 нФ – 10 мкФ	600	125	±10	1000
керамічні:					
з низькою ε	1 нФ – 0,001 мкФ	6000	125	±(5-20)	1000
з високою ε	100 нФ – 2,2 мкФ	100	85	±100÷-20	100
скляні	10 нФ – 0,15 мкФ	6000	125	±(1-20)	> 10000
вакуумні	1 – 5000 нФ	60000	85	±5	> 10000
електролітичні:					
алюмінієві	1 мкФ – 1 Ф	700	85	±100÷-20	<1
танталові	0,001 – 1000 мкФ	100	125	±(5-20)	>1

Маркування конденсаторів

Маркування конденсаторів здійснюється згідно з ОСТ 11.074.009–78.

Позначення містить три елементи.

Перший елемент (одна або дві літери) позначає групу конденсаторів:

К – конденсатор постійної ємності;

КТ – конденсатор підстроювальний;

КП – конденсатор змінний.

Другий елемент – число, яке позначає різновид конденсаторів:

1 – вакуумний;

2 – повітряний;

3 – з газоподібним діелектриком;

4 – з твердим діелектриком;

10 – керамічні з номінальною напругою до 1600 В;

15 – керамічні з номінальною напругою 1600 В і вище;

20 – кварцові;

21 – скляні;

22 – склокерамічні;

23 – склоемалеві;

31 – слюдяні малої потужності;

32 – слюдяні великої потужності;

40 – паперові з номінальною напругою до 2 кВ з обкладинками із фольги;

41 – паперові з номінальною напругою 2 кВ і більше з обкладинками із фольги;

42 – паперові з металевими обкладинками;

50 – електролітичні фольгові алюмінієві;

51 – електролітичні фольгові танталові, ніобієві та ін.;

52 – електролітичні об'ємно-пористі;

53 – напівпровідникові оксидні;

54 – металічні оксидні;

60 – повітряні;

61 – вакуумні;

71 – полістирольні;

72 – фторопластові;

73 – поліетилентерефталатні;

75 – комбіновані;

76 – лакоплівкові;

77 – полікарбонатні.

Третій елемент – порядковий номер конденсатора, який присвоюється при розробці.

На конденсаторах наводиться маркування, яке може бути повним або скороченим. Повне містить:

- тип;
- номінальну ємність;

- допуск;
- номінальну напругу;
- марку заводу-виробника;
- дату виготовлення.

Якщо конденсатор даного типу виготовляється тільки одного класу точності, то допуск не маркують. На слюдяних та деяких інших конденсаторах вказують групу ТКЄ.

При малих розмірах конденсатора застосовується скорочене кодоване позначення. Кодоване позначення номінальної ємності повинно містити 3 або 4 знаки, включаючи дві або три цифри та букву. Буква позначає множник та визначає положення коми десяткового дробу. Буквами р, п, μ, т, F позначають множники 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} , 1. Кодовані позначення ТКЄ, допусків та номінальних напруг наведено в табл. 2.2–2.4.

Таблиця 2.2 – Кодовані позначення ТКЄ

Група	ТКЄ	Колір корпусу (для керамічних конденсаторів)
А	Не нормується	–
Б	$\pm 0,02$	–
В	$\pm 0,1$	–
Г	$\pm 0,005$	–
ДО	$-(0,11 - 0,15)$	–
Д	$-(0,06 - 0,08)$	Червоний
М	$-(0,002 - 0,008)$	Голубий
ПРО	$\pm 0,003$	Сірий
З	$\pm(0,009 - 0,015)$	Синій
Н	Не нормується	Оранжевий або жовтий

Таблиця 2.3 – Кодовані позначення допустимих відхилень ємності від номінальних

Допустиме відхилення, %	Кодоване позначення		Допустиме відхилення, %	Кодоване позначення		Допустиме відхилення, %	Кодоване позначення	
	нове	старе		нове	старе		нове	старе
$\pm 0,001$	Е	–	$\pm 0,25$	С*	–	± 30	Н	Ф
$\pm 0,002$	L	–	$\pm 0,5$	Д*	Д	$-10...+30$	Q	–
$\pm 0,005$	R	–	± 1	F*	Р	$-10...+50$	T	Э
$\pm 0,01$	P	–	± 2	G	Л	$-10...+100$	Y	Ю
$\pm 0,02$	U	–	± 5	J	И	$-20...+50$	S	Б
$\pm 0,05$	X	–	± 10	K	С	$-20...+80$	Z	А
$\pm 0,1$	V*	Ж	± 20	M	В	+100	–	Я

*Допустимі відхилення ємності, виражені в пікофарадах, кодуються такими ж літерами.

Таблиця 2.4 – Кодовані позначення номінальної напруги на конденсаторах

Номінальна напруга, В	Код	Номінальна напруга, В	Код	Номінальна напруга, В	Код
1,0	I	25	G	200	Z
1,6	P	32	H	250	W
2,5	M	40	S	315	X
3,2	A	50	J	350	T
4,0	C	63	K	400	Y
6,3	B	80	L	450	U
10	D	100	N	500	V
16	E	125	P		
20	F	160	Q		

Еквівалентна схема конденсаторів

Конденсатор, як радіоелемент, окрім основного параметра, ємності C , має ряд паразитних параметрів. Еквівалентна схема конденсатора показана на рис. 2.3, де L – паразитна індуктивність, яка визначається конструкцією та розмірами обкладинок та виводів і обмежує частотний діапазон застосування конденсатора, R_{δ} – опір діелектрика, R_n – послідовний опір виводів та обмоток конденсатора.

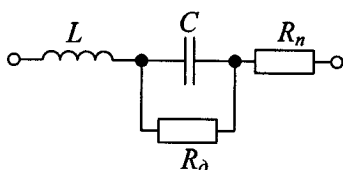


Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема конденсатора

На частоті f імпеданс конденсатора визначається за формулою:

$$Z = U/I = R_{\delta} / (j2\pi f C R_{\delta} + 1) + j2\pi f L + R_n. \quad (2.8)$$

На рис. 2.4 подано типові графіки залежності імпедансу конденсаторів від частоти. При великих послідовних опорах R_n на кривій імпедансу спостерігається плато поблизу власної резонансної частоти $f_c = 1/[2\pi(CL)^{1/2}]$, $[Гц]$, а при малих послідовних опорах R_n на цій частоті спостерігається різкий провал.

Як правило, резонансна частота конденсатора повинна значно перевищувати робочу частоту схеми. Для конденсаторів з високою ємністю досягти цього досить важко.

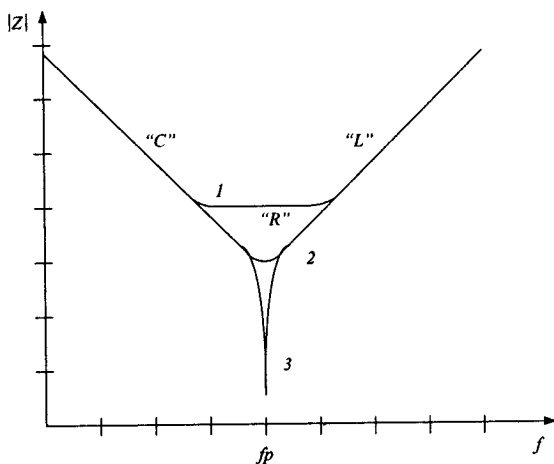


Рисунок 2.4 – Частотні залежності нормованого імпедансу конденсаторів 1 – для конденсаторів з великим послідовним опором R_n ; 2, 3 – для конденсаторів з малим послідовним опором R_n ($R_{n2} > R_{n3}$)

Розрахунок плоского конденсатора

Вихідними даними є ємність C та номінальна робоча напруга U конденсатора.

1. Обираємо матеріал діелектрика конденсатора з табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри діелектриків

Матеріал	Діелектрична проникність	Електрична міцність E , кВ/см
Сухе повітря	1,00059	22
Полістирол	2,5	90-120
Папір	3	75
Полиетилен	2,3	42
Просочений папір	4-6	100-300
Слюда	6,8	135
Вініпласт	4	225
Гетинакс	7	220
Оргскло	3,7	300
Фарфор	7	250
Ебоніт	3	170

2. Розраховуємо товщину діелектрика d за формулою

$$d > \frac{U \cdot K_3}{E},$$

де K_3 – коефіцієнт запасу (2÷3),

E – електрична міцність діелектрика.

3. Обраховуємо площу S обкладинок виходячи з формули

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.15)$$

де $\varepsilon_0 = 0,0885 \text{ нФ/см}$ – відносна діелектрична проникність,
 ε – діелектрична проникність матеріалу діелектрика.

Порядок виконання роботи

1. Визначити тип та основні параметри конденсаторів, виданих викладачем. Дані занести в табл. 2.6.

2. Виміряти за допомогою LC -метра значення ємностей конденсаторів в кількості 100 штук, виданих викладачем. Дані занести в табл. 2.7.

Таблиця 2.6 – Тип та основні параметри конденсаторів

№ конденса- тора	Тип конденса- тора	Номінальна ємність, Φ	Допуск, %	Номінальна напруга, В	ТКЕ, %/°С

Таблиця 2.7 – Результати вимірювань

№ вимірювання	Ємність, Φ	№ вимірювання	Ємність, Φ

3. Побудувати гістограму, що відображає кількість конденсаторів та відповідні їм значення ємностей, і показати на ній відхилення ємностей від номінальних. Зробити висновок, чи знаходяться виміряні значення в межах допуску.

4. Розрахувати параметри плоского конденсатора і зобразити його ескіз за заданими варіантами (табл. 2.8).

5. Розрахувати паразитну ємність монтажного проводу розміщеного на відстані h , діаметром D , довжиною l від пластини нескінченно великої площі в повітрі за варіантами (табл. 2.8).

Розрахунок виконати за формулою:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \left[\frac{2h}{D} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 1} \right]} [\Phi], \quad (2.16)$$

Таблиця 2.8 – Варіанти завдань для розрахунків

Варіант	Ємність, $n\Phi$	Напруга U , B	h , m	D , m	l , m	Опір R , Ω	Потужність P , $Вт$
1	10	12	0,01	0,005	3	100	1
2	100	5	0,005	0,001	5	330	5
3	5	15	0,02	0,001	1	50	10
4	17	9	0,1	0,002	0,5	75	3
5	12	3	0,07	0,002	0,6	1000	1

6. Розрахувати подільник напруги, що складається з конденсатора, включеного послідовно з резистором, опором R , на якому розсіюється потужність P (табл. 2.8), у коло змінного струму $f = 50$ Гц, з діючим значенням напруги 220 В. Обрати тип, номінальну ємність та номінальну напругу конденсатора.

7. Провести комп'ютерне моделювання в Electronic Workbench 5.12:

- скласти схему подільника напруги, яку подано на рис. 2.6;
- задати значення джерела напруги $V1$, опору резистора $R1$ та ємності конденсатора $C1$ відповідно до проведених вище розрахунків;
- визначити напругу на виході схеми; струм, що протікає через подільник, а також розрахувати потужності, що розсіюються на резисторі та конденсаторі;
- порівняти одержані дані з результатами розрахунків.

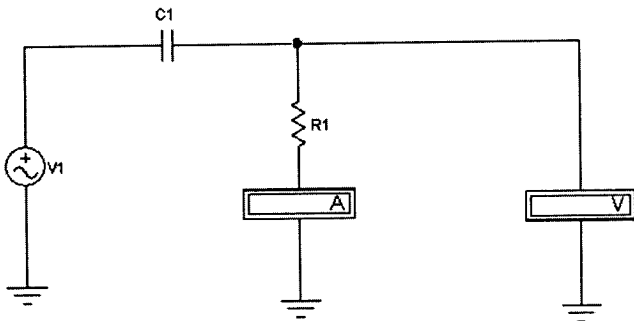


Рисунок 2.6 – Схема подільника напруги в Electronic Workbench

8. Оформити звіт та зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте означення конденсатора.
2. Якими основними параметрами характеризуються конденсатори?
3. Наведіть класифікацію конденсаторів.
4. Поясніть маркування конденсаторів. Наведіть приклади скороченого та повного маркування.
5. Наведіть умовні графічні позначення конденсаторів.
6. Зобразіть еквівалентну схему конденсатора та поясніть призначення кожного елемента.
7. Поясніть характер залежності імпедансу конденсаторів від частоти.
8. Які матеріали використовуються для виготовлення конденсаторів?
9. Наведіть схему подільника напруги та формулу для розрахунку його вихідної напруги.
10. Наведіть методику розрахунку плоского конденсатора.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОТУШОК ІНДУКТИВНОСТІ

Мета: вивчити призначення, класифікацію, умовні графічні позначення котушок індуктивності, їх основні параметри та характеристики, еквівалентні схеми та типові схеми включення.

Теоретичні відомості

Означення

Котушка індуктивності (inductor) – це пасивний радіоелектронний елемент, основним параметром якого є індуктивність (*inductance*).

Індуктивність L при дії постійного струму визначається відношенням поточкозчеплення самоіндукції котушки до струму в ній (ГОСТ 19880-74).

Індуктивність L при дії струму синусоїдальної форми визначається за формулою:

$$L = d\Psi/dI, \quad (3.1)$$

де $d\Psi$ – диференціал поточкозчеплення;

dI – диференціал струму.

Котушки індуктивності (або котушки самоіндукції) застосовуються в різноманітній радіоелектронній апаратурі як елементи коливальних контурів для отримання магнітного зв'язку між елементами електричного кола або створення на окремих ділянках електричного кола заданих реактивних опорів індуктивного характеру.

Котушки індуктивності, на відміну від резисторів та конденсаторів, не випускаються виробниками у вигляді стандартних типових виробів (включення становлять деякі типи котушок та дроселів), а розраховуються та виготовляються для кожного радіоелектронного приладу.

Класифікація

Залежно від області застосування розрізняють котушки індуктивності для селективних і аперіодичних електричних кіл.

Котушки селективних кіл входять до складу фільтрів, ліній затримки, коливальних контурів, котушок зв'язку, дроселів високої частоти та ін.

Котушки аперіодичних кіл входять до складу трансформаторів і дроселів низької частоти.

Залежно від способу застосування котушки індуктивності поділяють на:

- котушки налаштування (або контурні котушки – призначені для налаштування коливальних контурів на задану частоту);

- котушки зв'язку (призначені для передачі електричних коливань з одного контуру в інший);
- дроселі.

Дросель (від німецького скорочувати) являє собою різновид котушки індуктивності. Його включають в електричне коло для послаблення змінної складової струму в колі, для розділення або обмеження сигналів різної частоти. Залежно від конструкції і застосування розрізняють дроселі високої та низької частоти.

Дроселі високої частоти (ВЧ) мають малий опір для постійного струму, струмів звукової частоти і великий опір для струмів високої частоти. Цей тип дроселів застосовують в радіоприймачах, в колах зворотного зв'язку для розділення струмів високої та звукових частот, в фільтрах кіл живлення і, так званих, схемах паралельного живлення.

Дроселі високої частоти виготовляють у вигляді одношарових та багатшарових котушок без осердя або з осердям. Для дроселів довгих та середніх хвиль застосовують секційну намотку. Дроселі коротких та метрових хвиль мають одношарову намотку. Для зменшення габаритів дроселів застосовують магнітні осердя. Дроселі високої частоти з осердям із магнітодіелектриків і феритів мають меншу власну ємність і працюють в ширшому діапазоні частот. Низькочастотний дросель зовні схожий на електричний трансформатор з однією обмоткою.

Залежно від сталості значення індуктивності котушки індуктивності поділяють на: постійні та змінні, підстроювальні.

Залежно від конструктивного виконання котушки індуктивності поділяють на: циліндричні та плоскі, каркасні та безкаркасні.

За типом намотування котушки поділяють на: одношарові та багатшарові; з рядковою намоткою, намоткою з кроком, з секціонованою намоткою, намоткою внавал, з перехресною та біфілярною намотками.

Окрім того, котушки поділяються на: котушки з осердям та без них, на котушки з осердям із магнітних та немагнітних матеріалів, з екраном та без екрана.

Умовні графічні позначення

Відповідно до ГОСТ 2.728-74 на схемах електричних принципів котушки індуктивності позначаються так, як наведено на рис. 3.1.

