

О.К.Колесницький, Г.Д.Дорощенко, С.Є.Тужанський

РАДІОКОМПОНЕНТИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет

О.К.Колесницький, Г.Д.Дорощенко, С.Є.Тужанський

РАДІОКОМПОНЕНТИ

Лабораторний практикум

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальності 7.091101 “Лазерна та оптоелектронна техніка”. Протокол № 4 від 25. 11. 2004р.

Вінниця ВНТУ 2005

УДК.621.38
К 60

Рецензенти:

В.Ф.Бардаченко, доктор технічних наук, професор
А.М.Петух, доктор технічних наук, професор
М.А.Філінюк, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

О.К.Колесницький, Г.Д.Дорощенко, С.Є.Тужанський
К 60 **Радіокомпоненти:** Лабораторний практикум. - Вінниця: ВНТУ,
2005.- 81с.

Цей лабораторний практикум розроблений у відповідності з планом кафедри лазерної та оптоелектронної техніки і програмою дисципліни “Радіокомпоненти та мікроелектронна технологія” для студентів спеціальності “Лазерна та оптоелектронна техніка”.

УДК 621.38

© О.К.Колесницький, Г.Д.Дорощенко, С.Є.Тужанський, 2005

Зміст

Лабораторна робота №1.	
Дослідження основних параметрів резисторів	4
Лабораторна робота №2.	
Дослідження основних параметрів конденсаторів	20
Лабораторна робота №3.	
Дослідження характеристик електричних сигналів	28
Лабораторна робота №4.	
Дослідження проходження сигналів через лінійні кола	35
Лабораторна робота №5.	
Дослідження основних параметрів терморезисторів	46
Лабораторна робота №6.	
Дослідження основних параметрів трансформаторів, дроселів та котушок індуктивності	51
Лабораторна робота №7.	
Дослідження параметрів напівпровідникових діодів	54
Лабораторна робота №8.	
Дослідження транзисторів	64
Лабораторна робота №9.	
Дослідження польових транзисторів	72
Лабораторна робота №10.	
Дослідження тиристорів та одноперехідних транзисторів	76

Лабораторна робота № 1

Дослідження основних параметрів резисторів

Мета роботи – ознайомитись з класифікацією, системою позначень та дослідити основні параметри резисторів.

Загальні теоретичні відомості

1. Класифікація резисторів

Резистори призначені для створення на ділянці електричного кола певного активного опору.

Резистори бувають постійні та змінні. За характером використовуваного резистивного матеріалу розподіляють на дротяні та недротяні (плівкові та об'ємні) резистори.

Класифікацію резисторів за матеріалом резистивного елемента наведено на рис.1.1.

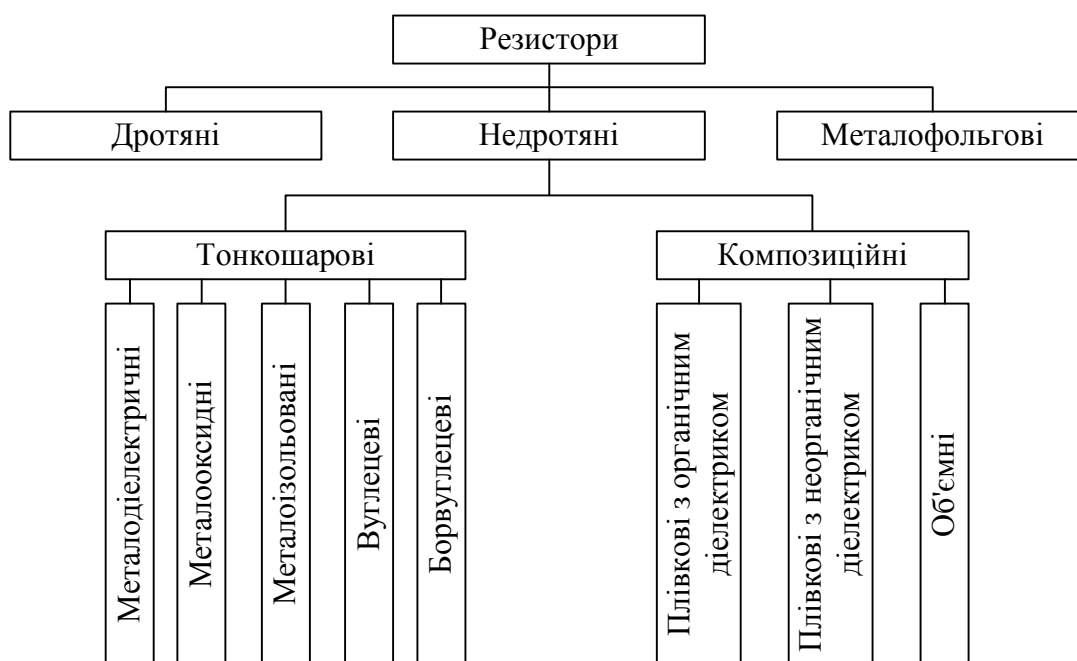


Рис. 1.1. Класифікація резисторів за матеріалом резистивного елемента

В залежності від характеру зміни опору при протіканні струму та зовнішніх факторів впливу резистори поділяються на лінійні та нелінійні. Власне резистори лінійні. До нелінійних відносять терморезистори, варістори та магніторезистори.

Класифікацію резисторів за конструктивним виконанням показано на рис. 1.2.

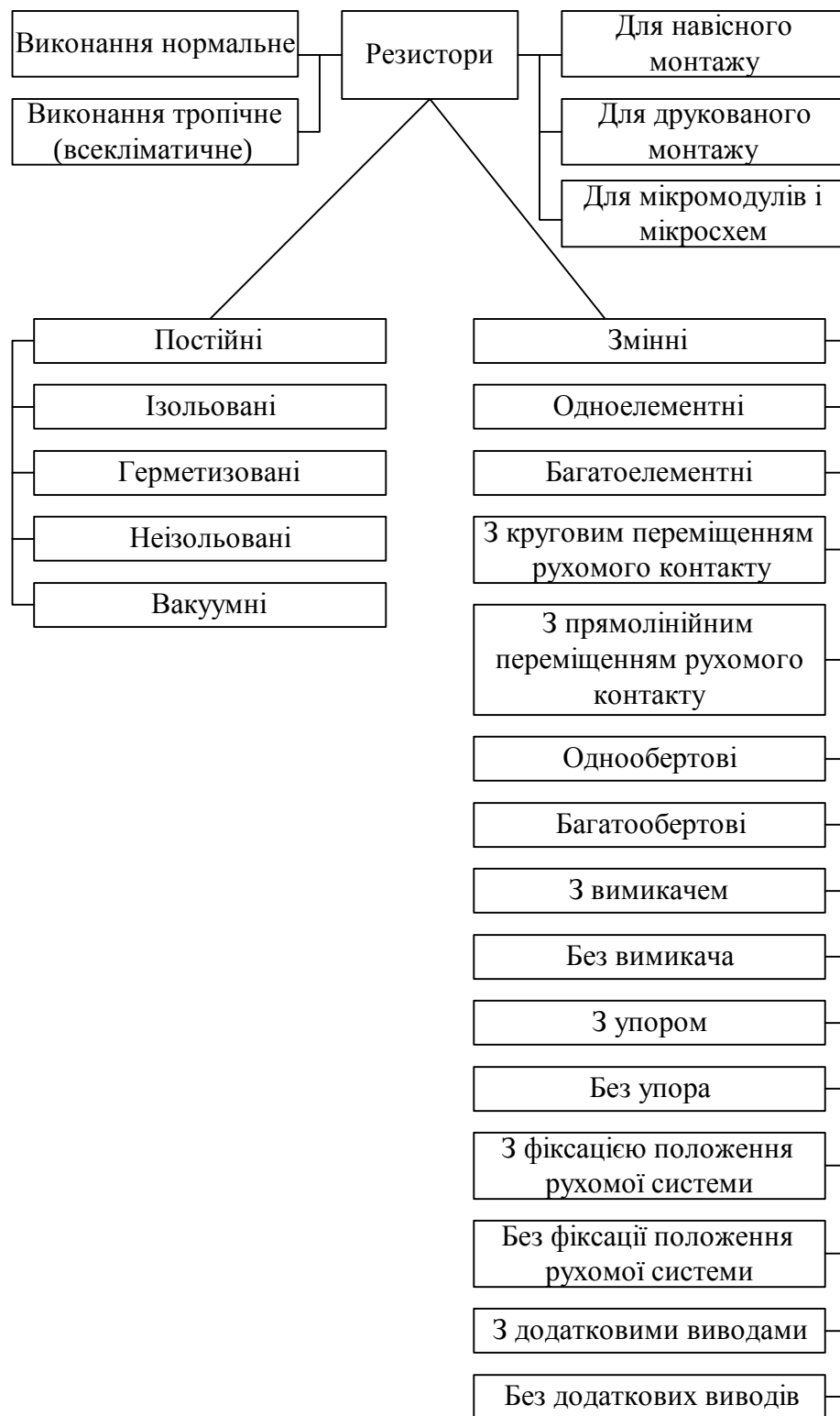


Рис. 1.2. Класифікація резисторів за конструктивним виконанням

В залежності від призначення розрізняють резистори загального призначення та спеціальні (прецизійні та надпрецизійні, високочастотні, високовольтні та високомегаомні).

Резистори загального призначення виготовляють з діапазоном номінального опору від 0,47 Ом до 10^{10} Ом на номінальні потужності розсіювання 0,062 – 100 Вт.

Прецизійні та надпрецизійні резистори відрізняються високою стабільністю параметрів при експлуатації та великою точністю номінального значення при виготовленні (0,0005%), але потужності розсіювання при цьому не перевищують 2 Вт. Високочастотні резистори відрізняються малими власними індуктивністю та ємністю. Недротяні високочастотні резистори працюють у діапазоні частот до 100 МГц та більше, а дротяні – до сотень кілогерц.

Високовольтні резистори розраховані на робочі напруги від одиниць до десятків кіловольт.

Високомегаомні резистори мають діапазон номінального опору від десятків мегаом до одиниць тераом при робочих напругах 100...400 В. Вони працюють у ненавантаженому режимі та потужності їх розсіювання менші ніж 0,5 Вт.

В залежності від способу монтажу у апаратурі як постійні, так і змінні резистори можуть виконуватись для друкованого та навісного монтажу (компоненти поверхневого монтажу - SMD- технології).

2. Система умовних позначень і маркування

Раніше в основу позначень (назв) резисторів бралися різноманітні ознаки: конструктивні різновиди, технологічні особливості, експлуатаційні характеристики, галузь застосування і т.п. Наприклад:

ППБ - дротові змінні безкаркасні;

МЛТ - металоплівкові лаковані теплостійкі;

ДКВ - дротові керамічні вологостійкі;

ВЛИ - вуглецеві лаковані вимірювальні;

ОПО - опори змінні об'ємні;

КВМ - композиційні вакуумні мегаомні;

ЮС - юстирувальні.

ГОСТ 13453-78 впроваджена система скорочених позначень у залежності від групи і властивостей резисторів, що складається з букв і цифр. Букви означають групу виробів: С - резистори постійні; СП - резистори змінні (буква С залишилася від російської назви резисторів - «сопротивление»). Число, що стоїть після букв, означає специфічний різновид резистора в залежності від матеріалу струмопровідного елемента:

1 - недротові тонкошарові вуглецеві і боровуглецеві;

2 - недротові тонкошарові металодіелектричні і металооксидні;

- 3 - недротові композиційні плівкові;
- 4 - недротові композиційні об'ємні;
- 5 - дровотів:
- 6 - недротові тонкошарові металізовані.

Після першої цифри через дефіс ставиться друга цифра (цифри), що позначає реєстраційний номер конкретного типу резистора. Наприклад, С2-26 позначають резистори постійні, недротові, тонкошарові, металодіелектричні, реєстраційний номер - 26.

З 1980 р. впроваджена нова система скорочених умовних позначень, за якою: перший елемент - буква або сполучення букв - позначає підклас резистора: Р - постійні резистори, РП - змінні резистори, НР - набори резисторів;

другий елемент - цифра (цифри) - позначає групу резистора за матеріалом резистивного елемента: 1 - недротові, 2 - дровотів;

третій елемент - цифра - позначає реєстраційний номер конкретного типу резистора. Між другим і третім елементом ставиться дефіс. Наприклад, резистори постійні недротові з номером 26 варто писати Р1-26.

Повне умовне позначення складається зі скороченого позначення, варіанта конструктивного виконання (при необхідності), позначень і величин основних параметрів і характеристик резисторів, кліматичного виконання і позначення документа на постачання.

Параметри і характеристики, що входять у повне умовне позначення резистора, вказуються в такій послідовності. Для резисторів постійних:

номінальна потужність розсіювання і літерне позначення;

одиниці вимірювання потужності (Вт, кВт);

номінальний опір і літерне позначення одиниці вимірювання (Ом, кОм, МОм, ГОм);

допустиме відхилення опору у відсотках (допуск);

група за рівнем шумів (для недротових резисторів);

група за температурним коефіцієнтом опору.

Для резисторів змінних;

номінальна потужність розсіювання і літерне позначення одиниці вимірювання потужності (Вт);

номінальний опір і літерне позначення одиниці вимірювання опору (Ом, кОм, МОм);

допустиме відхилення опору у відсотках (допуск);

функціональна характеристика (для недротових резисторів):

позначення кінця вала до довжини частини вала, яка виступає, (розмір від монтажної площини до кінця вала) за ГОСТ 4907-73 (ВС-1 - суцільний гладкий, ВС-2 - суцільний із шліцом, ВС-3 - суцільний із лискою, ВС-4 - суцільний із двома лисками, ВП-1 - порожнистий гладкий, ВП-2 - полий із лискою).

Для багатoeлементних резисторів у повному умовному позначенні параметри і характеристики записуються у вигляді дробу в порядку набору секцій від виходу вала.

Приклади повних умовних позначень резисторів. Постійний недротовий резистор із реєстраційним номером 33И, номінальною потужністю розсіювання 0,25 Вт, номінальним опором 100 кОм, допустимим відхиленням опору $\pm 2\%$, групою за рівнем шумів А, документом на постачання 0.467.027 ТУ позначається Р1-33И—0,25 Вт - 100 кОм $\pm 2\%$ А 0.467.027 ТУ.

Змінний недротовий зчетверений резистор із реєстраційним номером 33, варіанта виконання У з параметрами і характеристиками в зазначеній вище послідовності, із видом кінця вала ВП-1, із довжиною виступаючої частини вала 32 мм, документом на постачання ОЖ0. 468. 185 ТУ позначається

	<u>0,25 Вт - 1,5 кОм $\pm 10\%$ А</u>	
РП1-33У	<u>0,25 Вт - 2,2 кОм $\pm 20\%$ А</u>	ВП-1-32 ОЖ0. 468. 185 ТУ
	<u>0,25 Вт - 4,7 МОм $\pm 20\%$ А</u>	
	<u>0,25 Вт - 3,3 МОм $\pm 20\%$ А</u>	

Маркування на резисторах впроваджене також буквено-цифрове, що відповідає міжнародним стандартам. Воно містить: вид, номінальну потужність, номінальне значення опору, допуск і дату виготовлення. У залежності від розмірів резисторів, що маркуються і виду технічної документації можуть застосовуватися повні і скорочені (кодовані) позначення номінальних опорів і їхніх допустимих відхилень.

Повне позначення номінальних опорів складається зі значення номінального опору (цифра) і позначення одиниці вимірювання (Ом - оми, кОм - кілооми, МОм - мегаоми, ГОм – гігаоми, ТОм – тераоми). Наприклад, 365 Ом, 100 кОм, 4,7 МОм, 3,3 ГОм, 1 ТОм.

Кодоване позначення номінальних опорів складається з трьох або чотирьох знаків, що включають дві цифри і букву або три цифри і букву. Буква коду з російського або латинського алфавіту (у дужках) позначає множник, що складає значення опору і визначає положення коми десяткового знака. Букви Е (R), К, М, Г (G), Т позначають відповідно множники 1 , 10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12} для значень опору, виражених в омах. Для приведеного вище прикладу варто писати: 365Е (365R), 100К, 4М7, 3Г3, 1Т0.

На постійних резисторах відповідно до ГОСТ 17598-72 і вимог Публікації 62 МЕК допустиме маркування кольоровим кодом. Його наносять знаками у вигляді кіл або смуг.

Для маркування кольоровим кодом номінальний опір резисторів в омах виражається двома або трьома цифрами (у випадку трьох цифр остання цифра не дорівнює 0) і множником 10^n , де n - будь-яке число від мінус 2 до плюс 9.

Приклади кольорового маркування резисторів приведені на рис. 1.3 і 1.4. Якщо розміри резистора не дозволяють розмістити маркування ближче до одного з торців резистора, площа першого знака робиться приблизно в 2 рази більша площі інших знаків. Кольори знаків маркування значення номінального опору і допусків повинні відповідати зазначеним у табл. 1.1.