Основні параметри котушок індуктивності

Індуктивність L. Котушки індуктивності є нестандартним елементом, тому вони не мають номінального значення індуктивності, окрім тих, що випускаються серійно. Значення індуктивності заводських котушок зазвичай зазначено на корпусі. Значення індуктивності L вимірюється в генрі (Гн). На практиці використовують похідні від Гн: мілігенрі (мГн), мікрогенрі (мкГн) та наногенрі (нГн), які пов'язані з основною одиницею таким чином: $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$; $1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$; $1 \text{ нГн} = 10^{-9} \text{ Гн}$.

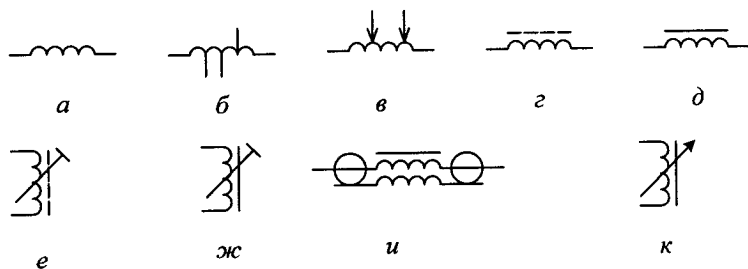


Рисунок 3.1 – Умовні графічні позначення: *а* – котушка з постійною індуктивністю; *б* – котушка індуктивності з середніми виводами; *в* – котушка індуктивності з ковзними контактами; *г* – котушка індуктивності з магнітодіелектричним магнітопроводом; *д* – дросель з феромагнітним магнітопроводом; *е* – котушка індуктивності, підстроювана магнітодіелектричним магнітопроводом; *ж* – котушка індуктивності, підстроювана феромагнітним магнітопроводом; *и* – коаксимальний дросель з феромагнітним магнітопроводом; *к* – варіометр

Добротність котушки індуктивності Q – це відношення реактивного (індуктивного) опору котушки до її активного опору втрат R :

$$Q = \omega L / R. \quad (3.2)$$

Добротність характеризує втрати енергії в котушці – чим більша величина добротності, тим більш якісна котушка. Добротність котушки в більшості випадків визначає резонансні властивості та ККД контуру. Для підвищення добротності, а також для досягнення найбільшої стабільності параметрів дуже важливо використовувати каркаси котушок, виготовлені з високоякісних ізоляційних матеріалів. Чим вища робоча частота, тим вищою повинна бути добротність котушки. Добротність котушок індуктивності, які широко використовуються в радіотехніці, має значення від 20 до 300 і вище.

Температурний коефіцієнт індуктивності (ТКІ) – відношення похідної від індуктивності за температурою до індуктивності котушки. Він характеризує відносну зміну індуктивності котушки при зміні температури навколишнього середовища на 1°C . *ТКІ* має додатне значення і для його компенсації в контурах застосовують конденсатори з від’ємним *ТКС*.

$$TKI = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \cdot 100\%,$$

де L_0 – початкове значення величини індуктивності, L_n ;

ΔL – зміна індуктивності, Гн.

Власна ємність котушки індуктивності – ємність між витками та шарами обмотки котушки – є паразитним параметром. Наявність власної ємності котушки обумовлює збільшення втрат енергії та зменшення стабільності настроювання коливальних контурів, а в діапазонних контурах – зменшення коефіцієнта перекриття діапазону частот.

Параметри деяких котушок індуктивності наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри котушок індуктивності

Спосіб намотування і матеріал каркаса	$TKI, \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Q	$C, \text{ нФ}$	Область застосування
Котушка на керамічному каркасі	(10 – 20)	80 – 150	0,5 – 2,0	Генератори і гетеродини КХ і УКХ високої стабільності
Котушка з гарячим намотуванням на керамічному каркасі	(10 – 30)	100 – 400	0,5 – 2,0	Те ж
Котушка з холодним тугим намотуванням на керамічному каркасі	(40 – 100)	100 – 400	0,5 – 2,0	Генератори і гетеродини КХ і УКХ зниженої стабільності
Котушка з безкаркасным намотуванням	(50 – 150)	100 – 600	0,5 – 2,0	Підсилювальні каскади УКХ
Котушка з одношаровим щільним намотуванням і каркасом з органічного діелектрика	(100 – 200)	80 – 200	3 – 5	Генератори і гетеродини низької стабільності, підсилювальні каскади СХ і КХ
Котушка з намотуванням типу "універсал"	(150 – 300)	50 – 100	5 – 10	Гетеродини низької стабільності і підсилювальні каскади ДХ і СХ
Котушка з перехресним універсальним намотуванням	(150 – 300)	30 – 50	15 – 30	Те ж
Котушка з секціонованим намотуванням (3 – 4 секції)	(150 – 300)	150 – 170	5 – 10	Те ж
Котушка з несекціонованим намотуванням		20 – 30	10 – 50	Дроселі високої частоти

Розрахунок котушок індуктивності (циліндричних, одношарових та без осердя)

Індуктивність котушки залежить від її геометричних розмірів, кількості витків та способу намотки котушки. Чим більший діаметр, довжина намотки і кількість витків котушки, тим вища її індуктивність.

Якщо котушка намотується щільно виток до витка, то індуктивність її буде більшою порівняно з котушкою, що намотана нещільно, з проміжками між витками.

Розрахунок одношарових циліндричних котушок без осердя проводиться за формулою:

$$L = \frac{D^2 \times n^2}{45D + 100l}, \quad (3.3)$$

де L – індуктивність котушки, мкГн ;

D – діаметр котушки, см ;

l – довжина намотки котушки, см ;

n – кількість витків котушки.

При розрахунку котушки можливі два випадки:

а) за заданими геометричними розмірами потрібно визначити індуктивність котушки;

б) за відомою індуктивністю визначити кількість витків та діаметр проводу котушки.

У першому випадку всі вихідні дані, що входять до формули, відомі, і розрахунок не викликає ніяких труднощів.

Приклад 1. Визначимо індуктивність котушки, що зображена на рис. 3.2, якщо кількість витків $n = 20$, діаметр котушки $D = 1,8 \text{ см}$, довжина намотки $l = 2 \text{ см}$. Для цього підставимо у формулу всі необхідні величини:

$$L = \frac{1,8^2 \cdot 20^2}{45 \cdot 1,8 + 100 \cdot 2} \approx 4,6 \text{ (мкГн)}.$$

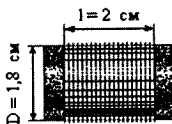


Рисунок 3.2 – Геометричні розміри котушки індуктивності

В другому випадку відомі діаметр котушки і довжина намотки, яка, в свою чергу, залежить від кількості витків і діаметра проводу. Тому розрахунок рекомендується проводити у такій послідовності. Виходячи з конструктивних міркувань, визначають розміри котушки, діаметр і довжину намотки, а потім розраховують кількість витків за формулою:

$$n = \frac{\sqrt{5 \cdot L \cdot (9 \cdot D + 20 \cdot l)}}{D}. \quad (3.4)$$

Після того, як буде знайдена кількість витків, визначають діаметр проводу з ізоляцією за формулою:

$$d = \frac{l}{n}, \quad (3.5)$$

де d – діаметр проводу;

l – довжина намотки;

n – кількість витків.

Приклад 2. Потрібно виготовити котушку діаметром 1 см при довжині намотки 2 см, що має індуктивність 0,8 мкГн. Намотка рядкова виток до витка.

Підставивши до останньої формули задані величини, одержимо:

$$n = \frac{\sqrt{5 \cdot 0,8(9 \cdot 1 + 20 \cdot 2)}}{1} = 14 \text{ витків.}$$

Діаметр проводу $d = 20/14 = 1,43$ мм.

Якщо цю котушку намотувати проводом меншого діаметра, то потрібно отримані розрахунковим шляхом 14 витків розмістити по всій довжині котушки (20 мм) з рівними проміжками між витками, тобто з кроком намотки. Індуктивність даної котушки буде на 1–2% менша за номінальну, що слід враховувати при виготовленні таких котушок. При намотуванні (за необхідності) більш товстим проводом, ніж 1,43 мм, слід виконати новий розрахунок, збільшивши діаметр або довжину намотки котушки. Можливо, також доведеться збільшити і діаметр, і довжину намотки одночасно, поки не будуть отримані потрібні габарити котушки, що відповідають заданій індуктивності.

Слід відмітити, що за наведеними вище формулами рекомендується розраховувати такі котушки, у яких довжина намотки l дорівнює або більша за половину діаметра. Якщо ж довжина намотки менша за половину діаметра $D/2$, то більш точні результати можна отримати за формулами:

$$L = \frac{D^2 \cdot n^2}{10 \cdot (4 \cdot D + 11 \cdot l)} \quad \text{і} \quad n = \frac{\sqrt{10 \cdot L(4 \cdot D + 11 \cdot l)}}{D}, \quad (3.6)$$

Еквівалентна схема котушки індуктивності

На рис. 3.3 подано еквівалентну схему для котушок індуктивності. Тут L – індуктивність котушки, Гн, R – сума опорів втрат в каркасі та осерді, Ом, R_s – опір проводу котушки, Ом, і C_p – паразитна ємність, Ф, обумовлена зовнішніми виводами котушки та її конструктивними особливостями.

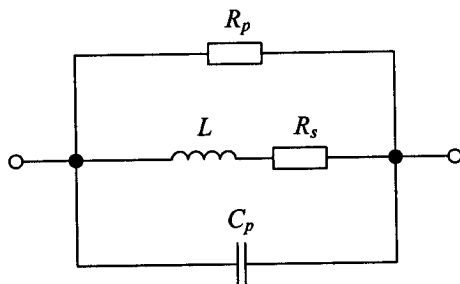


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема котушки індуктивності

На частоті f [Гц] імпеданс котушки індуктивності обчислюють за формулою:

$$|Z| = \frac{V}{I} = \left[(j2\pi fL + R_s)^{-1} + 1/R_p + j2\pi fC_p \right]^{-1}, [Ом]. \quad (3.7)$$

Сімейство типових кривих залежності імпедансу котушок індуктивності від частоти наведено на рис. 3.4.

У стандартних високочастотних дроселів R_s знаходиться в межах $0,2 \text{ Ом} < R_s < 5 \text{ Ом}$, а паразитна ємність – у межах $1,5 \text{ нФ} < C_p < 4 \text{ нФ}$. Котушки індуктивності для поверхневого монтажу мають $R_s < 10 \text{ Ом}$ і C_p від 0,2 до 20 нФ.

Порядок виконання роботи

1. Визначити тип та основні параметри котушок індуктивності, виданих викладачем. Дані занести в табл. 3.2. Розрахувати добротність котушок на частотах 1 кГц та 1 МГц.

2. Виміряти за допомогою LC-метра значення індуктивностей дроселів в кількості 100 штук, виданих викладачем. Дані занести в табл. 3.3.

3. Побудувати гістограму, що відображає кількість дроселів та відповідні їм значення індуктивності, і показати на ній відхилення індуктивності дроселів від номінальних. Зробити висновок, чи знаходяться виміряні значення в межах допуску.

Таблиця 3.2 – Тип та основні параметри котушок індуктивності

№ котушки	Тип котушок індуктивності	Індуктивність, Гн	Опір, Ом	Добротність

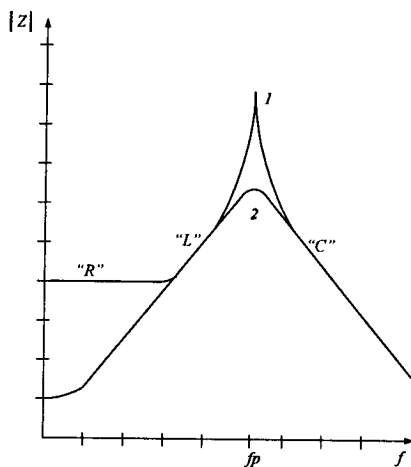


Рисунок 3.4 – Частотні залежності імпедансу котушок індуктивності 1 – для високочастотної котушки, 2 – для низькочастотної котушки

Таблиця 3.3 – Результати вимірювань

№ вимірювання	Індуктивність, Гн	Опір, Ом	№ вимірювання	Індуктивність, Гн	Опір, Ом

4. Розрахувати параметри одношарової котушки індуктивності без осердя і зобразити її ескіз за заданими варіантами (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Варіанти завдань для розрахунків

Варіант	Індуктивність, мкГн
1	10
2	100
3	50
4	70
5	40

5. Провести комп'ютерне моделювання в Electronic Workbench 5.12:

а) скласти схеми паралельного та послідовного коливальних контурів, які подано на рис. 3.5 та 3.6;

б) визначити параметри елементів схем, якщо частота резонансу 100 кГц, значення індуктивності вказані в табл. 3.4. Добротність $Q = 100$;

в) побудувати амплітудно-частотні характеристики даних схем.

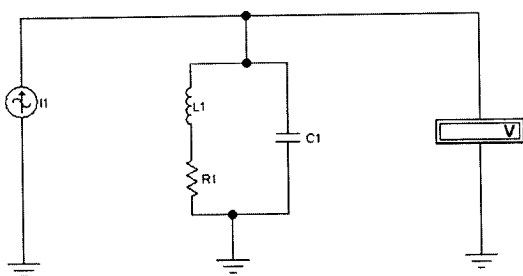


Рисунок 3.5 – Схема паралельного коливального контуру в Electronic Workbench

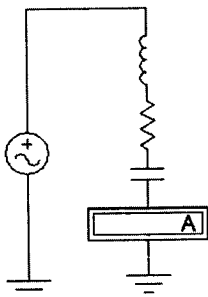


Рисунок 3.6 – Схема послідовного коливального контуру в Electronic Workbench

6. Оформити звіт та зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте означення котушки індуктивності.
2. Якими основними параметрами характеризуються котушки індуктивності?
3. Наведіть умовні графічні позначення котушок індуктивності.
4. Зобразіть еквівалентну схему котушки індуктивності та поясніть призначення кожного елемента.
5. Поясніть характер залежності імпедансу котушок індуктивності від частоти.
6. Наведіть методику розрахунку котушки індуктивності.
7. Що таке добротність котушки індуктивності?
8. Охарактеризуйте різні типи намоток котушок індуктивності.
9. Як впливає осердя на основні параметри котушки індуктивності.
10. Що таке ТКІ?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи: вивчити призначення, класифікацію, систему маркування, умовні графічні позначення трансформаторів, їх основні параметри та характеристики, еквівалентні схеми та типові схеми включення, освоїти методику розрахунку.

Теоретичні відомості

Означення

Трансформатор – електричний прилад змінного струму, що призначений для змінення напруги, узгодження опорів електричних кіл, розділення кіл джерела і навантаження за постійним струмом, а також для зміни стану кола відносно корпусу.

Класифікація трансформаторів

Трансформатори можна класифікувати за різними ознаками.

За функціональним призначенням трансформатори поділяються на

- трансформатори живлення;
- узгоджувальні трансформатори (або сигнальні);
- імпульсні трансформатори.

Трансформатори живлення застосовуються в блоках живлення радіопристроїв і слугують для отримання напруг, необхідних для нормально-го функціонування апаратури.

Узгоджувальні трансформатори призначені для зміни рівня напруг (струмів) електричних сигналів, що несуть корисну інформацію. Вони дозволяють узгодити джерело сигналів з навантаженням при мінімальному спотворенні сигналу. Разом з активними елементами вони входять до складу пристроїв, які підсилюють електричні коливання, що займають широкую смугу частот.

Розрізняють вхідні, міжкаскадні та вихідні узгоджувальні трансформатори.

Вхідні трансформатори включаються на вході підсилювального пристрою і узгоджують вихідний опір джерела сигналів, наприклад мікрофона, з вхідним опором підсилювача. Оскільки рівень вхідних сигналів порівняно невеликий, то ці трансформатори повинні бути добре захищені від впливу зовнішніх магнітних полів.

Міжкаскадні трансформатори узгоджують вихідний опір попереднього каскаду з вхідним опором наступного.

Вихідні трансформатори узгоджують вихідний опір підсилювача з зовнішнім навантаженням. Ці трансформатори повинні забезпечувати передачу великої потужності від підсилювача до навантаження.