Маркувальні знаки пересовують до одного з торців резистора і розташовують зліва направо у такому порядку:

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1) перша цифра | } номінальний опір. |
| 2) друга цифра | |
| 3) множник | |
| 4) допуск | |

Для резисторів із номінальним опором, вираженим трьома цифрами і множником, кольорове маркування складається з п'яти знаків:

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1) перша цифра | } номінальний опір. |
| 2) друга цифра | |
| 3) третя цифра | |
| 4) множник | |
| 5) допуск | |

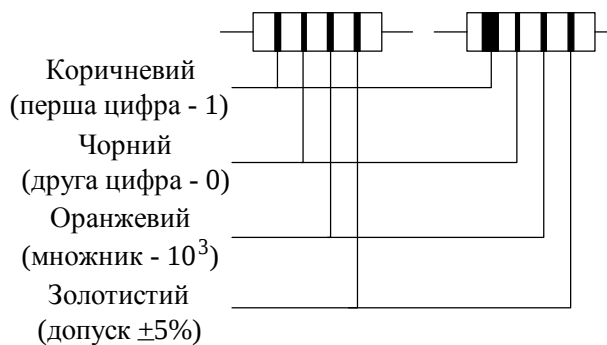


Рис. 1.3. Маркування резисторів із номінальним опором 10 кОм і допуском $\pm 5\%$

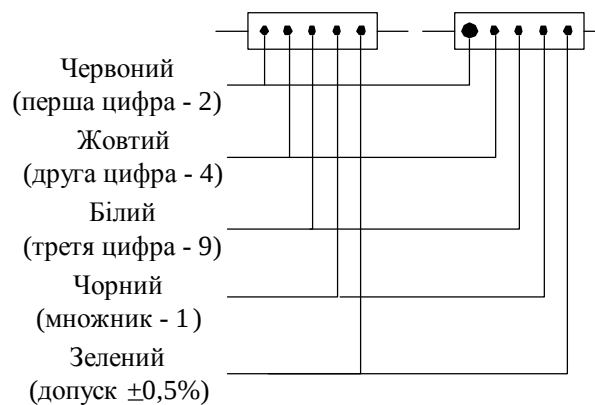


Рис. 1.4. Маркування резисторів із номінальним опором 249 Ом і допуском $\pm 0,5\%$

3. Основні електричні параметри резисторів

3.1. Номінальний опір і допуск

Номінальний опір - значення опору, на яке розрахований резистор і

яке указується на резисторі або в супровідній документації.

Номинальні значення опорів резисторів, що випускаються вітчизняною промисловістю і закордонними фірмами, стандартизовані відповідно до рекомендацій МЕК.

Встановлено шість рядів: E6; E12; E24; E48; E96; E192. Ряди E являють собою десяткові ряди геометричної прогресії зі знаменником прогресії, рівним $q_N = \sqrt[N]{10}$, для ряду EN. Цифра після букви E вказує число номінальних величин у кожному десятковому інтервалі.

Таблиця 1.1

Кольори знаків маркування номінального опору і допусків

Колір знаку	Номинальний опір, Ом				Допуск, %
	Перша цифра	Друга цифра	Третя цифра	Множник	
Сріблястий	-	-	-	10^{-2}	± 10
Золотистий	-	-	-	10^{-1}	± 5
Чорний	-	0	-	1	-
Коричневий	1	1	1	10	± 1
Червоний	2	2	2	10^2	± 2
Оранжевий	3	3	3	10^3	-
Жовтий	4	4	4	10^4	-
Зелений	5	5	5	10^5	$\pm 0,5$
Блакитний	6	6	6	10^6	$\pm 0,25 (\pm 0,2)$
Фіолетовий	7	7	7	10^7	$\pm 0,1$
Сірий	8	8	8	10^8	$\pm 0,05$
Білий	9	9	9	10^9	-

Наприклад, ряд E6 містить шість значень номінальних опорів у кожній декаді, що повинні відповідати числам 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7 і 6,8 або числам, отриманим шляхом множення або ділення цих чисел на 10^n , де n - ціле позитивне або негативне число.

Фактичні значення опорів можуть відрізнятися від номінальних у межах певних допусків. Ряд допустимих відхилень від номінальних значень також нормалізований. Допуски вказуються у відсотках відповідно

до ряду $\pm 0,001$; $\pm 0,002$; $\pm 0,005$; $\pm 0,01$; $\pm 0,02$; $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; $\pm 1,0$; $\pm 2,0$; $\pm 5,0$; ± 10 ; ± 20 ; ± 30 .

Значення номінальних опорів з допусками $\pm 5\%$ і більше повинні відповідати числам, приведеним у табл. 1.2, і числам, отриманим шляхом множення цих чисел на 10^n , де n - ціле позитивне або негативне число. Принцип побудови рядів номінальних значень опорів для резисторів із допусками меншими $\pm 5\%$ аналогічний приведеному, зростає лише число проміжних значень (табл. 1.3).

Таблиця 1.2

Ряди номінальних значень опорів резисторів із допуском $\pm 5\%$ і більше

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,1				2,4				5,1
		1,2	1,2			2,7	2,7			5,6	5,6
			1,3				3,0				6,2
	1,5	1,5	1,5		3,3	3,3	3,3		6,8	6,8	6,8
			1,6				3,6				7,5
		1,8	1,8			3,9	3,9			8,2	8,2
			2,0				4,3				9,1

Таблиця 1.3

Ряди номінальних значень опорів резисторів із допуском меншим $\pm 5\%$

E48	E96	E192	E48	E96	E192	E48	E96	F192	E48	E96	E192
100	100	100		143	143	205	205	205		291	291
		101			145			208			298
	102	102	147	147	147		210	210	301	301	301
		104			149			213			305
105	105	105		150	150	215	215	215		309	309
		106			152			218			312
	107	107	154	154	154		221	221	316	316	316
		109			156			223			320
110	110	110		158	158	226	226	226		324	324
		111			110			229			328
	113	113	162	162	162		232	232	332	332	332
		114			164			234			336
115	115	115		165	165	237	237	237		340	340
		117			167			210			344
	118	118	169	169	169		243	243	348	348	348
		120			172			246			352
121	121	121		174	174	249	249	249		357	357
		123			176			252			361
	124	124	178	178	178		255	255	365	365	365
		126			180			258			370

Продовження табл. 1.3

127	127	127 129		182	182 184	261	261	261 264		374	374 379
	130	130 132	187	187	187 189		267	267 271	383	383	383 388
133	133	133 135		191	191 193	274	274	274 277		392	392 397
	137	137 138	196	196	196 198		280	280 284	402	402	402 407
140	140	140 142		200	200 203	287	287	287 281		412	412 417
422	422	422 427		523	523 530	649	649	649 657		806	806 818
	432	432 437	536	536	536 542		665	665 673	825	825	825 838
442	442	442 448		549	549 556	681	681	681 690		845	845 856
	453	453 459	562	562	562 569		698	698 706	866	866	866 876
464	464	464 470		576	576 583	715	715	715 723		887	887 898
	475	475 481	590	590	590 597		732	732 741	909	909	909 920
487	487	487 493		604	601 612	750	750	750 759		931	931 942
	499	499 505	619	619	619 626		768	768 777	953	953	953 965
511	511	511 517		634	634 642	787	787	787 796		976	976 988

Крім номінального змінні резистори характеризуються такими величинами опору:

а) повний опір - опір між крайніми виводами резистивного елемента;

б) установлений опір - опір між одним із крайніх виводів резистивного елемента і виводом рухомого контакту;

в) мінімальний опір - опір, обмірюваний між виводом рухомого контакту і будь-якого виводу резистивного елемента при такому положенні вала, коли утворюється найменше значення опору;

г) опір додаткового відводу - опір між крайнім виводом резистивного елемента і виводом додаткового відводу;*

д) перехідний опір (контактний опір) - опір між резистивним елементом і рухомих контактом;

е) для резисторів із вимикачем уведене поняття «опір контактів вимикача» - електричний опір замкнутої контактної пари, що складається з опору контакт - деталей і перехідного опору контакту;

ж) початковий стрибок — різка зміна опору при переміщенні рухомої системи від упора (а для резисторів із вимикачем від положення включено») до початку плавної зміни опору;

з) опір ізоляції - опір між струмоведучими частинами і корпусом.

* Цей параметр експлуатаційний. У нормальних умовах опір ізоляції для різних типів резисторів може лежати в межах від десятків до тисяч мегаом.

3.2. Номінальна потужність і гранична робоча напруга

Під **номінальною потужністю** розуміється найбільша потужність, яку резистор може розсіювати в заданих умовах протягом гарантованого терміну служби при зберіганні параметрів у встановлених межах.

Значення номінальної потужності розсіювання залежить від конструкції і фізичних властивостей застосованих матеріалів. Чим вище теплостійкість конструкційних і резистивних матеріалів, тим вище допустима потужність розсіювання для даного об'єму резистора. Обмежувачими факторами при роботі резистора є температура навколишнього середовища t_0 і електричне навантаження, що в остаточному результаті створює додатковий перенагрів $t_{\text{п}}$. У сумі ці складові визначають допустиму температуру нагрівання

$$t_{\text{доп}} = t_0 + t_{\text{п}}.$$

Таким чином, нагрівання резистора відбувається за рахунок потужності, що виділяється при протіканні електричного струму, і теплової енергії навколишнього середовища. З підвищенням температури навколишнього середовища відбувається нагрівання резистора понад припустиму температуру, у результаті чого з'являється необхідність зниження електричного навантаження, тобто зменшення потужності розсіювання. Іншими словами, фактична потужність розсіювання пов'язана з навколишньою температурою й умовами експлуатації. У довідниках і документах на постачання звичайно приводяться залежності потужності від температури, за якими вибирається електричне навантаження для конкретних умов використання резистора.

Під значенням температури навколишнього середовища або повітря варто розуміти:

температуру на поверхні резистора, коли він, знаходячись під електричним навантаженням, не розсіює або майже не розсіює тепла; температуру повітря в точці, віддаленій на відстань 15-20 мм від резистора, якщо інші елементи, що виділяють тепло, розташовані на відстані не ближче 30 мм;

температуру повітря в середній точці між нагрітими елементами при щільному монтажі, коли відстань між резисторами й іншими елементами менше 30 мм.

При конструюванні й у дослідницькій практиці часто користуються такою характеристикою, як питома потужність (навантаження) резистора - відношення номінальної потужності розсіювання P_H до тепловіддачі S або до об'єму резистора V :

$$P_{\text{пит}} = \frac{P_H}{S}; \quad P'_{\text{пит}} = \frac{P_H}{V};$$

де $P_{\text{пит}}$ - питома потужність, Вт/см²; $P'_{\text{пит}}$ - питома потужність, Вт/см³

Питома потужність у сукупності з іншими питомими характеристиками дозволяє порівнювати між собою різноманітні типи резисторів.

Значення номінальних потужностей розсіювання у ватах устанавлюються відповідно до ГОСТ 9663-75 і вибираються з ряду: 0,01; 0,025; 0,05; 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6,3; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 75; 80; 100; 160; 250; 400; 500; 630; 800; 1000.

Розсіювана потужність залежить від номінального опору резистора, що визначає робочу напругу U . Напруга, при якій резистор може працювати, не повинна перевищувати величину, розраховану виходячи з номінальної потужності P_H і номінального опору R_H за формулою $U \leq \sqrt{P_H \cdot R_H}$, або граничну робочу напругу (у залежності від того, яка з цих величин менша).

Гранична робоча напруга - максимальна напруга для даного типу резистора, що встановлюється, виходячи з його конструкції, розмірів і забезпечення тривалої працездатності. Вона обмежується в основному тепловими процесами в струмопровідному елементі і електричною міцністю резистора.

3.3. Температурний коефіцієнт опору

Температурним коефіцієнтом опору (ТКО) називається величина, що характеризує відносну зміну опору резистора при зміні температури на 1 °С. Температурний коефіцієнт опору характеризує оборотні зміни опору резистивного елемента внаслідок зміни температури навколишнього середовища або зміни електричного навантаження.

На практиці користуються середнім значенням температурного коефіцієнта опору, який визначається в інтервалі робочих температур або за допомогою спеціального вимірювача ТКО, або шляхом вимірювання трьох значень опорів (при температурі 20°С, крайньої позитивної і крайньої негативної температурах) і наступним обчисленням ТКС за формулою

$$TKO = \frac{\Delta R}{R_1 \cdot \Delta t},$$

де ТКО - температурний коефіцієнт опору $1/^\circ\text{C}$; ΔR - алгебраїчна різниця між опором, виміряним при заданих позитивній або негативній температурах, і опором, вимірюваним при нормальній температурі; R_1 - опір резистора, виміряний при нормальній температурі; Δt - алгебраїчна різниця між заданою позитивною або заданою негативною температурою і нормальною температурою.

3.4. Власні шуми

Власні шуми резисторів складаються з теплових і струмових шумів. Рівень шумів вимірюється електрорушійною силою (ЕРС) шумів.

Виникнення теплових шумів пов'язано з флуктуаційними змінами об'ємної концентрації електронів у резистивному елементі, обумовленими їх тепловим рухом. Внаслідок хаотичного руху електронів частотний спектр теплових шумів виявляється безупинним, а його енергія рівномірно розподілена аж до дуже великих частот.

Крім теплових шумів, рівень яких визначається в основному температурою і опором резистивного елемента і не залежить від струму, який протікає у резистивному елементі при вмиканні його під електричне навантаження, виникають специфічні струмові шуми, обумовлені флуктуаціями контактних опорів між провідними частинками, а також тріщинами і неоднорідностями резистивного елемента. Ці флуктуації є результатом зміни площі контакту окремих струмопровідних частин структури елемента, перерозподіли напруги на окремих зазорах між цими частинками, виникнення нових провідних ланцюжків у відносно великих зазорах під дією високої напруженості електричного поля і т.п.

У напівпровідникових матеріалах причиною струмових шумів можуть бути коливання провідності, пов'язані з процесами рекомбінації носіїв струму й інших процесів.

Струмові шуми при заданому значенні опору і певній напрузі в значній мірі залежать від матеріалу і конструкції резистивного елемента і найбільш характерні для недротових резисторів. Звичайно вони значно більші теплових шумів. Частотний спектр енергії струмового шуму також безупинний, але на відміну від теплового характеризується зменшенням інтенсивності високочастотних складових.

Рівень шумів D визначають відношенням діючого значення змінної складової напруги шумів E до прикладеної постійної напруги U і виражають у мікровольтах на вольт.

$$D = \frac{E}{U}.$$

Рівень власних шумів резисторів тим вищий, чим більша температура і напруга. Шуми накладають обмеження на чутливість схем і створюють перешкоди при відтворенні корисного сигналу.

Значення ЕРС шумів для недротових резисторів лежить у межах від долей одиниць мкВ/В, а для окремих типів і до десятків мкВ/В.

3.5. Коефіцієнт напруги

Значення опору деяких типів резисторів, особливо високовольтних і високомегаомних, може змінюватися в залежності від прикладеної напруги. Причиною нелінійності вольт-амперної характеристики резистора є залежність концентрації носіїв струму і їхньої рухливості від напруженості поля. Нелінійний опір мають також контакти через тонкі діелектричні шари і контакти в композиціях, особливо з грубозернистою структурою, де можливі локальні перенагриви. Для оцінювання ступеня нелінійності звичайно використовується коефіцієнт напруги. Він визначається відносною зміною опору резисторів, виміряного при випробних напругах, що відповідають 10 і 100% його номінальної потужності розсіювання. Обчислення коефіцієнта напруги проводиться за формулою

$$K_H = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \cdot 100,$$

де R_1 і R_2 - опори, виміряні при напрузі, що відповідає 10 і 100% номінальної потужності розсіювання резистора. Значення коефіцієнта напруги коливається для різних типів резисторів від одиниць до десятків процентів.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями, перевірити підготовку обладнання для роботи.

2. Для наданих резисторів за умовними позначеннями визначити їх основні параметри. Результати записати у звіт.

3. Використовуючи необхідні для цього вимірювальні прилади (Ц4372, Ф4320, В7-16А) експериментально визначити опір заданих резисторів.

4. Порівняти експериментально отримані значення опору з номінальними позначеннями на резисторах.

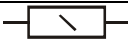
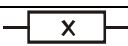
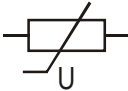
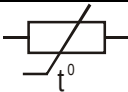
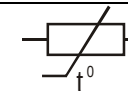
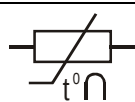
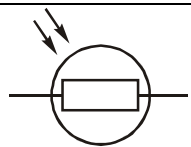
5. Підрахувати відносне відхилення кожного значення опору резисторів від номіналу за формулою

$$\partial R = \frac{R_{\text{вим}} - R_{\text{ном}}}{R_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$

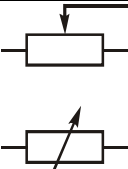
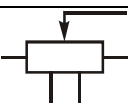
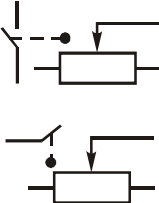
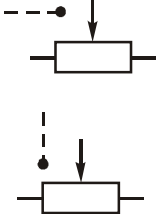
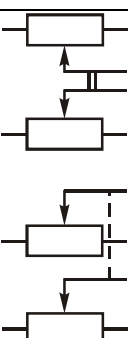
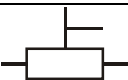
де $R_{\text{вим}}$ - виміряне значення опору, $R_{\text{ном}}$ - номінальне значення опору.

6. Зробити висновки щодо знаходження підрахованих ∂R в полі допуску кожного з резисторів.