Імпульсні трансформатори призначені для формування і трансформації імпульсів малої тривалості. Основною вимогою, що висувається до імпульсних трансформаторів, є вимога малих спотворень форми трансформованого імпульсу.

За потужністю трансформатори поділяються на малопотужні (вихідна потужність до 1 $\kappa\text{Вт}$) і потужні (вихідна потужність понад 1 $\kappa\text{Вт}$).

За напругою трансформатори поділяються на низьковольтні (напруга на обмотках не перевищує 1000 В) і високовольтні.

За робочою частотою трансформатори поділяються на трансформатори:

- пониженої частоти (менше 50 Гц);
- промислової частоти (50 Гц);
- підвищеної промислової частоти (400, 1000, 2000 Гц);
- підвищеної частоти (до 10000 Гц);
- високої частоти (понад 10000 Гц).

За кількістю фаз перетворюваної напруги трансформатори поділяються на однофазні та трифазні.

За кількістю обмоток трансформатори поділяються на двообмоткові та багатообмоткові.

За коефіцієнтом трансформації трансформатори поділяються на підвищувальні та понижувальні.

За видом зв'язку між обмотками розрізняють трансформатори

- з електромагнітним зв'язком (з ізольованими обмотками);
- з електромагнітним і електричним зв'язком (із зв'язаними обмотками).

Незважаючи на відмінність функцій трансформаторів, основні фізичні процеси, що протікають в них, одні й ті ж. Тому трансформатори різного схемного призначення мають однотипну конструкцію. Основною частиною трансформатора є магнітопровід із магнітом'якого матеріалу з розміщеною на ньому обмоткою.

За способом виготовлення магнітопровода розрізняють:

- пластинчасті (рис. 4.1):
 - типу ШІ;
 - типу ШПІ;
 - типу ПН;
 - типу ПУ;
- кручені або стрічкові (рис. 4.2):
 - броньові;
 - кільцеві;
- Ш-подібні магнітопроводи з феритів (рис. 4.3).

Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопроводи трансформаторів набираються з штампованих пластин, навиваються з смужок електротехнічної сталі чи залізо-нікелевих сплавів, а також виготовляються з магнітом'яких феритів.

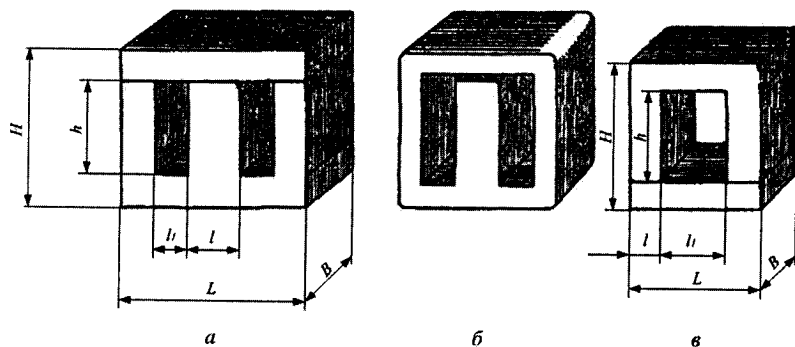


Рисунок 4.1 – Пластинчасті магнітопроводи: *a* – типу ШІ; *б* – типу ШП; *в* – типу ПН та ПУ (ПН – типу П з нормальною висотою стрижня, ПУ – типу П з подовженою висотою стрижня)

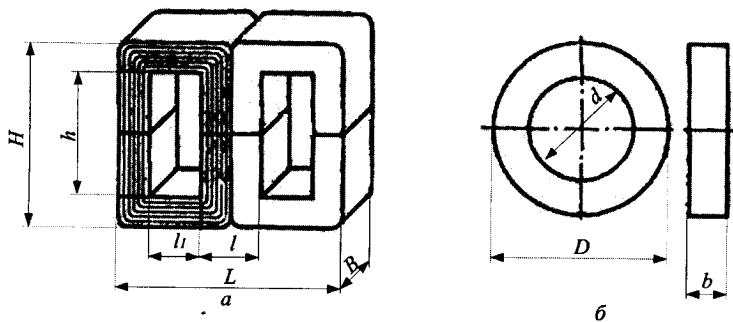


Рисунок 4.2 – Стрічкові (кручені) магнітопроводи: *a* – броневої; *б* – кільцеві

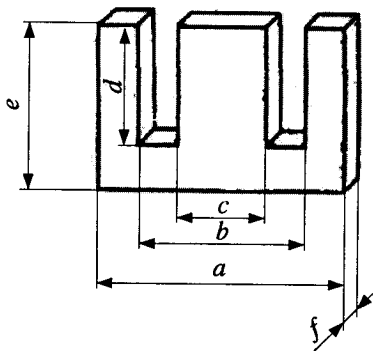


Рисунок 4.3 – Ш-подібний магнітопровід з феритів

Кручені магнітопроводи характеризуються можливістю використання матеріалів різної товщини, що дозволяє застосовувати їх для трансформаторів при підвищених частотах; кращим, ніж у пластинчастих магнітопроводах, використанням магнітних властивостей матеріалів; деякими підвищеними втратами; наявністю повітряного зазору в стиках; меншою вартістю виготовлення.

Перевагою магнітопроводів, що набираються із пластин, є можливість виготовлення їх із будь-яких, навіть досить крихких, матеріалів. Для зменшення втрат на вихрові струми пластини ізолюють одна від одної. Ізоляцією слугує шар оксиду, який створюється при випалюванні пластин.

Типорозмір магнітопроводів позначається літерами і цифрами, які виражають добуток $l \cdot B$, наприклад ШП7×15.

За конструкцією магнітопроводи поділяють на броньові (Ш-подібні), стрижневі (П-подібні) і кільцеві (тороїдальні). В *броньових магнітопроводах* обмотки розташовуються на центральному стрижні, що спрощує конструкцію, дозволяє краще використовувати вікно і частково створює захист обмоток від механічних взаємодій. Недоліком трансформаторів з броньовим магнітопроводом є підвищена чутливість до впливу магнітних полів низької частоти. Це обмежує застосування броньових магнітопроводів для вхідних трансформаторів.

В *стрижневих магнітопроводах* обмотки розміщуються на двох стрижнях. При цьому зменшується товщина намотки і, відповідно, індуктивність розсіювання трансформатора. Крім того, зменшуються витрати проводу і збільшується поверхня охолодження, що важливо для трансформаторів підвищеної потужності.

Кільцеві магнітопроводи дозволяють найбільш повно використовувати магнітні властивості матеріалу, зменшити зовнішнє магнітне поле трансформатора, однак застосовуються порівняно рідко внаслідок важкості намотування котушок.

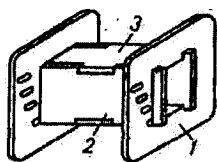
Каркас і обмотки трансформаторів

Каркаси, на які намотуються обмотки трансформаторів, пресують із пластмаси, склеюють із електрокартону або складають із окремих деталей, виготовлених із гетинаксу, пресшпану, текстоліту або електрокартону. Іноді застосовують безкаркасну обмотку, яку намотують на гільзу (рис. 4.4).

Обмотки трансформаторів поділяються на *циліндричні* і *гелетні* (рис. 4.5).

Циліндрична обмотка простіша у виготовленні. При намотуванні на каркас провід може вкладатися рядами (шарами) або хаотично (внавал). При підвищених потребах до електричної стійкості обмотки, наприклад в мережевих трансформаторах живлення, застосовують рядкову намотку і міжшарову ізоляцію (між кожним рядом або після декількох рядів). Як та-

ку ізоляцію залежно від необхідної електричної стійкості, теплостійкості і допустимої вартості застосовують стрічки із конденсаторного паперу (товщиною 0,006...0,2 мм), лавсану або фторопласту.



1 — щічки
2,3 — пластини

Рисунок 4.4 – Каркас котушки трансформатора у складеному вигляді

Міжобмоткова ізоляція виконується так само, як і міжшарова, але складається з декількох шарів стрічки (залежно від напруги між обмотками). В сигнальних трансформаторах для апаратури на транзисторах можна застосовувати намотування внавал без міжшарової ізоляції, при цьому власна ємність знижується. Для зменшення власної ємності обмотки секціонують, намотуючи їх на каркас з перегородками.

Якщо обмотка повинна бути симетричною, її розділяють на дві рівні сторони в вигляді окремих секцій. Спільною (середньою) точкою є з'єднання кінців або початків половин обмоток. При малих напругах на обмотці можна виконувати намотування двома проводами, складеними разом.

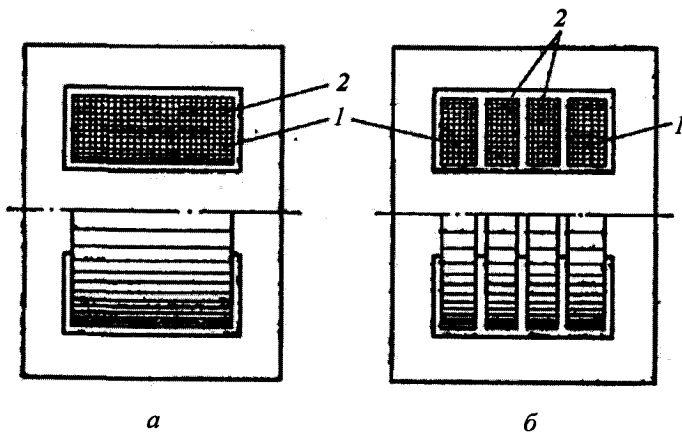


Рисунок 4.5 – Обмотки трансформаторів: а – циліндрична; б – галетна (1 – первинна, 2 – вторинна)

Галетна обмотка складніша у виготовленні, але на відміну від циліндричної відрізняється більшою електричною стійкістю, меншою власною

емністю і індуктивністю розсіювання та допускає ремонт шляхом заміни галет. Для намотування використовують спеціальні оправки, що складаються з гільзи і двох щіток з радіальними прорізами. Перед намотуванням в прорізи вкладаються відрізки жорстких ниток, якими скріплюють витки після намотування галети.

Різновидність галети – обмотка, виготовлена друкованим способом із фольгованого ізоляційного матеріалу. Друковані галети складають в спільний пакет і з'єднують між собою. Такі обмотки застосовують для трансформаторів дуже малої потужності, особливо при невеликих струмах.

Для обмоток трансформаторів застосовують мідні обмоткові проводи. Діаметр проводу визначає густину струму та опір обмотки. Дуже тонкі проводи (з діаметром менше 0,07 мм) не такі надійні, значно дорожчі і ускладнюють намотування.

Для захисту трансформаторів від дії навколишнього середовища їх обмотки просочують ізоляційними матеріалами, а складені трансформатори обволікають компаундами або герметизують.

Умовні графічні позначення:

За ГОСТ 2.723-68 в схемах електричних принципів використовуються умовні графічні позначення трансформаторів, зображені на рис. 4.6 – 4.8.

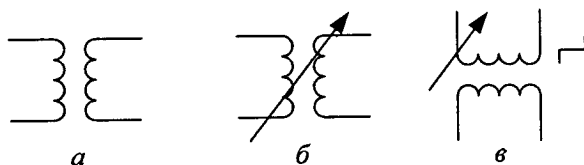


Рисунок 4.6 – Трансформатор без магнітопроводу: *a* – з постійним зв'язком; *б* – із змінним зв'язком; *в* – трансформатор із ступінчастим регулюванням

Основні параметри трансформаторів живлення

- *Номинальна потужність* – сума потужностей вторинних обмоток трансформатора, в якому потужність кожної обмотки визначається добутком номінального струму на номінальну напругу.
- *Струм первинної обмотки* – значення струму при номінальній вихідній потужності.
- *Напруга вторинних обмоток* – значення напруги в режимі холостого ходу (струм навантаження дорівнює нулю).
- *Номинальний струм вторинних обмоток* – значення струму при номінальній вихідній потужності.

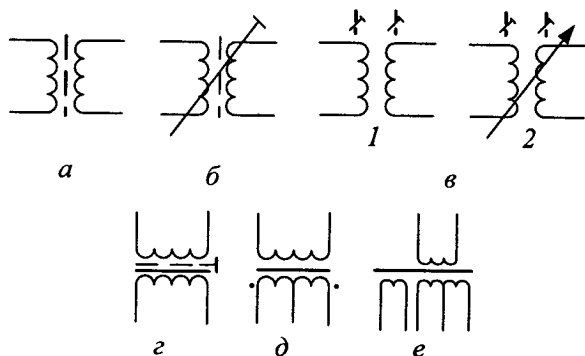


Рисунок 4.7 – Трансформатор з магнітопроводом: а – трансформатор з магнітодіелектричним магнітопроводом; б – трансформатор підстроюваний загальним магнітодіелектричним магнітопроводом; в – трансформатор, кожна із обмоток якого підстроюється магнітодіелектричним магнітопроводом (1 – із постійним зв’язком; 2 – із змінним зв’язком); г – трансформатор однофазний із феромагнітним магнітопроводом і екраном між обмотками; д – трансформатор диференціальний з відведенням від середньої точки; е – трансформатор однофазний з феромагнітним магнітопроводом триобмотковий

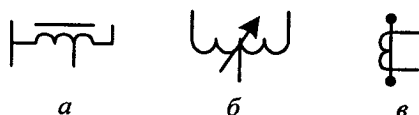


Рисунок 4.8 – Автотрансформатор: а – автотрансформатор однофазний із феромагнітним осердям; б – автотрансформатор однофазний із регулюванням напруги; в – автотрансформатор однофазний із третьою обмоткою і феромагнітним магнітопроводом

– Коефіцієнт трансформації – відношення кількості витків вторинної до кількості витків первинної обмотки або відношення напруги на вторинній обмотці до напруги на первинній обмотці.

– ККД трансформатора:

$$\eta = P_{ном} / (P_{ном} + P_{м} + P_{об}), \quad (4.1)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора;

$P_{м}$ – потужність втрат в магнітопроводі;

$P_{об}$ – потужність втрат в обмотках.

– *Спад напруги δU* – виражається у відносних одиницях, показує ступінь зміни напруги вторинної обмотки при повній зміні струму навантаження від нуля до номінального значення. Можна показати, що $\delta U = P_{об}/P_{ном}$. Відповідно для підвищення стабільності напруги вторинної обмотки необхідно зменшити втрати в обмотках шляхом зниження опору в обмотках.

– *Маса і габаритні розміри трансформатора* залежать від номінальної потужності, напруги, ККД і допустимої температури перегріву трансформатора.

Основні параметри сигнальних трансформаторів

– *Активний опір обмоток r* .
 – *Номінальний опір навантаження*.
 – *Індуктивність первинної обмотки L_1* .
 – *Індуктивність розсіювання L_s* – паразитний параметр, що відображає неідеальність трансформатора. $L_s = (1 - K_s) L_1$, де K_s – коефіцієнт зв'язку ($K_s = L_m / \sqrt{L_1 L_2}$, де L_m – взаємна індуктивність обмоток трансформатора).

– *Власна ємність $C_{тр}$* .
 – *Коефіцієнт трансформації* – відношення кількості витків вторинної і первинної обмоток. Його значення вибирається з умови узгодження опорів джерела сигналу і навантаження.

– *Стала часу первинної обмотки трансформатора* – стала часу кола первинної обмотки, що визначається відношенням L_1/r_1 . Стала часу трансформатора залежить від розмірів магнітопроводу і обмоток, а також від властивостей матеріалу магнітопроводу і дротів.

– *Критична потужність трансформатора* – потужність, при якій внесені трансформатором нелінійні спотворення дорівнюють максимально допустимим.

– *Нелінійні спотворення* – вносяться трансформатором і обумовлені нелінійністю характеристики намагнічування магнітопроводу в ряді випадків нестационарними процесами при відсіканні струму в обмотках. Кількісно нелінійні спотворення оцінюються коефіцієнтом нелінійних спотворень, що визначається як відношення середньоквадратичної суми спектральних компонентів вихідного сигналу, що відсутні в спектрі вхідного сигналу, до середньоквадратичної суми спектральних компонентів вхідного сигналу

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

Величини L_1 , L_s , C_{mp} і r разом з опором навантаження визначають частотні спотворення каскаду з трансформатором. Індуктивність L_1 залежить від постійної і змінної складових струмів в обмотках, які впливають на рівень нелінійних спотворень. Щоб частотні спотворення не перевищували допустимих, значення L_1 повинно бути досить великим, а L_s і C_{mp} – досить малими.