Резистори постійні

Найменування елемента	Позначення за діючим ГОСТ	Інші позначення
Загальне позначення		—
3 виводами		—
3 номіальною потужністю розсіювання 0,05Вт		—
Те саме 0,125 Вт		—
Те саме 0,25 Вт		—
Те саме 0,5 Вт		—
Те саме 1 Вт		—
Те саме 2 Вт		—
Те саме 5 Вт		—
Те саме 10 Вт		—
Варистор		—
Терморезистор прямого нагріву		—
Терморезистор з підігрівом 		
Фоторезистор		—

Резистори змінні та підстроювальні

Найменування елемента	Позначення за діючим ГОСТ	Інші позначення
Змінний резистор, реостат, загальне позначення	або 	—
Змінний резистор, який використовується в якості потенціометра		—
Змінний резистор з виводами		—
Змінний резистор з вимикачем, який зображено разом з ним	або 	—
Змінний резистор з вимикачем, який зображено окремо від нього	або 	—
Змінний резистор подвійний	або 	—
Підстроювальний реостат		—
Підстроювальний резистор-потенціометр		—

Контрольні питання

1. Як класифікують лінійні резистори?
2. Система скорочених умовних позначень резисторів.
3. Основні електричні параметри та характеристики резисторів.
4. Що таке номінальна потужність та робоча напруга резисторів.
5. Що таке номінальний опір та допуск резисторів
6. Що таке ТКО.
7. Шуми резисторів.

Питання для самостійної роботи

1. *Напівпровідникові нелінійні резистори (терморезистори, варістори, магніторезистори) – основні параметри та типи [1].*
2. *Технології поверхневого монтажу пасивних радіокомпонентів та їх маркування (SMD-технології)[6].*

Рекомендована література

1. *Партала О. Н.* Радиокомпоненты и материалы: Справочник. – К.: Радиоаматор, М.: КУБК-а, 1998. – 720 с.
2. *Терещук Р. М. и др.* Полупроводниковые приёмно-усилительные устройства: Справ. радиолюбителя. – К.: Наукова думка, 1989. – 800 с.
3. *Боровский В. П., Костенко В. И. и др.* Справочник по схемотехнике для радиолюбителя. – К.: Техніка, 1987. – 432 с.
4. *Скаржепа В. А., Луценко А. Н.* Электроника и микросхемотехника: Учебник: В 2ч. – К.: Вища школа, 1989. – Ч. 1. – 432 с.
5. *Могилевский Н. Н. и др.* Общая радиотехника. – Киев: “Вища школа”, 1978. - 344с.
6. *Бахметьев А. А.* Маркировка электронных компонентов. – М.: «Додэка», 1999. - 160с.

Лабораторна робота № 2

Дослідження основних параметрів конденсаторів

Мета роботи – вивчити класифікації, системи позначень та дослідити основні параметри конденсаторів.

Загальні теоретичні відомості

1. Класифікація конденсаторів

Електричні конденсатори призначені для створення на ділянці електричного кола певної ємності.

Конденсатори, ємність яких не залежить від величини прикладеної напруги, називають лінійними.

За характером зміни ємності вони поділяються на конденсатори постійної ємності, підстроювальні та змінної ємності.

Конденсатори розрізняють за такими ознаками: характером зміни ємності, способом захисту від зовнішніх впливаючих факторів, призначенням, способом монтажу та видом діелектрика.

За способом захисту від зовнішніх впливаючих факторів розрізняють конденсатори незахищені, захищені, неізольовані з покриттям або без покриття, ізольовані, герметизовані за допомогою керамічних або металевих корпусів або скляних колб.

За призначенням конденсатори поділяють на конденсатори загального призначення та спеціальні.

За видом діелектрика конденсатори ділять на групи: з органічним, неорганічним, окисним та газоподібним діелектриком.

В залежності від матеріалу діелектрика поділяють на керамічні, слюдяні, скляні та склокерамічні, паперові, плівкові та електролітичні конденсатори.

У електролітичних конденсаторах у якості діелектрика використовують тонкий шар оксиду металу, що нанесений на метал шляхом електролізу. Завдяки відносно малій товщині та великій діелектричній проникності шару вдається отримати великі ємності при відносно малих розмірах конденсатора. Особливістю цих конденсаторів є необхідність строгого дотримання полярності при вмиканні.

В основу класифікації конденсаторів покладено розподіл їх на групи за видом застосованого діелектрика і за конструктивними особливостями, що визначає використання їх у конкретних колах апаратури (табл. 2.1). Вид діелектрика визначає основні електричні параметри конденсаторів: опір ізоляції, стабільність ємності, втрати і інше. Конструктивні

особливості визначають характер їх застосування: заводозаглушувальні, підстроювальні, дозиметричні, імпульсні й ін.

Таблиця 2.1

Умовне позначення конденсаторів в залежності від матеріалу діелектрика

Підклас конденсаторів	Група конденсаторів	Позначення групи
Конденсатори постійної ємності	Керамічні на номінальну напругу нижче 1600 В	10
	Керамічні на номінальну напругу 1600 В и вище	15
	Скляні	21
	Склянокерамічні	22
	Тонкоплівкові	26
	Слюдяні малої потужності	31
	Слюдяні великої потужності	32
	Паперові на номінальну напругу 2 кВ, фольгові	40
	Паперові на номінальну напругу 2 кВ і вище, фольгові	41
	Паперові металізовані	42
	Оксидно-електролітичні алюмінієві	50
	Оксидно-електролітичні танталові, ніобієві й ін.	51
	Об'ємно-пористі	52
	Оксидно-напівпровідникові	53
	З повітряним діелектриком	60
	Вакуумні	61
	Полістирольні	71(70)
	Фторопластові	72
	Поліетілентерефталатні	73(74)
	Комбіновані*	75
Підстроєчні конденсатори	Лакоплівкові	76
	Полікарбонатні	77
	Поліпропиленові	78
	Вакуумні	1
Конденсатори змінної ємності	З повітряним діелектриком	2
	З газоподібним діелектриком	3
	З твердим діелектриком	4
	Вакуумні	1
	З повітряним діелектриком	2
	З газоподібним діелектриком	3
	З твердим діелектриком	4

* Комбінований діелектрик складається з певного сполучення шарів різноманітних матеріалів.

2. Система умовних позначень і маркування

Для старих типів конденсаторів в основу умовних позначень бралися конструктивні, технологічні, експлуатаційні й інші ознаки (наприклад: КД

- конденсатори дискові; ФТ - фторопластові теплостійкі; КТП - конденсатори трубчасті прохідні).

Умовне позначення конденсаторів може бути скороченим та повним. Скорочене умовне позначення складається з таких елементів:

перший елемент позначення – літера або сполучення літер, що визначають конденсатор (К – конденсатор постійної ємності, КТ – підстроювальний конденсатор, КП – конденсатор змінної ємності, КС – конденсаторні зборки);

другий елемент позначення – число, що вказує на вид діелектрика, який використовується;

третій елемент позначення – порядковий номер розробки конкретного типу.

В залежності від розмірів конденсаторів використовуються повні або скорочені (кодовані) позначення номінальних ємностей та відхилень, що допускаються. Кодоване позначення складається з цифр, що позначають номінальну ємність, та букви, що позначає одиницю вимірювання ємності та вказує на положення коми десяткового дробу.

Маркування на конденсаторах може бути буквено-цифрове, що містить скорочене позначення конденсатора, номінальну напругу, ємність, допуск, групу ТКЄ, дату виготовлення, або колірне.

У залежності від розмірів конденсаторів застосовуються повні або скорочені (кодовані) позначення номінальних ємностей і їх допустимих відхилень. Безкорпусні конденсатори не маркуються, а їхні характеристики вказуються на упаковці.

Повне позначення номінальних ємностей складається з цифрового значення номінальної ємності і позначення одиниці вимірювання (пФ - пікофаради, мкФ - мікрофаради, Ф - фаради).

Кодоване позначення номінальних ємностей складається з трьох або чотирьох знаків, що включають дві або три цифри і букву. Буква з російського або латинського алфавіту позначає множник, що складає значення ємності, і визначає положення коми десяткового знаку. Букви П (р), Н (n), М (μ), І (m), Ф (F) позначають множники 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} , 10^0 . Наприклад, 2,2 пФ позначається 2П2 (2р2), 1500 пФ - 1Н5 (1n5), 0,1 мкФ - М1 (μ1), 10 мкФ - 10 М (10μ), 1 Ф - 1Ф0 (1F0).

Допустимі відхилення ємності (у відсотках або в пікофарадах) маркуються після номінального значення цифрами або кодом (табл. 2.2).

Кольорове маркування використовується для позначення номінальної ємності, допустимого відхилення ємності, номінального значення напруги до 63 В (табл. 2.3) і групи ТКЄ (табл. 2.5). Маркування наносять у вигляді кольорових точок або смужок.

3. Параметри конденсаторів

3.1. Номінальна ємність і допустиме відхилення ємності.