Еквівалентна схема трансформаторів

На рис. 4.9 подано еквівалентну схему трансформатора. Первинна обмотка має індуктивність L_1 (Гн), опір R_{s1} (Ом) і паразитну ємність C_{p1} (Ф), вторинна обмотка – відповідно L_2 , R_{s2} і C_{p2} . Обмотки зв'язані взаємною індуктивністю L_m і міжобмотковою ємністю C_m .

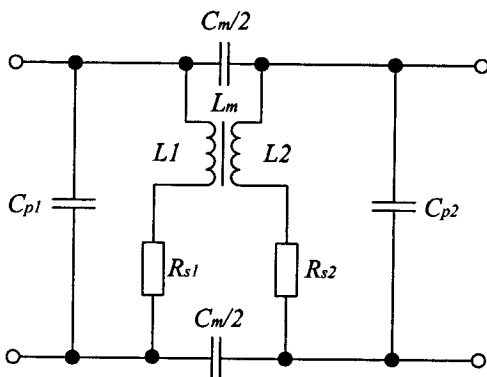


Рисунок 4.9 – Еквівалентна схема трансформатора

У стандартних трансформаторів міжобмоткова ємність знаходиться у межах $10 \text{ нФ} < C_m < 50 \text{ нФ}$, тоді як у трансформаторів з розділеним каркасом обмотки (див. рис. 4.1, а) C_m зменшується до $\approx 5 \text{ нФ}$, а екранування трансформаторів електростатичними екранами навколо обмоток може ще знизити C_m (до $\approx 0,001 \text{ нФ}$) при відповідному підключенні виводів і приєднанні екранів.

Розрахунок тороїдального трансформатора

Розрахунок тороїдального трансформатора розглянемо на прикладі.

Дано: напруга живлення – $U_c = 220 \text{ В}$;

вихідна напруга – $U_{\text{вих}} = 15 \text{ В}$;

струм навантаження – $I_n = 3 \text{ А}$.

1. Визначають потужність вторинної обмотки:

$$P = U_{\text{вих}} I_n, \quad (4.2)$$

$$P = 15 \cdot 3 = 45 \text{ Вт.}$$

2. Визначають габаритну потужність трансформатора:

$$P_r = \frac{P}{\eta}, \quad (4.3)$$

$$P_r = 45/0,92 = 48,9 \text{ Вт.}$$

Величину ККД та інші необхідні для розрахунку дані вибирають з табл. 4.1 із потрібної графі ряду габаритних потужностей.

Таблиця 4.1 – Дані для розрахунку тороїдальних трансформаторів

$P_r, \text{ Вт}$	ω_1	ω_2	$S, \text{ см}^2$	$\Delta, \text{ А/мм}^2$	$h, \%$
До 10	$\frac{41}{S}$	$\frac{38}{S}$	$\sqrt{P_r}$	4,5	0,8
10 – 30	$\frac{36}{S}$	$\frac{32}{S}$	$\frac{\sqrt{P_r}}{1,1}$	4	0,9
30 – 50	$\frac{33,3}{S}$	$\frac{42}{S}$	$\frac{\sqrt{P_r}}{1,2}$	3,5	0,92
50 – 120	$\frac{32}{S}$	$\frac{28}{S}$	$\frac{\sqrt{P_r}}{1,25}$	3	0,95

Примітка. P_r – габаритна потужність трансформатора, ω_1 – кількість витків на вольт для сталі Е310, Е320, Е330, ω_2 – кількість витків на вольт для сталі Е340, Е350, Е360, S – площа перерізу осердя, Δ – допустима густина струму в обмотках, h – ККД

3. Знаходять площу перерізу осердя:

$$S_{\text{розр}} = \frac{\sqrt{P_r}}{1,2}, \quad (4.4)$$

$$S_{\text{розр}} = \frac{\sqrt{48,9}}{1,2} = 5,8 \text{ см}^2.$$

4. Підбирають розміри осердя D , d і h (рис. 4.10) з табл. 4.2 (найближчий стандартний тип осердя – ОЛ50/80-40) та визначають для них площу:

$$S = \frac{(D-d)h}{2}, \quad (4.5)$$

$$S = (8-5) \cdot \frac{4}{2} = 6 \text{ см}^2 \text{ (не менше розрахункової).}$$

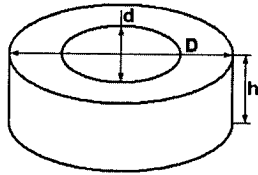


Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд тороїдального осердя типу ОЛd/D-h

Таблиця 4.2 – Типи осердь для трансформаторів

Найменування	h , мм	d , мм	D , мм	Маса, кг
ОЛ40/64-20	20	40	64	0,285
ОЛ40/64-25	25	40	64	0,356
ОЛ40/64-32	32	40	64	0,456
ОЛ40/64-40	40	40	64	0,57
ОЛ50/80-25	25	50	80	0,557
ОЛ50/80-32	32	50	80	0,714
ОЛ50/80-40	40	50	80	0,89
ОЛ50/80-50	50	50	80	1,113
ОЛ64/100-32	32	64	100	1,08
ОЛ64/100-40	40	64	100	1,35
ОЛ64/100-50	50	64	100	1,69
ОЛ64/100-64	64	64	100	2,16
ОЛ80/128-40	40	80	128	2,28
ОЛ80/128-50	50	80	128	2,85
ОЛ80/128-64	64	80	128	3,65
ОЛ80/128-80	80	80	128	4,56

5. При визначенні внутрішнього діаметра повинна виконуватись умова $d \geq d'$:

$$d' = \sqrt{2,4 \cdot S}, \quad (4.6)$$

$$d' = \sqrt{2,4 \cdot S} = \sqrt{2,4 \cdot 6} = 3,8 \text{ см, тобто } 5 > 3,8.$$

6. Припустимо, вибране осердя із сталі Е320, тоді кількість витків на вольт визначають за формулою:

$$\omega_1 = \frac{33,3}{S}, \quad (4.7)$$

$$\omega_1 = \frac{33,3}{6} = 5,55 \text{ витка на вольт.}$$

7. Знаходять розрахункову кількість витків первинної та вторинної обмоток:

$$W_1 = \omega_1 \cdot U_c, \quad (4.8)$$

$$W_1 = 5,55 \cdot 220 = 1221 \text{ виток,}$$

$$W_2 = \omega_1 \cdot U_n, \quad (4.9)$$

$$W_2 = 5,55 \cdot 15 = 83 \text{ витки.}$$

Оскільки в тороїдальних трансформаторах магнітний потік розсіювання дуже малий, то спад напруги в обмотках визначається лише їх активним опором, внаслідок чого відносна величина спаду напруги в обмотках тороїдального трансформатора значно менша, ніж в трансформаторах стрижневого та броньового типу. Тому для компенсації втрат на опорі вторинної обмотки необхідно збільшити кількість її витків лише на 3%.

$$W_2 = 83 \cdot 1,03 = 85.$$

8. Визначають діаметр проводів первинної обмотки:

$$d_1 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I_1}{\Delta}}, \quad (4.10)$$

де I_1 – струм первинної обмотки трансформатора.
 I_1 – визначається за формулою:

$$I_1 = \frac{1,1 \cdot P_r}{U_c}, \quad (4.11)$$

$$I_1 = 1,1 \cdot \frac{48,9}{220} = 0,24 \text{ А,}$$

$$d_1 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,24}{3,5}} = 0,3 \text{ мм.}$$

Вибирають найближчий діаметр проводу в бік збільшення з табл. 4.3 (0,315 мм).

Таблиця 4.3 – Основні параметри обмоткових проводів круглого перерізу для трансформаторів

Номінальний діаметр проводу за міддю, мм	Переріз проводу за міддю, мм ²	Діаметр проводу з ізоляцією, мм						Опір 1 м проводу при 20 °С, Ом
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛ	ПЭТВ	ПНЭТ	ПЭЛШО	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,3	0,0708	0,34	0,35	0,34	0,34	0,33	0,41	0,248
0,315	0,078	0,35	0,365	0,352	0,36	0,35	0,43	0,225
0,335	0,0885	0,375	0,385	0,375	0,38	0,37	0,45	0,198
0,355	0,099	0,395	0,414	0,395	0,41	0,39	0,47	0,177
0,38	0,1134	0,42	0,44	0,42	0,44	0,42	0,5	0,155
0,4	0,126	0,44	0,46	0,442	0,46	0,44	0,52	0,14
0,425	0,142	0,465	0,485	0,47	0,47	0,46	0,53	0,124
0,45	0,16	0,49	0,51	0,495	0,5	0,5	0,57	0,11
0,475	0,177	0,525	0,545	0,495	0,53	0,51	0,6	0,099
0,5	0,196	0,55	0,57	0,55	0,55	0,53	0,62	0,09
0,53	0,2206	0,58	0,6	0,578	0,6	0,58	0,66	0,0795
0,56	0,247	0,61	0,63	0,61	0,62	0,6	0,68	0,071
0,6	0,283	0,65	0,67	0,65	0,66	0,64	0,72	0,062
0,63	0,313	0,68	0,7	0,68	0,69	0,67	0,75	0,056
0,67	0,352	0,72	0,75	0,72	0,75	0,72	0,8	0,05
0,71	0,398	0,76	0,79	0,77	0,78	0,75	0,82	0,044
0,75	0,441	0,81	0,84	0,81	0,83	0,8	0,87	0,039
0,8	0,503	0,86	0,89	0,86	0,89	0,86	0,95	0,035
0,85	0,567	0,91	0,94	0,91	0,94	0,91	1,0	0,031
0,9	0,636	0,96	0,99	0,96	0,99	0,96	1,05	0,0275
0,93	0,6793	0,99	1,02	0,99	1,02	0,99	1,08	0,0253
0,95	0,712	1,01	1,04	1,02	1,04	1,01	1,1	0,0248
1,0	0,7854	1,07	1,1	1,07	1,11	1,06	1,16	0,0224
1,06	0,884	1,13	1,16	1,14	1,16	1,13	1,21	0,0199
1,08	0,9161	1,16	1,19	1,16	1,19	1,16	1,24	0,0188
1,12	0,9852	1,19	1,22	1,2	1,23	1,2	1,28	0,0178
1,18	1,092	1,26	1,28	1,26	1,26	1,25	1,34	0,0161
1,25	1,2272	1,33	1,35	1,33	1,36	1,33	1,41	0,0143
1,32	1,362	1,4	1,42	1,4	1,42	1,39	1,47	0,0129

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,4	1,5394	1,48	1,51	1,48	1,51	-	1,56	0,0113
1,45	1,6513	1,53	1,56	1,53	1,56	-	1,61	0,0106
1,5	1,7672	1,58	1,61	1,58	1,61	-	1,68	0,0093
1,56	1,9113	1,63	1,67	1,64	1,67	-	1,74	0,00917
1,6	2,01	1,68	1,71	1,68	1,71	-	-	0,0086

9. Визначають діаметр проводів вторинної обмотки:

$$d_2 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I_n}{\Delta}}, \quad (4.12)$$

$$d_1 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{3}{3,5}} = 1,05 \text{ мм.}$$

Вибирають найближчий діаметр проводу в бік збільшення з табл. 4.3 (1,06 мм).

Отже, розрахунок трансформатора виконано.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти опір та індуктивність обмоток трансформатора, виданого викладачем, і занести результати в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати вимірювань

№ обмотки	Опір, Ом	Індуктивність, Гн

2. Зобразити електричну схему трансформатора.
3. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора за виміряними значеннями індуктивностей обмоток.
4. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора за значеннями напруг на обмотках на різних частотах. Дані занести в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати вимірювань

Напряга первинної обмотки, В	Напряга вторинної обмотки, В	Частота, Гц	Коефіцієнт трансформації

5. Побудувати графік частотної залежності коефіцієнта частоти трансформації.

6. Розрахувати трансформатор живлення за заданими варіантами (табл. 4.6).
7. Провести комп'ютерне моделювання трансформатора в Electronic Workbench 5.12. Визначити напругу на виході трансформатора, якщо відома напруга на його вході. Розрахувати коефіцієнт трансформації.

Таблиця 4.6 – Варіанти завдань для розрахунків

Номер варіанта	Напруга в мережі, V	Вихідна напруга, V	Струм навантаження, A
1	220	12	5
2	220	9	3
3	220	5	1
4	220	24	5
5	220	3	10

Контрольні запитання

1. Дайте означення трансформатора.
2. Наведіть класифікацію трансформаторів.
3. Якими основними параметрами характеризуються силові трансформатори?
4. Наведіть умовні графічні позначення трансформаторів.
5. Зобразіть еквівалентну схему трансформатора та поясніть призначення кожного елемента.
6. Які матеріали використовуються для виготовлення магнітопроводу трансформаторів?
7. Наведіть методику розрахунку тороїдального трансформатора.
8. З яких конструктивних елементів складається трансформатор?
9. Як визначається коефіцієнт нелінійних спотворень?
10. Що використовують для захисту трансформаторів від дії навколишнього середовища?

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

Мета роботи: вивчити призначення, класифікацію, систему маркування, умовні графічні позначення напівпровідникових діодів, їх основні параметри та характеристики, типові схеми включення.

Теоретичні відомості

Означення

Напівпровідниковий діод (diode) – це напівпровідниковий прилад з одним випрямним переходом (*junction*) і двома зовнішніми виводами. Як випрямний перехід може бути електронно-дірковий перехід, гетероперехід або контакт метал – напівпровідник.

Класифікація діодів

Напівпровідникові діоди класифікують за такими ознаками:

- за призначенням: випрямні, високочастотні (універсальні), імпульсні, стабілітрони, варикапи, тунельні, обернені, світлодіоди, фотодіоди, НВЧ-діоди та ін.;

- за матеріалом: германієві, кремнієві, арсенід-галієві, фосфід індієві та ін.;

- за методом виготовлення переходу: сплавні, дифузійні, планарні, точкові, діоди Шотткі і ін.;

- за фізичними процесами, на використанні яких базується робота діода: тунельні, лавинно-пролітні, фотодіоди, світлодіоди, діоди Ганна і ін.

Умовні графічні позначення

Умовні графічні позначення діодів на схемах електричних принципових виконуються згідно з ГОСТ 2.730-73 (рис. 5.1).

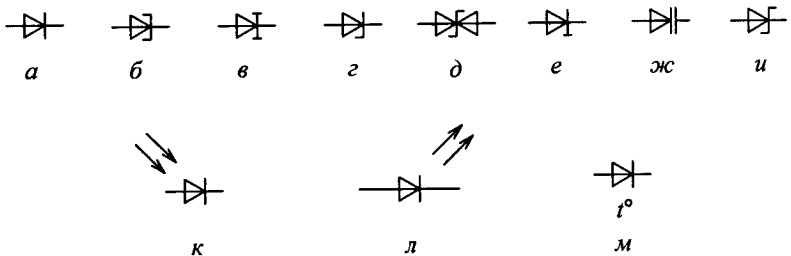


Рисунок 5.1 – Умовні графічні позначення: а – діод випрямний; б – тунельний діод; в – обернений діод; г – стабілітрон односторонній; д – стабілітрон двосторонній; е – обмежувальний діод; ж – варикап; и – діод Шотткі; к – фотодіод; л – світлодіод; м – діод теплоелектричний

Маркування напівпровідникових діодів

Система позначень сучасних напівпровідникових діодів встановлена промисловим стандартом ОСТ 11 336.919-81. В основу системи покладено семизнаковий буквенно-цифровий код.

Перший елемент коду позначає напівпровідниковий матеріал, на основі якого виготовлено прилад: германій або його сполуки – Г; кремній або його сполуки – К; сполуки галію – А; сполуки індію – И. Для приладів, які використовуються в пристроях спеціального призначення, встановлені такі позначення матеріалу: германій або його сполуки – 1; кремній або його сполуки – 2; сполуки галію – 3; сполуки індію – 4.

Другий елемент – позначає підклас або групу приладу: діоди випрямні, імпульсні, діодні перетворювачі (магнітодіоди, термодіоди) – Д; випрямні стовпи та блоки – Ц; варикапи – В; тунельні діоди та зворотні – И; надвисокочастотні діоди – А; стабілізатори напруги напівпровідникові (стабілітрони, стабістори, обмежувачі) – С; генератори шуму – Г; випромінювальні оптоелектронні прилади – Л. Для позначення наборів в спільному корпусі однотипних приладів, не з'єднаних електрично або з'єднаних однойменними виводами, після позначення типу приладу використовується буква С.

Третій елемент позначення приладів – цифра, визначає призначення приладу (параметри або принцип дії) – підклас (табл. 5.1).

Четвертий елемент – двознакове число позначає порядковий номер розробки приладу (числа від 01 до 99).

Таблиця 5.1 – Третій елемент позначення напівпровідникових діодів

Підклас діодів	Позначення
Діоди випрямні	
- із середнім значенням прямого струму не більше 0,3 А	1
- із середнім значенням прямого струму більше 0,3 А, але не більше 10 А	2
Діодні перетворювачі (магнітопроводи, термодіоди та ін.)	3
Імпульсні діоди	
- з часом відновлення зворотного опору більшим, ніж 500 нс	4
- з часом відновлення зворотного опору більшим, ніж 150, але не більше ніж 500 нс	5
- з часом відновлення зворотного опору більшим, ніж 30, але не більше ніж 150 нс	
- з часом відновлення зворотного опору більшим, ніж 5, але не більше ніж 30 нс	
- з часом відновлення зворотного опору більшим, ніж 1, але не більше ніж 5 нс	
- з ефективним часом життя неосновних носіїв заряду 1 нс	

Продовження таблиці 5.1

Варикапи	
- підстроювальні	1
- помножувальні	2
Діоди тунельні і обернені	
- підсилювальні	1
- генераторні	2
- перемикальні	3
- обернені	4
Стабілізатори напруги напівпровідникові	
- з напругою стабілізації менше 10 В і потужністю не більше 0,3 Вт	1
- з напругою стабілізації більше 10 В, але не більше 100 В і потужністю не більше 0,3 Вт	2
- з напругою стабілізації більше 100 В і потужністю не більше 0,3 Вт	3
- з напругою стабілізації менше 10 В і потужністю більше 0,3 Вт, але не більше 5 Вт	4
- з напругою стабілізації більше 10 В, але не більше 100 В і потужністю більше 0,3 Вт, але не більше 5 Вт	5
- з напругою стабілізації більше 100 В і потужністю більше 0,3 Вт, але не більше 5 Вт	6
- з напругою стабілізації менше 10 В і потужністю більше 5 Вт, але не більше 10 Вт	7
- з напругою стабілізації більше 10 В, але не більше 100 В і потужністю більше 5 Вт, але не більше 10 Вт	8
- з напругою стабілізації більше 100 В і потужністю більше 5 Вт, але не більше 10 Вт	9
Генератори шуму	
- низькочастотні	1
- високочастотні	2
Випромінювальні оптоелектронні прилади	
- діоди випромінювальні інфрачервоного діапазону	1
- модулі випромінювальні інфрачервоного діапазону	2
- діоди світловипромінювальні	3

П'ятий елемент – буква російського алфавіту, встановлює класифікацію приладу за параметрами, що виготовлені за єдиною технологією.

Приклади позначень: ГД412А – діод напівпровідниковий універсальний, призначений для пристроїв широкого застосування, германієвий, з часом відновлення зворотного опору більше 500 нс (цифра 4), номер розробки 12, група А; КС168А – стабілітрон напівпровідниковий, призначений для пристроїв широкого застосування, кремнієвий, потужністю не бі-

льше 0,3 Вт та напругою не більше 10 В (цифра 1), з напругою стабілізації 6,8 В, модифікація А; КДС523А – набір напівпровідникових приладів, дискретним елементом якого є імпульсний діод, призначений для пристроїв широкого застосування, кремнієвий, з часом відновлення зворотного опору більше 150 нс, але не більше 500 нс (цифра 5), номер розробки 23, група А.

Для напівпровідникових діодів з малими розмірами корпусу використовується кольорове маркування.

Основні параметри діодів

Основні параметри діодів розглянемо на прикладі випрямних діодів та стабілітронів. Для інших діодів основні параметри можна знайти в довідниковій літературі.

Основні параметри випрямних діодів

Випрямними називають діоди, призначені для випрямлення змінної напруги низької частоти (менше 50 кГц).

Основною характеристикою випрямних діодів є вольт-амперна характеристика (ВАХ), що подана на рис. 5.2.

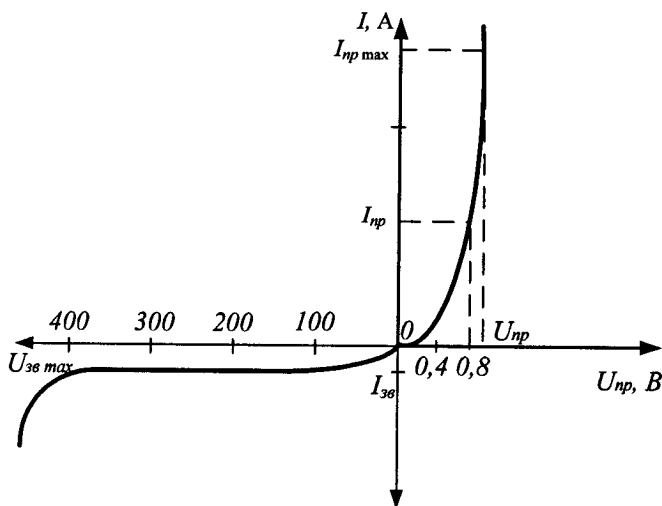


Рисунок 5.2 – Вольт-амперна характеристика випрямного діода

Основними параметрами, що характеризують випрямні діоди, є:

- максимально допустимий постійний прямий струм $I_{пр max}$;
- постійна пряма напруга на діоді при заданому значенні прямого струму $I_{пр}$ ($U_{пр} \approx 0,3...0,7 B$ – для германієвих і $U_{пр} \approx 0,8...1,2 B$ – для кремнієвих діодів);
- максимально допустима постійна зворотна напруга діода $U_{зв max}$;

- постійний зворотний струм $I_{зв}$ при заданій максимально допустимій зворотній напрузі $U_{зв\ max}$ (значення зворотного струму германієвих діодів на два-три порядки більше, ніж у кремнієвих);
- диференційний опір діода;
- максимально допустима середня потужність розсіювання $P_{ср\ max}$;
- робочий діапазон температур (германієві діоди працюють в діапазоні $-60...+70\ ^\circ\text{C}$, кремнієві – в діапазоні $-60...+125\ ^\circ\text{C}$, що пояснюється малими зворотними струмами кремнієвих діодів).

Параметри стабілітронів

Стабілітроном називається напівпровідниковий діод, на зворотній гілці ВАХ якого є ділянка з сильною залежністю струму від напруги (рис. 5.3). Стабілітрони використовуються для стабілізації напруги. Діод, в якому для стабілізації використовується пряма гілка ВАХ, називають стабістором. Напруга стабілізації стабісторів становить від 0,7 В до 1,9 В.

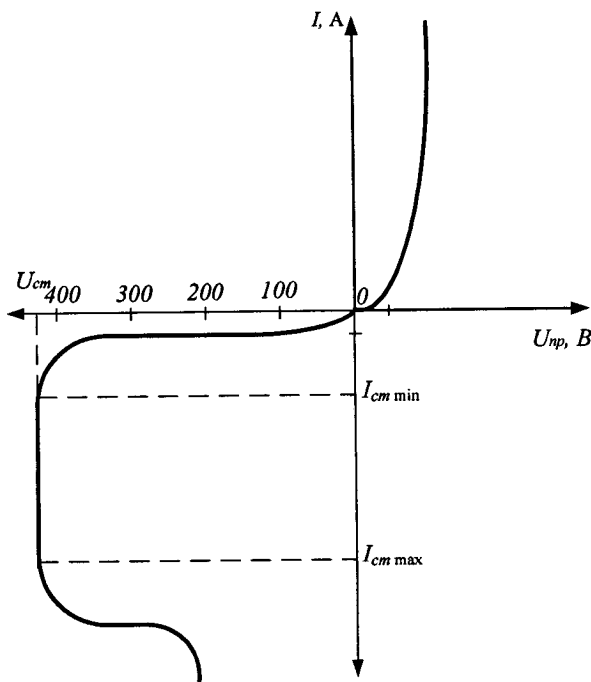


Рисунок 5.3 – Вольт-амперна характеристика стабілітрона

Еквівалентна схема моделі діода

Еквівалентна схема моделі діода подана на рис. 5.4. Джерело струму I моделює ВАХ і описується рівнянням $I = I_0(e^{U/(m\varphi_m)} - 1)$, r_B – опір матеріалу напівпровідника (бази), а ємність C є сумою бар'єрної і дифузійної складових:

$$C = C_\delta + C_\sigma = \frac{C_{\delta 0}}{\left(1 - \frac{U}{\varphi_0}\right)^n} + \frac{\tau}{m\varphi_m}(I + I_0), \quad (5.1)$$

де $C_{\delta 0}$ – величина бар'єрної ємності при $U=0$;

φ_0 – висота потенційного бар'єра;

$0,3 \leq n \leq 0,5$ – коефіцієнт, який для різких p - n переходів дорівнює $1/2$, а для плавних – $1/3$;

m – поправковий коефіцієнт (для германієвих діодів $m=1$, для кремнієвих $m=2$)

τ – час життя неосновних носіїв.

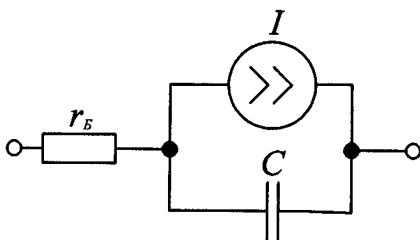


Рисунок 5.4 – Еквівалентна схема p - n переходу діода

Опис лабораторної установки

На рис. 5.5 показано схему для зняття вольт-амперних характеристик діода. За допомогою потенціометрів $R1$ можна змінювати напругу діода. Вимірювальні прилади повинні бути розраховані на відповідні межі вимірюваних величин.

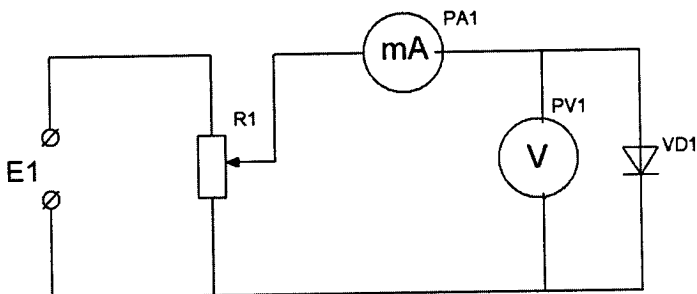


Рисунок 5.5 – Схема для зняття ВАХ діода

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Під'єднати живлення, амперметр та вольтметр відповідно до схеми лабораторної установки.
3. За допомогою проводів під'єднати досліджуваний діод.
4. Зняти ВАХ прямої гілки. Вимірювання провести для різних значень напруги в діапазоні від 0 до 1 В. Отримані дані занести в табл. 5.2.
5. Змінити полярність напруги живлення. Зняти ВАХ зворотної гілки. Вимірювання провести для різних значень напруги в діапазоні від 0 до -30 В. Отримані дані занести в табл. 5.3.
6. За даними табл. 5.2 і 5.3 побудувати вольт-амперні характеристики напівпровідникових діодів.
7. Провести комп'ютерне моделювання в Electronic Workbench 5.12. Скласти схему, подану на рис. 5.5 та зняти вольт-амперні характеристики діода.
8. Оформити звіт та зробити висновки.

Таблиця 5.2

		1	2	3	4	5	6
VD1	U_{np}, B						
	I_{np}, mA						
VD2	U_{np}, B						
	I_{np}, mA						
VD3	U_{np}, B						
	I_{np}, mA						
VD4	U_{np}, B						
	I_{np}, mA						

Таблиця 5.3

		1	2	3	4	5	6
VD1	U_{36}, B						
	I_{36}, mA						
VD2	U_{36}, B						
	I_{36}, mA						
VD3	U_{36}, B						
	I_{36}, mA						
VD4	U_{36}, B						
	I_{36}, mA						

Контрольні запитання

1. Яке призначення напівпровідникових діодів?
2. Які переваги та недоліки напівпровідникових діодів?
3. Як класифікуються напівпровідникові діоди?
4. Як позначаються напівпровідникові діоди?
5. Що означають цифри та букви в позначенні напівпровідникового діоду?
6. Якими параметрами характеризуються випрямні напівпровідникові діоди?
7. Який вигляд має вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода та чим це пояснюється?
8. Як вмикаються напівпровідникові діоди, коли робоча напруга перевищує допустиму зворотну напругу для одного діода?
9. Що таке стабілітрон, які його характеристики та параметри?
10. Який вигляд має еквівалентна схема діода?

ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи: вивчити призначення, класифікацію, систему маркування, умовні графічні позначення, принцип роботи біполярних транзисторів, їх основні параметри та характеристики, типові схеми включення.

Теоретичні відомості

Означення

Біполярний транзистор (bipolar transistor) – це напівпровідниковий прилад з двома взаємодіючими переходами, трьома чи більше выводами, підсилювальні властивості якого обумовлені явищами інжекції і екстракції носіїв заряду. Особливість такого транзистора полягає в тому, що між його електронно-дірковими переходами існує взаємозв'язок – струм одного із переходів може керувати струмом іншого.

Класифікація транзисторів:

- залежно від вихідного матеріалу: германієві, кремнієві та арсенід-галієві;
- за діапазоном робочих частот: транзистори низьких, середніх та високих частот;
- за потужністю: малої, середньої та великої потужності;
- за технологією виготовлення: сплавні; дифузійні; епітаксialьні.

Маркування транзисторів

Складається з 5 елементів:

I-й елемент – визначає матеріал виготовлення:

Г – германій;

К – кремній;

А – арсенід галію.

II-й елемент – визначає підклас приладу: для біполярних транзисторів вказується буква Т;

III-й елемент – визначає призначення приладу: цифри від 1 до 9.

1, 2, 3 – *малопотужні транзистори* ($P < 0,3 \text{ Вт}$)

1 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою не більше 3 МГц;

2 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою більше 3, але менше 30 МГц;

3 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою більше 30 МГц;

4, 5, 6 – *транзистори середньої потужності* ($0,3 < P < 1,5 \text{ Вт}$)

4 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою не більше 3 МГц;

5 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою більше 3, але менше 30 МГц;

6 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою більше 30 МГц;

7, 8, 9 – *транзистори великої потужності* ($P > 1,5 \text{ Вт}$)

7 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою не більше 3 МГц;

8 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою більше 3, але менше 30 МГц;

9 – з граничною частотою коефіцієнта передачі струму чи максимальною робочою частотою більше 30 МГц;

IV-й елемент – двознакове (або трьохзначне) число від 01 до 99 (від 101 до 999), що визначає порядковий номер розробки.

V-й елемент – буква російського алфавіту, яка визначає класифікацію приладів за параметрами.

Умовні графічні позначення

Умовні графічні позначення біполярних транзисторів на схемах електричних принципів виконуються згідно з ГОСТ 2.730-73 (рис. 6.1).