Номінальна ємність (C_N) - ємність, значення якої позначено на конденсаторі або зазначено в супровідній документації. Фактичне значення ємності може відрізнятися від номінальної на величину допустимого відхилення. Номінальні значення ємності стандартизовані і вибираються з певних рядів чисел шляхом множення або ділення їх на 10^n , де n - ціле додатне або від'ємне число. Найбільше уживані ряди номінальних ємностей приведені в табл. 2.4 (значення допустимих відхилень ємностей див. у табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Допустимі відхилення ємності від номінального значення

Допустиме відхилення ємності, %	Код	Допустиме відхилення ємності, %	Код	Допустиме відхилення ємності, пФ	Код
$\pm 0,1$	B(Ж)	± 20	M(B)	$\pm 0,1$	B
$\pm 0,2$	C(Y)	± 30	N(Φ)	$\pm 0,25$	C
$\pm 0,5$	D(Д)	-10 +30	O -	$\pm 0,5$	D
± 1	F(P)	-10 +50	T(Э)	± 1	F
± 2	G(Л)	-10 +100	Y(Ю)		
± 5	I(И)	-20 +50	S(Б)		
± 20	K(C)	-20 +80	Z(A)		

Примітка. У скобках зазначене старе позначення.

Таблиця 2.3

Колірні коди для маркування конденсаторів

Колірний код	Номінальна ємність, пф		Допустиме відхилення ємності	Номінальна напруга, В
	Перша і друга цифри	Множник		
Сірий	-	-	-	3,2
Чорний	10	1	$\pm 20\%$	4
Коричневий	12	10	$\pm 1\%$	6,3
Червоний	15	10^2	$\pm 2\%$	10
Оранжевий	18	10^3	$\pm 0,25\text{пФ}$	16
Жовтий	22	10^4	$\pm 0,5\text{пФ}$	40
Зелений	27	10^5	$\pm 5\%$	25 або 20
Блакитний	33	10^6	$\pm 1\%$	32 або 30
Фіолетовий	39	10^7	-20...+50%	50
Сірий	47	10^{-2}	-20...+80%	-
Білий	56	10^{-1}	-	63
Срібний	68	-	-	2,5
Золотий	82	-	-	1,6

3.2. Номінальна напруга

Це напруга (U_H), що позначена на конденсаторі (або вказана в документації), при якій він може працювати в заданих умовах протягом терміну служби зі збереженням параметрів у допустимих межах. Номінальна напруга залежить від конструкції конденсатора і властивостей застосовуваних матеріалів. При експлуатації напруга на конденсаторі не повинна перевищувати номінальної. Для багатьох типів конденсаторів із збільшенням температури (як правило, більш 70...85 °С) допустима напруга (U_t) знижується.

Таблиця 2.4

Найбільше уживані ряди номінальних значень ємностей

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1	1	1	1		3,3	3,3	3,3
			1,1				3,6
		1,2	1,2			3,9	3,9
			1,3				4,3
	1,5	1,5	1,5	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,6				5,1
		1,8	1,8			5,6	5,6
			2				6,2
2,2	2,2	2,2	2,2		6,8	6,8	6,8
2			2,4				7,5
		2,7	2,7			8,2	8,2
			3				9,1

3.3. Тангенс кута втрат

Тангенс кута втрат ($\tan \phi$) характеризує активні втрати енергії в конденсаторі.

Величина, обернена тангенсу кута втрат, називається **добротністю конденсатора**. Добротність конденсатора визначає відношення реактивної потужності до потужності втрат та для дійсного значення напруги U дорівнює:

$$Q = \frac{1}{\tan \phi} = \frac{P_p}{P_\phi} = \frac{U^2 / X_c}{U^2 / R_{i3}} = \omega C R_{i3}, \quad (2.1)$$

де ω - кутова частота, R_{i3} – опір ізоляції.

Значення тангенса кута втрат у керамічних високочастотних, слюдяних, полістирольних і фторопластових конденсаторів лежать у межах $(10...15) \cdot 10^{-4}$, Полікарбонатних $(15...25) \cdot 10^{-4}$, керамічних низькочастотних 0,035, оксидних конденсаторів $(5...35)\%$, поліетилентерефталатних 0,01...0,012.

3.4. Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ)

Це параметр, що застосовується для характеристики конденсаторів із лінійною залежністю ємності від температури. Визначає відносну зміну ємності від температури при зміні її на один градус Цельсія. Значення ТКЄ деяких конденсаторів і їхніх кодованих позначень приведені в табл. 2.5.

3.5. Опір ізоляції і струм відтоку

Ці параметри характеризують якість діелектрика і використовуються при розрахунках високомегаомних, часозадаючих і слабкострумівих кіл. Найвищий опір ізоляції у фторопластових, полістирольних і поліпропиленових конденсаторів, трохи нижчий в низькочастотних керамічних, полікарбонатних і лавсанових конденсаторів. Найнижчий опір ізоляції в сегнетокерамічних конденсаторів.

Для оксидних конденсаторів задають струм відтоку, значення якого пропорційні ємності і напрузі. Найменший струм відтоку мають танталові конденсатори (від одиниць до десятків мікроампер), в алюмінієвих конденсаторів струм відтоку, як правило, на один-два порядки вищий.

Таблиця 2.5

Значення ТКЄ керамічних конденсаторів і їхні умовні позначення

Позначення груп ТКЄ	Номинальне значення ТКЄ (10^{-6}), $1/^{\circ}\text{C}$	Кольоровий код		
		Нові позначення*	Старе позначення	
			Колір покриття конденсаторів	Маркувальна точка
П100	+100(+120)	Червоний + Фіолетовий	Синій	-
П60	+60	-	»	Чорна
П33	+33	Сірий	Сірий	-
МП0	0	Чорний	Голубий	Чорна
М33	-33	Коричневий	»	Коричнева
М47	-47	Голубий + Червоний	»	-
М75	-75	Червоний	»	Червона
М150	-150	Оранжевий	Червоний	Оранжева
М220	-220	Жовтий	»	Жовта
М330	-330	Зелений	»	Зелена
М470	-470	Голубий	»	Синя
М750(М700)	-750(-700)	Фіолетовий	»	-
М1500(М1300)	-1500(-1300)	Оранжевий+ Оранжевий	Зелений	-
М2200	-2200	Жовтий+ Оранжевий	»	Жовта

* У випадках, коли для позначення групи ТКЄ потрібно два кольори, другий колір може бути поданий кольором корпусу.

Слюдяні і полістирольні конденсатори мають ТКЄ в межах $(50...200) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$, Полікарбонатні $\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. Для конденсаторів з іншими видами діелектрика ТКЄ не нормується. Допустима зміна ємності сегнетокерамічних конденсаторів із нелінійною залежністю ТКЄ приведена в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Зміна ємності керамічних конденсаторів із ненормованим ТКЄ

Умовне позначення груп	Зміна ємності від -60 до $+85$ $^{\circ}\text{C}$	Нове позначення*	Старе позначення	
			Колір покриття	Колір маркувального знаку
H10	± 10	Оранжевий + чорний	Оранжевий	Чорний
H20	± 20	Оранжевий + червоний	»	Червоний
H30	± 30	Оранжевий + зелений	»	Зелений
H50	± 50	Оранжевий + голубий	»	Синій
H70	-70	Оранжевий + фіолетовий	»	-
H90	-90	Оранжевий + білий	»	Білий

* У випадках, коли для позначення групи потрібно два кольори, другий колір може бути поданий кольором корпусу.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями, перевірити підготовку обладнання для роботи.
2. Для заданих конденсаторів за умовними позначеннями визначити їх основні параметри.
3. Використовуючи необхідні для цього вимірювальні прилади (Ц4372, Ф4320, В7-16А), попередньо ознайомившись з їх роботою, експериментально визначити основні параметри заданих радіокомпонентів.
4. Порівняти експериментально отримані результати з розрахунковими, зробити необхідні висновки щодо похибок вимірювань.
- 5.

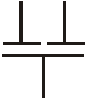
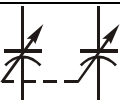
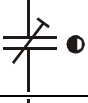
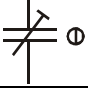
Контрольні питання

1. Основні параметри конденсаторів постійної ємності.
2. Найбільш відомі типи електролітичних та керамічних конденсаторів постійної ємності.
3. Основні параметри та типи відомих підстроювальних конденсаторів.

Питання для самостійної роботи

1. Технології виготовлення електролітичних та керамічних конденсаторів для друкованого монтажу [2].

Конденсатори

Найменування елемента	Позначення за діючим ГОСТ	Інші позначення
Постійної ємності (загальне позначення)		
Електролітичний полярний		
Ел. неполярний		—
Постійної ємності, двосекційний (у виводів анодів двосекційного електролітичного конденсатора ставлять знак +)		—
Прохідний (дуга позначає корпус, зовнішній електрод)		
Опорний		
Змінної ємності (дуга або точка позначає ротор)		
Багатосекційний, наприклад двосекційний змінної ємності (блок КПЕ) (конденсатори, які входять в блок, можуть бути рознесені за схемою)		
Змінної ємності, диференціальний		
Підстроювальний (загальне позначення)		
Підстроювальний, регулювання інструментом, вісь виведена назовні		
Підстроювальний, регулювання інструментом, вісь всередині пристрою		

Рекомендована література

1. *Партала О. Н.* Радиоконпоненты и материалы: Справочник. – К.: Радиоаматор, М.: КУБК-а, 1998. – 720 с.
2. *Терещук Р. М. и др.* Полупроводниковые приёмно-усилительные устройства: Справ. радиолюбителя. – К.: Наукова думка, 1989. – 800 с.
3. *Бахметьев А. А.* Маркировка электронных компонентов. – М.: «Додэка», 1999. - 160с.

Лабораторна робота № 3

Дослідження характеристик електричних сигналів

Мета роботи – дослідження основних параметрів електричних сигналів різноманітної форми.

Загальні теоретичні відомості і методичні вказівки

Електричний сигнал це електричний процес, що несе в собі інформацію. Кількість інформації, яка може бути передана за допомогою деякого сигналу, залежить від основних його параметрів: тривалості, смуги частот, потужності і деяких інших характеристик.

Сигнали поділяються на детерміновані та випадкові. Детермінований сигнал – це сигнал, параметри і миттєве значення якого в будь-який момент часу можуть бути передбачені з імовірністю одиниці. Прикладами детермінованих сигналів можуть служити імпульси або пачки імпульсів, форма, значення і положення в часі яких відомі (рис. 3.1, *a-e*), а також безперервний сигнал із заданими амплітудними та фазовими співвідношеннями усередині його спектра (рис. 3.1, *ж,з*). Детерміновані сигнали поділяються на періодичні та неперіодичні.

Періодичним називається будь-який сигнал, для якого виконується умова $u(t)=u(t+kT)$, де T – період проходження, а k - будь-яке ціле число. Найпростішим періодичним детермінованим сигналом є гармонічне коливання, наприклад, напруга, яка обумовлена законом $u(t)=U_m \sin(\omega t - \psi)$, де U_m , T , $\omega=2\pi/T$, ψ – відповідно амплітуда, період, кругова частота і початкова фаза коливань.

Будь-який складний періодичний сигнал може бути поданий у вигляді суми гармонічних коливань із частотами, кратними основній частоті $\omega=2\pi/T$.

Неперіодичним детермінованим сигналом називається будь-який детермінований сигнал, для якого не виконується умова $u(t)=u(t+kT)$. Прикладами таких сигналів можуть служити імпульси, пачки імпульсів, частини гармонічних коливань і т. д.

До випадкових сигналів відносяться сигнали, значення яких заздалегідь не відомі і можуть бути передбачені лише з деякою імовірністю.

Надалі будемо розглядати детерміновані імпульсні та синусоїдні сигнали.

На практиці найчастіше використовують імпульси прямокутної, трапецеїдальної, трикутної та пилкоподібної форми (рис. 3.1, *a-d*). Тут зображені імпульси ідеальної форми, які варто розглядати як зразки імпульсів реальної форми.

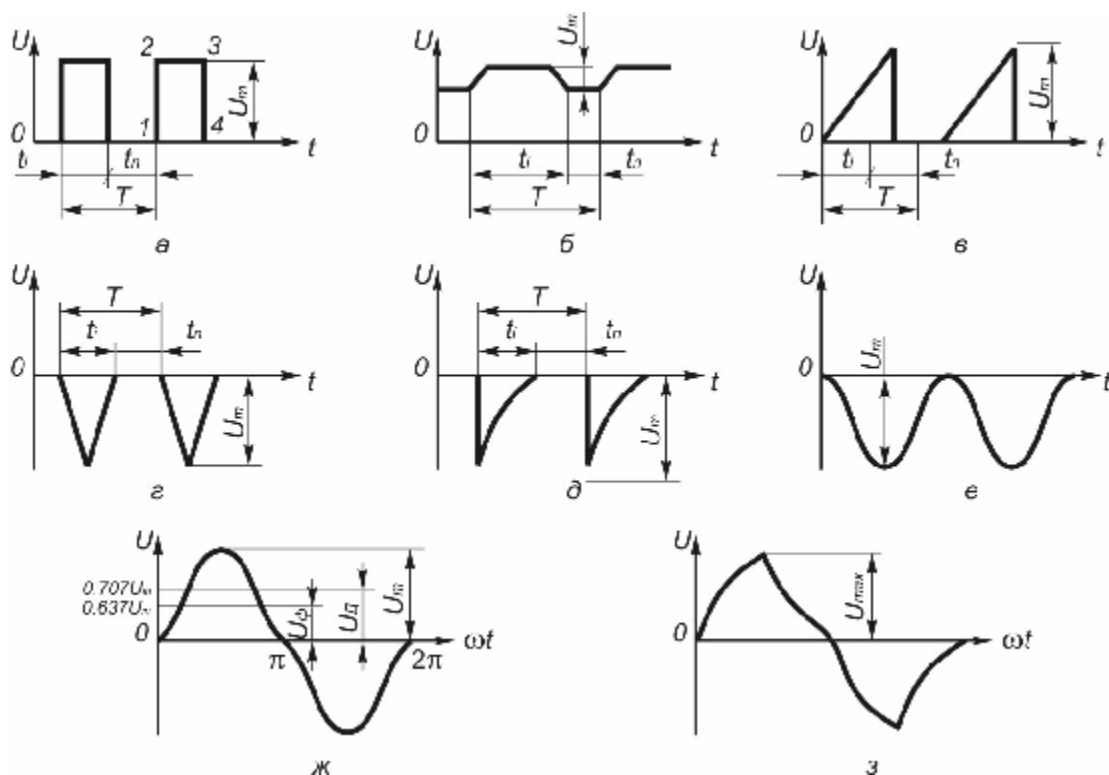


Рис. 3.1. Форми імпульсів електричних сигналів

Періодична послідовність імпульсів (рис. 3.1, а-е) характеризується періодом повторення (проходження) T – відрізком часу між початком двох сусідніх однополярних імпульсів. Відношення тривалості імпульсу до періоду повторення називають коефіцієнтом заповнення, тобто $k_z = t_i/T$. Коефіцієнт заповнення звичайно лежить у межах від 0,5 до 10^{-4} . Малі значення коефіцієнта заповнення характерні для радіолокаційних пристроїв, найбільші – для пристроїв обчислювальної техніки.

Періодична послідовність імпульсів характеризується також середнім значенням імпульсу за період і за час тривалості імпульсу. Середнє значення напруги, струму і потужності імпульсного сигналу за період при активному навантаженні одержуємо з рівнянь:

$$U_{сep} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{k_z}{t_i} \int_0^{t_i} u(t) dt = k_z U_i;$$

$$I_{сep} = k_z I_i; \quad P_{сep} = k_z P_i$$

де $u(t)$ - аналітичне вираження форми кривої напруги імпульсу;
 U_i, I_i, P_i - відповідно середнє значення напруги, струму і потужності за час тривалості імпульсу - $U_i = \frac{1}{t_i} \int_0^{t_i} u(t) dt$.

Потужність джерела живлення пристрою формування імпульсів повинна бути не менша $P_{сep}$, тобто $P_{дж} \geq P_{сep}$. Тому, накопичуючи

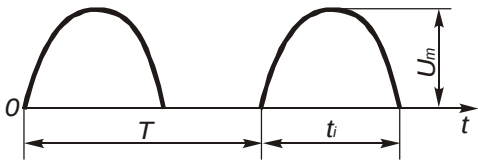
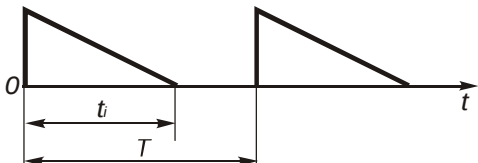
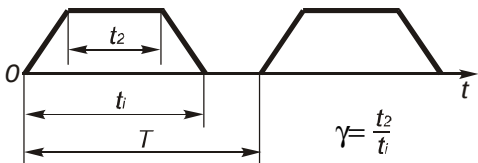
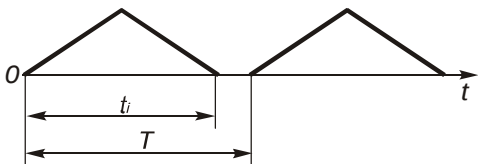
протягом паузи безупинно енергію, можна віддавати в навантаження потужність в імпульсі P_i в $1/k_3$ разів більшу потужності джерела живлення

Діюче (ефективне) значення напруги послідовності імпульсів за період визначається формулою

$$U_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{k_3}{t_i} \int_0^{t_i} u^2(t) dt} = \sqrt{k_3} U_i \quad (3.1)$$

В таблиці 3.1 наведені значення $P_{сер}$, $U_{сер}$, U_D в залежності від форми імпульсу.