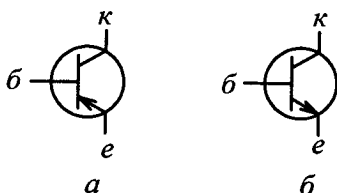


Рисунок 6.1 – Умовне графічне позначення біполярного транзистора:
а – структури *p-n-p*; б – структури *n-p-n*

Схеми включення біполярного транзистора (рис. 6.2)

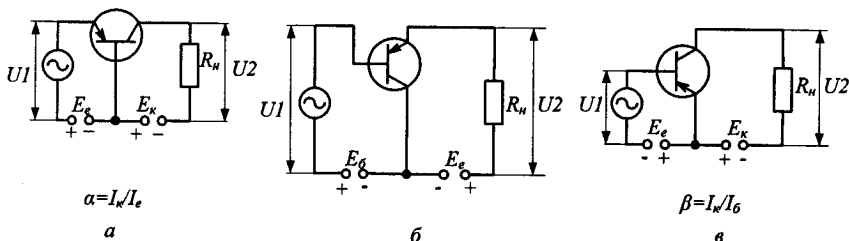


Рисунок 6.2 – Схеми включення БТ: а – зі спільною базою (СБ);
б – зі спільним колектором (СК); в – зі спільним емітером (СЕ)

Параметри біполярних транзисторів

Параметри постійного струму:

1. $I_{кб0}$ – струм через колекторний перехід при заданій зворотній напрузі $U_{кб}$ і розімкнутому виводі емітера;

2. $I_{еб0}$ – зворотний струм емітерного переходу при заданій зворотній напрузі $U_{еб}$ і розімкнутому виводі колектора;

3. $I_{кe0}$ – зворотний струм колекторного переходу при заданій зворотній напрузі і розімкнутому виводі бази;

Малосигнальні параметри:

h – параметри:

1. Вхідний опір транзистора при короткозамкнутому виході ($U_2 = 0$):

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1}; \quad (6.1)$$

2. Коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою при розімкнутому за змінним струмом вході ($I_1 = 0$):

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2}; \quad (6.2)$$

3. Коефіцієнт передачі струму при короткозамкнутому виході ($U_2 = 0$):

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1}; \quad (6.3)$$

Для схеми із СБ $h_{21б} = \frac{I_к}{I_е} = \alpha$, а для схеми із СЕ $h_{21е} = \frac{I_к}{I_б} = \beta$.

4. Вихідна провідність при розімкнутому вході ($I_1 = 0$):

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2}; \quad (6.4)$$

y – параметри:

1. Вхідна провідність при короткозамкнутому виході ($U_2 = 0$):

$$y_{11} = \frac{I_1}{U_1}; \quad (6.5)$$

2. Зворотна взаємна провідність при короткозамкнутому вході ($U_1 = 0$):

$$y_{12} = \frac{I_1}{U_2}; \quad (6.6)$$

3. Пряма взаємна провідність при короткозамкнутому виході:

$$y_{21} = \frac{I_2}{U_1}; \quad (6.7)$$

4. Вихідна провідність при короткозамкнутому вході:

$$y_{22} = \frac{I_2}{U_2}. \quad (6.8)$$

Високочастотні параметри:

1. Гранична частота передачі струму $f_{\text{пр}}$, на якій коефіцієнт підсилення за струмом спадає до 0,7 свого значення на низькій частоті;

2. Гранична частота передачі струму в схемі зі спільною базою – $f_{h_{21\beta}}$;

3. Гранична частота за крутизною прямої передачі в схемі зі спільним емітером – $f_{y_{21e}}$;

4. Максимальна частота генерації $f_{\text{max}} \approx \sqrt{\frac{f_{h_{21\beta}}}{30r'_\theta C_K}}$ – це найбільша частота, при якій транзистор може працювати в схемі автогенератора. Орієнтовно можна вважати, що на цій частоті коефіцієнт підсилення транзистора за потужністю дорівнює одиниці;

5. Ємність колекторного переходу – C_K – ємність між выводами бази і колектора при заданій зворотній напрузі емітер – база і розімкнутому емітері.

$$C_K = \sqrt{\frac{U'_{\text{ке}}}{U_{\text{ке}}}} \cdot C_{K.\text{довід.}}, \quad (6.9)$$

де $C_{K.\text{довід.}}$ – ємність колекторного переходу, вказана в довіднику при напрузі $U_{\text{ке}}$;

$U'_{\text{ке}}$ – напруга на колекторі;

6. Опір бази, r_θ – опір між выводами бази і переходом база – емітер.

$$r_\theta = h_{11e}; \quad (6.10)$$

7. Стала часу кола зворотного зв'язку на високій частоті – τ_k :

$$\tau_k = r_e \cdot C_k; \quad (6.11)$$

8. Диференційний опір емітерного переходу r_e :

$$r_e = \frac{25,6 \cdot \alpha}{I_k}; \quad (6.12)$$

9. Коефіцієнт шуму – відношення потужності шумів на виході транзистора до шумів на вході:

$$K_{ш} = \frac{P_{ш,вих}}{P_{ш,вх}}. \quad (6.13)$$

Параметри великого сигналу:

1. Статичний коефіцієнт передачі струму в схемі зі спільним емітером:

$$h_{21e} = \left. \frac{I_k}{I_b} \right|_{U_{кв}=\text{const}}; \quad (6.14)$$

2. Статична крутизна передачі в схемі зі спільним емітером:

$$y_{21e} = \left. \frac{I_k}{U_{бв}} \right|_{U_{кв}=\text{const}}. \quad (6.15)$$

Теплові параметри:

1. Максимальна температура переходу T_{\max} – це температура, при якій забезпечується задана надійність:

для германія $T_{\max} - 60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$;

для кремнію $T_{\max} - 125 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$;

2. Мінімальна температура переходу T_{\min} – це мінімальна додатна температура, при якій забезпечується задана надійність;

3. Загальний тепловий опір $R_{Tn.c}$ – відношення різниці температур між колекторним переходом і навколишнім середовищем до потужності, яка розсіюється на транзисторі в установленому режимі.

$$R_{Tn.c} = \frac{T_n - T_c}{P}; \quad (6.16)$$

4. Внутрішній тепловий опір $R_{Тн,к}$ – відношення різниці температур між колекторним переходом і корпусом транзистора до потужності, яка розсіюється на транзисторі в установленому режимі .

$$R_{Тн,к} = \frac{T_n - T_k}{P}; \quad (6.17)$$

Максимально допустимі параметри:

1. Максимально допустима постійна напруга колектор-база – $U_{кб\max}$;
2. Максимально допустима постійна напруга колектор-емітер – $U_{ке\max}$;
3. Максимально допустима постійна напруга емітер-база – $U_{еб\max}$;
4. Максимально допустимий постійний струм колектора – $I_{к\max}$;
5. Максимально допустимий постійний струм емітера – $I_{е\max}$;
6. Максимально допустимий постійний струм бази – $I_{б\max}$;
7. Максимально допустима постійна розсіювана потужність колектора – $P_{к\max}$;
8. Максимально допустима постійна розсіювана потужність транзистора – P_{\max} .

Еквівалентна схема біполярного транзистора

Схема з СЕ – фізична малосигнальна високочастотна еквівалентна схема біполярного транзистора подана на рис. 6.3.

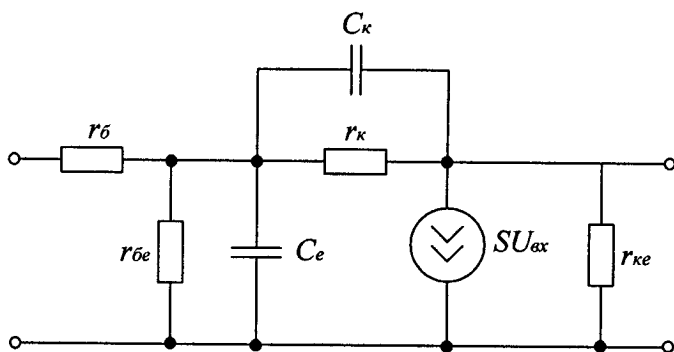


Рисунок 6.3 – Фізична малосигнальна високочастотна еквівалентна схема біполярного транзистора

Вольт-амперні статичні характеристики біполярного транзистора
 Розрізняють вхідні (рис. 6.4) та вихідні (рис. 6.5) вольт-амперні статичні характеристики біполярного транзистора.

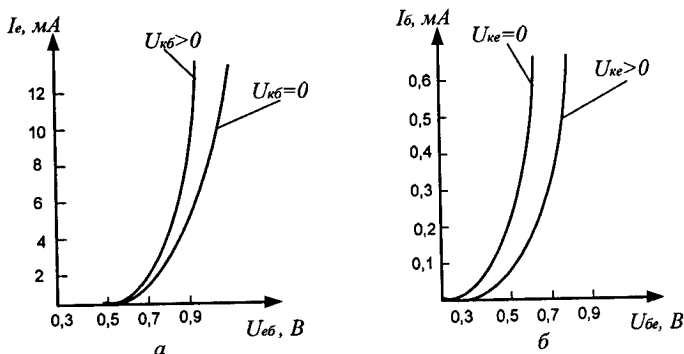


Рисунок 6.4 – Вхідні статичні характеристики БТ при включенні:
 а – за схемою із СБ; б – за схемою із СЕ

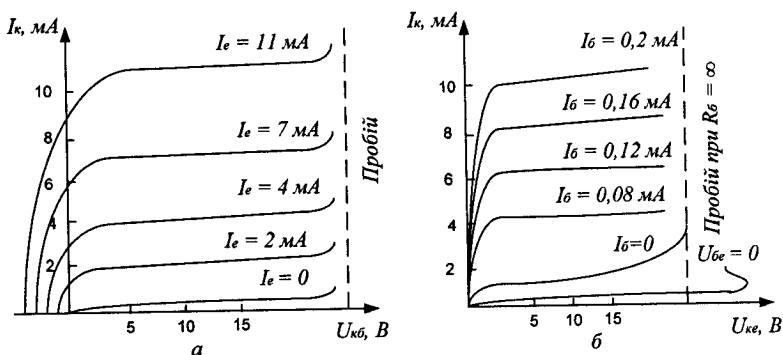


Рисунок 6.5 – Вихідні статичні характеристики БТ при включенні:
 а – за схемою із СБ; б – за схемою із СЕ

Опис лабораторної установки

На рис. 6.6 показано схему для зняття вольт-амперних характеристик транзистора з двома джерелами живлення E_b та E_c . За допомогою потенціометрів $R1$ та $R2$ можна змінювати напругу в базовому та колекторному колах. Вимірювальні прилади повинні бути розраховані на відповідні межі вимірюваних величин. Так, при дослідженні малопотужних кремнієвих транзисторів для контролю струмів потрібно використовувати міліамперметр $mA1$ з межею в 2 mA та міліамперметр $mA2$ з межею в 20 mA , для кон-

тролю напруг – вольтметри $V1$ з межею в 2 В та $V2$ з межею в 20 В , а для вимірювання напруги між базою та емітером – електронний вольтметр постійного струму з великим входним опором.

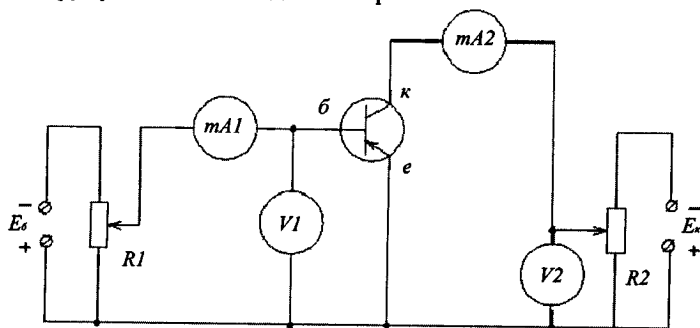


Рисунок 6.6 – Схема для зняття ВАХ транзистора

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою та провести відповідні з'єднання елементів.

2. Перевірити дію схеми, правильність ввімкнення приладів і полярність джерел струму для чого:

- встановити $U_k = 0$ і збільшувати за допомогою потенціометра $R1$ напругу в колі бази $U_б$. Струм $I_б$ у цьому колі повинний зростати;

- встановити $U_б = 0$ та збільшувати за допомогою потенціометра $R2$ напругу в колі колектора U_k . Струму I_k у цьому колі не повинно бути;

- встановити $U_k = 5 \div 10\text{ В}$. Збільшуючи напругу в колі бази, спостерігати зростання струмів $I_б$ та I_k . Переконалися в тому, що зміна $I_б$ викликає відповідну зміну I_k . Значні зміни напруги U_k мало впливають на зміну струму I_k .

3. Зняти дві вхідні статичні характеристики $I_б = \varphi(U_б)$ при $U_k = 0$ та $U_k = 10\text{ В}$. Для цього, збільшуючи за допомогою потенціометра $R1$ напругу $U_б$ від нуля до $0,8\text{ В}$, вимірюють базовий струм $I_б$. Результати вимірювань занести в табл. 6.1.

4. Зняти вихідні статичні характеристики $I_k = \varphi(U_k)$ при сталому струмові бази $I_б$. Для цього, збільшуючи за допомогою потенціометра $R2$ напругу U_k від нуля через інтервали 1 В , вимірюють відповідні значення колекторного струму I_k . У процесі вимірювань вибраний базовий струм потрібно підтримувати незмінним. Результати вимірювань записати в табл. 6.2.

5. Побудувати вхідну та вихідну статичні вольт-амперні характеристики транзистора.

6. Визначити вхідний опір транзистора $r_{вх} = \Delta U_{б} / \Delta I_{б}$.

7. Визначити вихідний опір транзистора $r_{вих} = \Delta U_{к} / \Delta I_{к}$.

8. Визначити коефіцієнт передачі струму бази $\beta = \Delta I_{к} / \Delta I_{б}$.

Таблиця 6.1 – Вхідні характеристики транзистора

$U_{еб}, B$			0	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
При $U_{к}$ B	0	$I_{б}$ $мкА$														
	10															

Таблиця 6.2 – Вихідні характеристики транзистора

$I_{к}, mA$	$U_{кб}, B$												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$0,2 I_{б}'$													
$0,4 I_{б}'$													
$0,8 I_{б}'$													
$I_{б}'$													

- Провести аналогічні вимірювання для схеми зі спільною базою.
- Провести комп'ютерне моделювання в Electronic Workbench 5.12. Скласти схему, подану на рис. 6.6, та зняти вольт-амперні характеристики транзистора.
- Оформити звіт та зробити висновки.

Контрольні запитання

- Дайте означення біполярного транзистора.
- Поясніть принцип роботи біполярного транзистора.
- Вкажіть малосигнальні параметри біполярного транзистора.
- Поясніть параметри великого сигналу біполярного транзистора.
- Зобразіть вхідні статичні вольт-амперні характеристики біполярного транзистора.
- Зобразіть вихідні статичні вольт-амперні характеристики біполярного транзистора.
- Проаналізуйте теплові характеристики біполярного транзистора.
- Зобразіть схему включення біполярного транзистора зі спільним емітером і поясніть основні її параметри.
- Зобразіть схему включення біполярного транзистора зі спільним колектором.
- Зобразіть схему включення біполярного транзистора зі спільною базою і поясніть основні її параметри.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи: вивчити призначення, класифікацію, систему маркування, умовні графічні позначення, принцип роботи польових транзисторів, їх основні параметри та характеристики, типові схеми включення.

Теоретичні відомості

Означення

Польовий транзистор (field-effect transistor) – це трьохелектродний напівпровідниковий прилад, підсилювальні властивості якого обумовлені струмом, що утворюють основні носії заряду під дією повздовжнього електричного поля, а керування величиною струму здійснюється поперечним електричним полем, прикладеним до керувального електрода.

На відміну від біполярних, в яких використовуються два види носіїв заряду (електрон та дірка), робота польових транзисторів базується на використанні лише основних носіїв заряду (електрон або дірка) в напівпровіднику, тому їх ще називають *уніполярними*.

Класифікація

За конструктивним виконанням польові транзистори поділяються на дві групи: польові транзистори з керувальним електронним переходом і польові транзистори з ізольованим затвором. Як керувальний електронний перехід може бути використаний електронно-дірковий перехід (*p-n*-перехід), гетероперехід або перехід метал–напівпровідник.

Польовий транзистор з керувальним p-n-переходом – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу *p-n*-переходом, зміщеним у зворотному напрямі.

Польовий транзистор з ізольованим затвором – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу шаром діелектрика. Структура польового транзистора складається з металу, діелектрика і напівпровідника, тому польові транзистори з ізольованим затвором часто називають МДП – транзисторами (метал-діелектрик-напівпровідник) або МОП – транзисторами (метал-оксид-напівпровідник). Існують два види МДП-транзисторів: з індукованим і з вбудованим каналами.

Маркування транзисторів

Маркування польових транзисторів аналогічне маркуванню біполярних транзисторів. Однак II елементом, що визначає підклас приладу вказується буква П.

Умовні графічні позначення

Умовні графічні позначення польових транзисторів на схемах електричних принципів виконуються згідно з ГОСТ 2.730-73 (рис. 7.1).

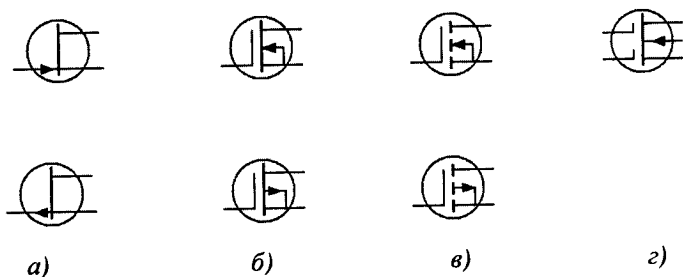


Рисунок 7.1 – Умовне графічне позначення польового транзистора з каналами n -типу (зверху) та p -типу (знизу): а – з керуючим p - n -переходом; б – з ізольованим затвором та вбудованим каналом; в) з ізольованим затвором та індукованим каналом; г) двозатворний з ізольованим затвором і вбудованим каналом

Параметри польових транзисторів

Початковий струм стоку $I_{C,поч}$ – струм стоку при нульовій напрузі між затвором і витоком та напрузі на стоці, яка дорівнює або більша за напругу насичення.

Залишковий струм стоку $I_{C,зал}$ – струм стоку при напрузі між затвором і витоком, яка перевищує напругу відсіку.

Струм втрат затвора $I_{з,вт}$ – струм затвора при заданій напрузі між затвором і рештою виводів, замкнута між собою.

Зворотній струм переходу затвор-стік $I_{зЗвор}$ – струм, що протікає в колі затвор-стік при заданій зворотній напрузі між затвором і стоком та розімкнутими рештою виводів.

Зворотній струм переходу затвор-витік $I_{зЗвор}$ – струм, що протікає в колі затвор-витік при заданій зворотній напрузі між затвором і витоком та розімкнутими рештою виводів.

Напруга відсіку польового транзистора $U_{зВід}$ – напруга між затвором і витоком транзистора з p - n -переходом або ізольованим затвором, що працює в режимі збіднення, при якому струм стоку досягає заданого низького значення.

Напруга порогу польового транзистора $U_{зВпор}$ – напруга між затвором і витоком транзистора з ізольованим затвором, що працює в режимі збагачення, при якому струм стоку досягає заданого низького значення.

Крутизна характеристик польового транзистора S – відношення зміни струму стоку до зміни напруги на затворі при короткому замиканні за змінним струмом на виході транзистора в схемі зі спільним витоком.

Вхідна ємність польового транзистора C_{11B} – ємність між затвором і витоком при короткому замиканні за змінним струмом на виході в схемі зі спільним витоком.

Вихідна ємність польового транзистора C_{22B} – ємність між стоком і витоком при короткому замиканні за змінним струмом на вході в схемі зі спільним витоком.

Прохідна ємність польового транзистора C_{12B} – ємність між затвором і стоком при короткому замиканні за змінним струмом на вході в схемі зі спільним витоком.

Ємність затвор-стік C_{3C0} – ємність між затвором і стоком при розімкнутих за змінним струмом рештою виводів.

Ємність затвор-витік C_{3B0} – ємність між затвором і витоком при розімкнутих за змінним струмом рештою виводів.

Частотні властивості

Частотні властивості польових транзисторів визначаються сталою часу RC-кола затвора. Оскільки вхідна ємність C_{11e} у транзисторів з *p-n*-переходом велика (десятки – одиниці *пікофарад*), їх застосування в підсилювальних каскадах з великим вхідним опором можливе в діапазоні частот від десятків – сотень *кілогерців* до десятків – сотень *мегагерців*.

Гранична частота (*МГц*) визначається за формулою:

$$f_{\text{гп}} \approx \frac{159 \cdot S}{C_{11e}}; \quad (7.1)$$

де S – крутизна характеристики транзистора, *мА/В*;

C_{11e} – ємність між затвором і витоком при короткому замкненні за змінним струмом вихідного кола, *nФ*.

Шумові властивості

Шумові властивості польових транзисторів оцінюються коефіцієнтом шуму ($K_{\text{ш}}$), який мало залежить від напруги стік-витік, струму стоку і температури, а також монотонно зростає зі зменшення частоти і зменшення внутрішнього опору джерела сигналу. Коефіцієнт шуму вимірюють в заданому режимі за постійним струмом I_C на певній частоті.

Замість коефіцієнта шуму іноді вказують шумову напругу польового транзистора. $U_{\text{ш}}$ – еквівалентна шумова напруга, приведена до входу, в смузі частот при певному значенні повного опору генератора в схемі зі спільним витоком.

Шумовий струм $I_{\text{ш}}$ – еквівалентний шумовий струм, приведений до входу, при розімкненому вході в смузі частот в схемі зі спільним витоком.

Теплові параметри

Теплові параметри польового транзистора характеризують його стабільність при роботі в діапазоні температур. При зміні температури власти-

вості напівпровідникових матеріалів змінюються. Це призводить до зміни параметрів польового транзистора, в першу чергу, струму стоку, крутизни і струму втрат затвора.

Залежність зміни струму стоку від температури визначається контактною різницею потенціалів p - n -переходу і зміною рухливості основних носіїв заряду в каналі. При підвищенні температури контактна різниця потенціалів та опір каналу зменшуються, а струм збільшується. Але підвищення температури призводить до зменшення рухливості носіїв заряду в каналі і струму стоку. За певних умов дія цих чинників взаємокомпенсується і струм польового транзистора стає незалежним від температури. На рис. 7.2 подано стокозатворні характеристики при різних температурах.

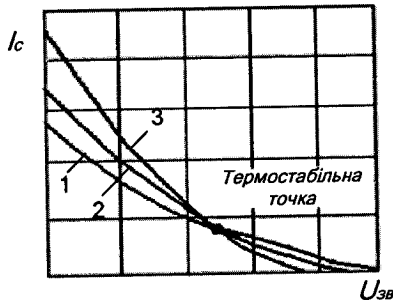


Рисунок 7.2 – Сток-затворні характеристики польового транзистора при різних температурах (1 – +85 °C; 2 – +25 °C; 3 – -60 °C)

Максимально допустимі параметри

До максимально допустимих параметрів відносяться:

– максимально допустимі напруги: затвор-витік $U_{зв\max}$; затвор-стік $U_{зс\max}$; стік-витік $U_{св\max}$; стік-підкладка $U_{сп\max}$; витік-підкладка $U_{вп\max}$; затвор-підкладка $U_{зп\max}$;

- максимально допустимий постійний струм стоку $I_{с\max}$;
- максимально допустимий прямий струм затвора $I_{з(пр)\max}$;
- максимально допустима постійна розсіювана потужність P_{\max} .

Схеми включення польового транзистора

Польовий транзистор, як елемент схеми, можна розглядати як активний несиметричний чотириполюсник, у якого один із виводів є спільним для кіл входу і виходу. Залежно від того, який з електродів польового транзистора підключений до спільного виводу, розрізняють схеми: із спільним витоком; із спільним стоком; із спільним затвором. Схеми включення польового транзистора подано на рис. 7.3.

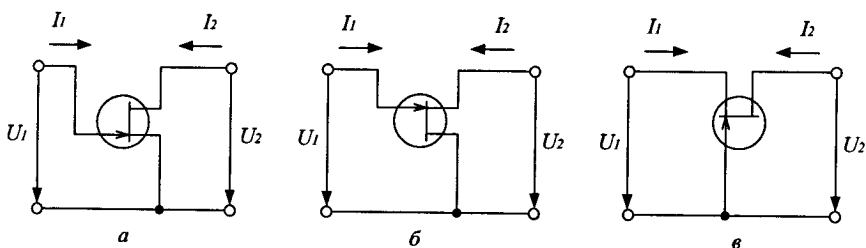


Рисунок 7.3 – Схеми включення польового транзистора:
a – із спільним витоком; *б* – із спільним стоком; *в* – із спільним затвором

Еквівалентна схема польового транзистора

Еквівалентна схема польового транзистора, елементи якої виражені через Y -параметри, наведена на рис. 7.4.

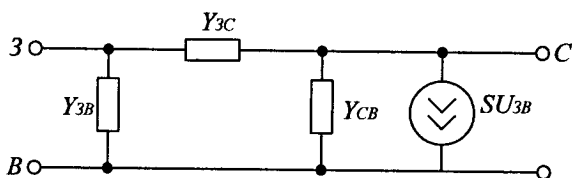


Рисунок 7.4 – Еквівалентна схема польового транзистора

ВАХ польових транзисторів

Вольт-амперні характеристики польових транзисторів встановлюють залежності струму стоку I_C від напруги U_{CB} (вихідна або стокова характеристика) та струму стоку I_C від напруги U_{3B} (перехідна або стокозатворна характеристика) (рис. 7.5 – 7.7).

Опис лабораторної установки

На рис. 7.8 показано схему для зняття вольт-амперних характеристик транзистора з двома джерелами живлення E_1 та E_2 . За допомогою потенціометрів $R1$ та $R2$ можна змінювати напругу на затворі та стоці транзистора. Вимірювальні прилади повинні бути розраховані на відповідні межі вимірюваних величин.

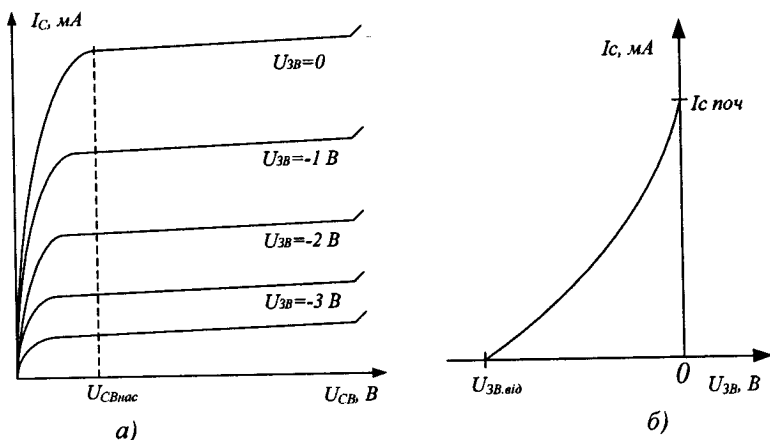


Рисунок 7.5 – ВАХ польового транзистора з *p-n*-переходом: а – стокові; б – стоко-затворні

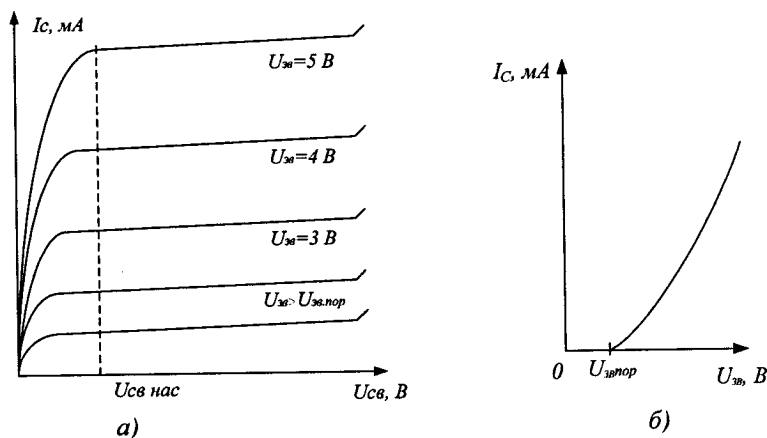


Рисунок 7.6 – ВАХ польового транзистора з ізолюваним затвором та індукованим каналом *n*-типу: а – стокові; б – стоко-затворні

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою та провести відповідні з'єднання елементів.
2. Перевірити дію схеми, правильність ввімкнення приладів і полярність джерел напруги, для чого:

– встановити $U_{CB} = 12 \text{ В}$ і збільшувати за допомогою потенціометра $R1$ напругу в колі затвора U_3 . Струм I_C при цьому повинен зменшуватися.

Для транзисторів з каналом p -типу змінити полярності напруг.

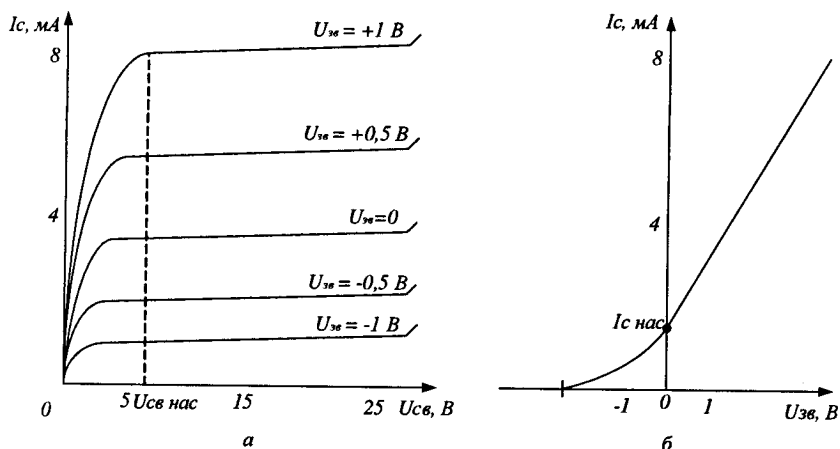


Рисунок 7.7 – ВАХ польового транзистора з ізованим затвором та вбудованим каналом n -типу: а – стокові; б – стоко-затворні

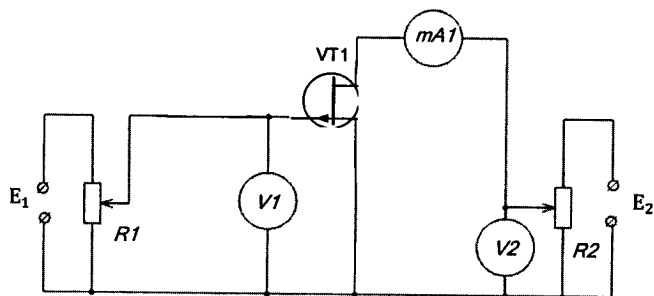


Рисунок 7.8 – Схема для зняття ВАХ польового транзистора

3. Зняти стоко-затворну характеристику $I_C = \varphi(U_{ЗВ})$ при $U_{CB} = 12 \text{ В}$. Для цього, збільшуючи за допомогою потенціометра $R1$ напругу $U_{ЗВ}$ від нуля до 3 В , вимірюють струм стоку I_C . Результати вимірювань занести в табл. 7.1.

4. Зняти вихідні стокові статичні характеристики $I_C = \varphi(U_{CB})$ при сталому значенні напруги $U_{ЗВ}$. Для цього, збільшуючи за допомогою потен-

ціометра R_2 напругу U_{CB} від нуля через інтервали 1 В , вимірюють відповідні значення струму стоку I_C . У процесі вимірювань вибрану напругу $U_{зв}$ потрібно підтримувати незмінною. Результати вимірювань занести в табл. 7.2.

Таблиця 7.1 – Стоко-затворна характеристика транзистора _____

$U_{зв}, \text{В}$			0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6
$U_{CB}, \text{В}$	12	$I_C, \text{мА}$														

5. Побудувати графіки знятих характеристик транзистора.
6. Визначити напругу відсіку польового транзистора.
7. Визначити початковий струм стоку польового транзистора.
8. Визначити крутизну польового транзистора.
9. Провести комп'ютерне моделювання в Electronic Workbench 5.12. Скласти схему, подану на рис. 7.8 та зняти характеристики транзистора.

Таблиця 7.2 – Вихідні стокові характеристики транзистора _____

$U_{зв}, \text{В}$	$U_{CB}, \text{В}$													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0 В														
0,2 В														
0,4 В														
0,6 В														

9. Оформити звіт та зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте означення польового транзистора.
2. Наведіть основні характеристики польового транзистора.
3. Наведіть основні параметри польового транзистора.
4. Наведіть схеми включення польового транзистора.
5. Наведіть умовне графічне позначення польових транзисторів.
6. Поясніть принцип роботи польового транзистора з керувальним $p-n$ -переходом.
7. Поясніть принцип роботи польового транзистора з ізольованим затвором і вбудованим каналом.
8. Поясніть принцип роботи польового транзистора з ізольованим затвором і індукованим каналом.
9. Наведіть еквівалентну схему польового транзистора.
10. Поясніть маркування польових транзисторів.

Лабораторна робота № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОДІОДІВ

Мета роботи: вивчити призначення, принцип роботи, основні параметри та характеристики, типові схеми включення фотодіодів.

Теоретична частина

Означення

Фотодіод (*photodiode*) являє собою фотогальванічний приймач випромінювання без внутрішнього підсилення, фоточутливий елемент якого має структуру напівпровідникового діода. Фотодіод має переваги напівпровідникових приладів (малі маса і розміри, великий термін служби, низькі напруги живлення, економічність) з висою чутливістю порівняно з електровакуумними фотоелементами і фоторезисторами.

Будова фотодіода аналогічна будові звичайного напівпровідникового діода. Фотодіод виконаний так, що на його *p-n*-перехід надходить світло.

Основні характеристики фотодіодів

Вольт-амперна характеристика $I_D = f(U_D)$ визначає залежність струму фотодіода від напруги на ньому при сталому значенні інтенсивності оптичного потоку $\Phi = const$ (рис. 8.1). При повному затемненні ($\Phi = 0$) через фотодіод протікає темновий струм I_T , який дорівнює сумі зворотного струму *p-n*-переходу і струму втрат. Зі збільшенням світлового потоку струм фотодіода I_D збільшується. Характерною рисою робочої області вольтамперних характеристик є практично повна незалежність струму фотодіода від прикладеної напруги. Такий режим настає при зворотних напругах на діоді більше 1 В. Оскільки темновий струм малий, то відношення струму при освітленні до темнового струму велике. Якщо зворотна напруга перевищить деяке допустиме значення, то в *p-n*-переході виникає ефект лавиноподібного розмноження носіїв заряду, що може призвести до виходу фотодіода з ладу.

Світлова характеристика (рис. 8.2) відображає залежність струму фотодіода від величини світлового потоку при сталій напрузі на фотодіоді: $I_D = f(\Phi)$ при $U_D = const$. У широкому діапазоні змін світлового потоку світлова характеристика фотодіода є лінійною.

Спектральна характеристика фотодіода (рис. 8.3) характеризує чутливість матеріалу фотодіода до частоти хвиль світлового потоку.

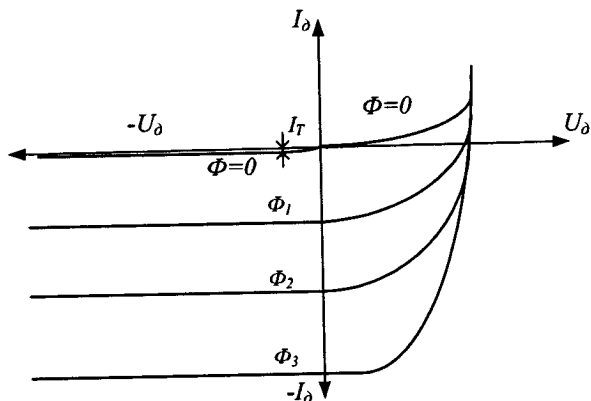


Рисунок 8.1 – Вольт-амперна характеристика фотодіода

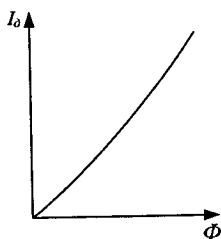


Рисунок 8.2 – Світлова характеристика фотодіода

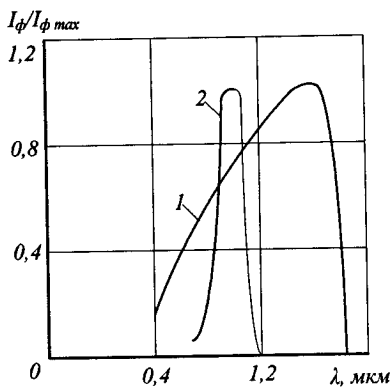


Рисунок 8.3 – Спектральна характеристика фотодіода (1 – германієвий фотодіод; 2 – кремнієвий фотодіод)

Основні параметри фотодіодів

Інтегральна чутливість $S_{\text{інт}}$ – відношення фотоструму діода до інтенсивності падаючого монохроматичного випромінювання заданого спектрального складу:

$$S_{\text{інт}} = \frac{I_{\phi}}{\Phi}. \quad (8.1)$$

Темновий струм I_m – струм, що протікає через фотодіод при зазначеній напрузі на ньому за відсутності потоку випромінювання в діапазоні спектральної чутливості.

Довговічність – мінімальний термін служби фотодіода при нормальних умовах експлуатації.

Темновий опір R_m – опір фотодіода за відсутності падаючого на нього випромінювання в діапазоні його спектральної чутливості.

Кратність зміни опору – відношення темнового опору фотодіода до опору фотодіода при освітленості 200 лк від джерела з колірною температурою 2850 К.

Світловий струм фотодіода – струм, що проходить через фотодіод при зазначеній напрузі на ньому та освітленості в 200 лк від джерела з колірною температурою 2850 К.

Струмова фоточутливість S_i (А/лк) визначає значення фотоструму, утворюваного одиничним потоком випромінювання.

Потужність розсіювання, що виділяється при проходженні фотоструму, визначає розігрів фотодіода. Велика потужність, що розсіюється, може призвести до незворотної зміни струмів I_m і I_{ϕ} .

Робоча напруга фотодіода U_p – постійна напруга, прикладена до фотоприймача, яка забезпечує номінальні параметри при тривалій роботі в заданих експлуатаційних умовах.

Максимально допустима напруга U_{max} – максимальне значення постійної напруги, при якому відхилення параметрів приладу від номінальних значень не перевищує встановлених меж. Максимально допустима імпульсна напруга більша в декілька разів за максимально допустиму постійну напругу.

Диференціальний опір R_d – відношення приросту напруги до відповідного приросту струму на фотодіоді.

Максимум спектральної характеристики фотоприймача – довжина хвилі, що відповідає максимуму чутливості фотоприймача.

Ефективна фоточутлива площа $S_{\text{еф}}$ – площа фоточутливого елемента еквівалентного до фотосигналу фотодіода, чутливість якого рівномірно розподілена по світлочутливому елементу і дорівнює максимальному значенню локальної чутливості S_{max} даного фотодіода.

Інтенсивність відмов фотодіода (λ) – визначає імовірність того, що елемент вийде з ладу за одиницю часу.

Середній час безвідмовної роботи фотодіода ($T_{сер}$) визначається за формулою:

$$T_{сер} = \frac{1}{\lambda}. \quad (8.2)$$

Імовірність безвідмовної роботи фотодіода $P(t)$ визначають за формулою :

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (8.3)$$

Типова схема включення

Схема включення фотодіода наведена на рис. 8.4. Напруга джерела живлення прикладена до фотодіода в зворотному напрямку. Коли фотодіод не освітлено, в колі проходить зворотний (темновий) струм невеликої величини (10–20 мкА для германієвих і 1–2 мкА для кремнієвих діодів).

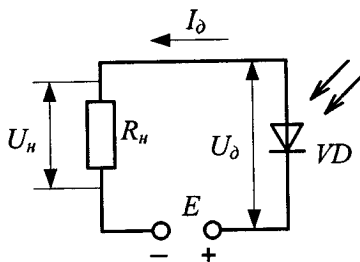


Рисунок 8.4 – Схема включення фотодіода

При освітленні фотодіода з'являється додаткова кількість електронів і дірок, внаслідок чого збільшується перехід неосновних носіїв заряду: електронів з p -області в n -область і дірок у зворотному напрямку. Це приводить до збільшення струму в колі. При правильно підбраному опорі навантаження R_n і напрузі джерела живлення E цей струм буде залежати тільки від освітленості приладу, а спад напруги на опорі можна розглядати як корисний сигнал, що впливає на інші елементи схеми.

Слід зазначити, що фотодіод можна включати в схеми як із зовнішнім джерелом живлення, так і без нього. Режим роботи фотодіода з зовнішнім джерелом живлення називають фотодіодним, а без зовнішнього джерела – вентильним.

У вентильному режимі в фотодіоді під дією світлового потоку виникає ЕРС, тому він не має потреби в зовнішньому джерелі напруги.

Опис вимірювальної установки

До складу вимірювальної установки (рис. 8.5) входить світлогенеруючий елемент, фотодіоди $VD1$ - $VD4$ змонтовані на платі і розташовані у світлонепроникному корпусі. Освітленість регулюють за допомогою зміни напруги на елементі, що генерує світло (U_c).

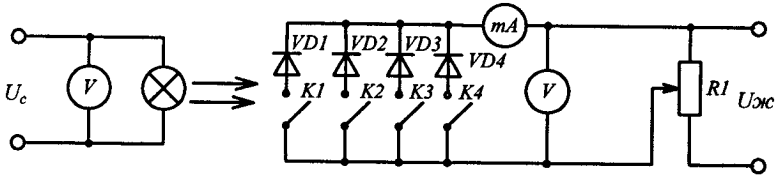


Рисунок 8.5 – Схема вимірювальної установки

Схема живиться постійною напругою $U_{жс}$, що подається від зовнішнього стабілізованого джерела живлення. Рівень напруги задається змінним резистором $R1$. При замиканні ключа $K1$ вимірюють воль-амперні характеристики фотодіодів. На рис. 8.6 подано градуйовані криві відповідності освітленості світлочутливого елемента від напруги живлення.

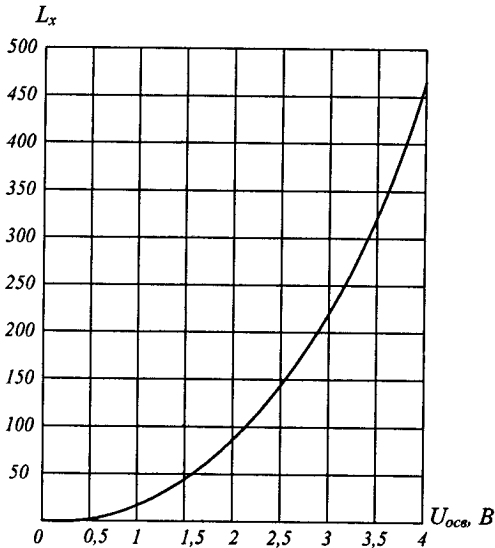


Рисунок 8.6 – Градуйовані криві відповідності освітленості світлочутливого елемента від напруги живлення

Порядок виконання роботи

1. Виконати підключення схеми.

2. Зняти сімейство ВАХ фотодіодів при двох різних світлових потоках.

Визначити величину відношення $R_{тем}/R_{фот}$.

3. Зняти світлову характеристику фотодіодів при різних напругах на них. Побудувати графік.

Контрольні запитання

1. Дайте означення фотодіода.
2. Наведіть основні характеристики фотодіодів.
3. Наведіть основні параметри фотодіодів.
4. Наведіть схему включення фотодіода.
5. Наведіть умовне графічне позначення фотодіодів.
6. Поясніть принцип роботи фотодіода.
7. Поясніть, що таке фотодіодний режим роботи фотодіода.
8. Поясніть, що таке вентильний режим роботи фотодіода.
9. Наведіть спектральну характеристику фотодіода.
10. Наведіть вольт-амперну характеристику фотодіода.

Література

1. Гершунский Б. С. Основы электроники и микроэлектроники / Гершунский Б. С. – К. : Вища школа, 1989. – 423 с.
2. Матвійків М. Д. Елементна база електронних апаратів : підручник / Матвійків М. Д., Когут В. М., Матвійків О. М. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 420 с.
3. Філінюк М. А. Технічна електроніка. Курсове проектування : навчальний посібник / М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 90 с.
4. Гусев В. Г. Электроника : учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1991. – 622 с.
5. Справочник радиолюбителя / под ред. Терещука М. В. – М. : Радио и связь, 1989. – 620 с.
6. Петров К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / Петров К. С. – СПб. : Питер, 2004. – 522 с.
7. Свитенко В. Н. Электрорадиоэлементы : курсовое проектирование / Свитенко В. Н. – М. : Высшая школа, 1987. – 207 с.
8. Москатов Е. А. Справочник по полупроводниковым приборам / Москатов Е. А. – М. : Радио, 2005. – 208 с.
9. Шмаков С. Б. Энциклопедия радиолюбителя. Современная элементная база / Шмаков С. Б. – М. : Наука и техника, 2012. – 500 с.
10. Перебаскин А. В. Маркировка электронных компонентов / А. В. Перебаскин, А. А. Бахметьев. – М. : Додека-XXI. – 2004. – 386 с.

ГЛОСАРІЙ

- Акцепторно-домішковий – acceptor-impurity
Біполярний транзистор – bipolar transistor
Варикап – varicap
Варістор – varistor
Генерація – generation
Дирка – hole
Діод – diode
Діод Шоттки – Schottky diode
Дросель – throttle
Електрон – electron
Ємність – capacitance
Імпульсний діод – switching diode
Індуктивність – inductance
Іоністор – ionistor
Конденсатор – capacitor
Котушка індуктивності – inductor
Накопичення заряду – charge accumulation
Напівпровідник – semiconductor
Обернений діод – inverse diode
Опір – impedance
Перехід – junction
Польовий транзистор – field-effect transistor
Резистивний матеріал – resistor material
Резистор – resistor
Рекомбінація – recombination
Різкоперехідний – abrupt-junction

Світлодіод – light-emitting diode (LED)

Стабілітрон – stabilatron

Стабістор – stabistor

Термістор – thermistor

Терморезистор – thermal resistors

Транзистор – transistor

Трансформатор – transformer

Тунельний діод – tunnel diod

Ферит – ferrite

Фотодіод – photodiode

Фоторезистор – photoresistor

Навчальне видання

**Філінюк Микола Антонович
Лазарев Олександр Олександрович
Войцеховська Олена Валеріївна
Пастушенко Олександр Леонідович**

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Лабораторний практикум

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено О. В. Войцеховською

**Підписано до друку 20.06.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк.
Наклад 50 (1–20) пр. Зам. № 2017-229.**

**Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.**

ВНТУ, ГНК, к. 114.

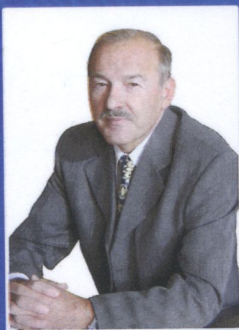
**Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.**

Тел. (0432) 59-85-32, 59-87-38,

press.vntu.edu.ua;

Email: kivc.vntu@gmail.com.

**Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.**



Філінюк Микола Антонович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Проектування комп'ютерної і телекомунікаційної апаратури" Вінницького національного технічного університету. Заслужений діяч науки і техніки України.

Академік Академії інженерних наук України. Підготував 4 докторів, 15 кандидатів технічних наук і 15 магістрів. Автор більше 700 наукових та науково-методичних робіт, у тому числі 32 монографій, посібників та навчальних посібників та більше 100 авторських свідоцтв та патентів на винаходи.

Лазарев Олександр Олександрович кандидат технічних наук, доцент кафедри ПКТА. Автор понад 250 наукових та методичних праць. Сфера наукових інтересів: розробка та дослідження електронних пристроїв на базі R-, L-, C-елементів.



Войцеховська Олена Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри ПКТА Вінницького національного технічного університету. Автор понад 70 наукових і навчально методичних публікацій. Сфера наукових інтересів: розробка та дослідження імітансних інформаційних пристроїв.

Пастушенко Олександр Леонідович – старший викладач кафедри ПКТА. Автор 18 наукових робіт, серед яких два патенти і навчальний посібник, 4 звіти з науководослідних тем. Основні напрями наукової і технічної діяльності: дослідження термооптичних ефектів у рідинно-кристалічних матеріалах під дією лазерного випромінювання.