Таблиця 3.1

Форма імпульсу	$U_{сер}$	U_D	$P_{сер}$
	$\frac{2k_3 U_m}{p}$	$\frac{\sqrt{k_3} U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{k_3 P_i}{2}$
	$\frac{k_3 U_m}{2}$	$\frac{\sqrt{k_3} U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{k_3 P_i}{3}$
	$\frac{k_3 U_m (1+g)}{2}$	$\frac{U_m \sqrt{k_3} (1+g)}{\sqrt{3}}$	$\frac{k_3 P_i (1+g)}{3}$
	$\frac{k_3 U_m}{2}$	$\frac{\sqrt{k_3} U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{k_3 P_i}{3}$

Крім параметрів періодичної послідовності імпульсів важливе значення мають параметри форми імпульсів. Характерними ділянками імпульсу, що визначають його форму, є (рис. 3.2): *передній фронт* 1 – 2, *вершина* 2 – 3, *задній фронт* 3 – 4.

В імпульсах різноманітної форми окремі ділянки можуть бути відсутні. Кількісну оцінку форми імпульсів і властивостей його окремих ділянок розглянемо на прикладі реального імпульсу прямокутної форми.

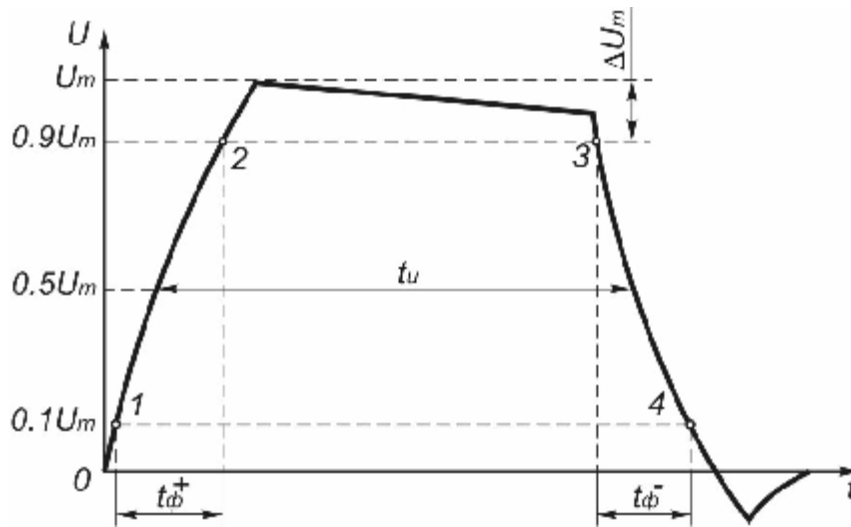


Рис. 3.2. Параметри форми імпульсів

Основними параметрами форми імпульсів є: амплітуда або найбільший розмір імпульсу U_m , тривалість імпульсу t_i , тривалість переднього фронту t_{ϕ}^+ , тривалість заднього фронту (зрізу) t_{ϕ}^- , спад вершини імпульсу ΔU_m .

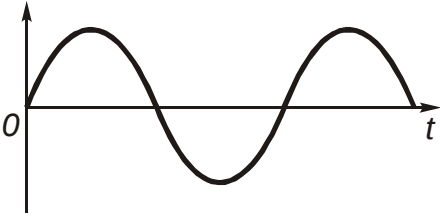
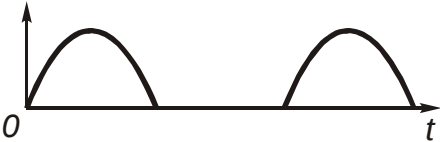
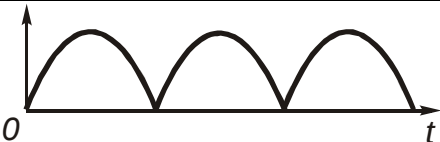
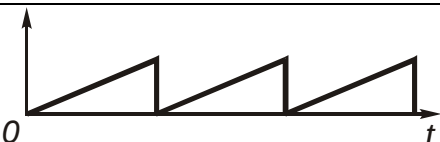
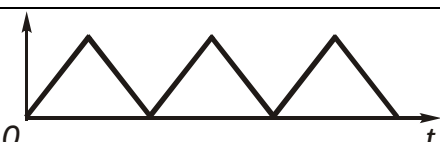
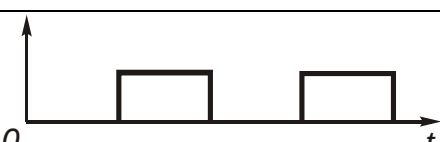
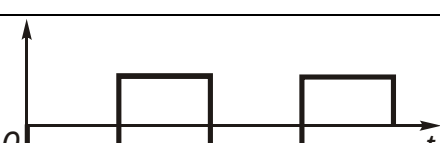
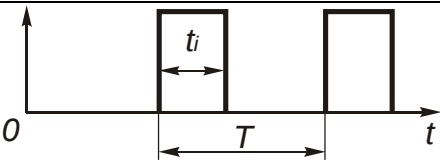
При оперуванні з реальними імпульсами параметри вимірюють на рівні $0,1U_m$ або $0,5U_m$, рахуючи від основи. У імпульсних пристроях автоматики тривалість імпульсів лежить у межах $10^{-9} \dots 1$ с. Інтервали часу, що відповідають тривалості переднього t_{ϕ}^+ і заднього t_{ϕ}^- фронтів імпульсу, звичайно відраховують між рівнями $0,1U_m \dots 0,9U_m$ і $0,9U_m \dots 0,1U_m$. Це активні тривалості переднього і заднього фронтів імпульсу, що складають звичайно (5...20%) t_i . Чим менше відношення t_{ϕ}^+/t_i та t_{ϕ}^-/t_i , тим ближче форма імпульсу наближається до прямокутної. Сталість вершини імпульсу протягом його тривалості є однією із найважливіших вимог до формувачів і генераторів імпульсів. Проте через недосконалість названих пристроїв спостерігається деякий спад вершини імпульсу ΔU_m . Часто замість абсолютного значення спаду використовують відносне, що визначається відношенням $\Delta U_m/U_m$. У деяких імпульсів (трикутних, експоненціальних та ін.) плоска вершина відсутня і в точці вершини фронт переходить відразу в зріз. Спад вершини імпульсу бажано мати по можливості найменшим. Часто потрібно, щоб ΔU_m було не більш $(0,01 \dots 0,005)U_m$.

Змінна напруга синусоїдної форми характеризується миттєвим та середньоквадратичним (діючим) значеннями напруги, амплітудою U_m , частотою ω і фазою φ :

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.2)$$

Миттєве значення u можна виміряти за осцилограмою, середньоквадратичне U_d і амплітудне U_m обчислити або виміряти відповідно вольтметром.

Таблиця 3.2

Форма напруги	Графік	Коефіцієнт амплітуди	Коефіцієнт форми
Синусоїдна		1,41	1,11
Пульсуюча (однопів-періодного випрямляча)		2	1,57
Пульсуюча (двопів-періодного випрямляча)		1,41	1,11
Пилкоподібна		2,51	1,67
Трикутна (симетрична)		1,73	1,16
Прямокутна (симетрична)		1,41	1,41
Прямокутна (меандр)		1,0	1,0
Прямокутна (послідовність однополярних імпульсів)		$\sqrt{\frac{T}{t_i}}$	$\sqrt{\frac{T}{t_i}}$

Амплітудне значення U_m – максимальне значення напруги з усіх значень за період.

Діюче (середньоквадратичне значення синусоїдальної напруги):

$$U_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m \quad (3.3)$$

Зв'язок між діючими і амплітудним напругами виражається у вигляді залежності $U_D = U_m/k_a$, де k_a – коефіцієнт амплітуди. На практиці використовують також параметр середньовипрямленого значення:

$$U_{сеп} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt = \frac{U_D}{k_\phi} = \frac{U_m}{k_a k_\phi}, \quad (3.4)$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми.

Для синусоїдної напруги $k_\phi = 1,11$. Якщо ж сигнал має форму, відмінну від синусоїдної, то він характеризується піковим значенням у позитивній U_{max}^+ та негативній U_{max}^- півхвилях (рис. 3.1, з), діючим, середньовипрямленим значеннями. При сигналі складної форми, коли є багато гармонічних складових, його діюча напруга дорівнює:

$$U_D = \sqrt{U_{сеп}^2 + U_1^2 + \dots + U_q^2} \quad (3.5)$$

У таблиці 3.2 дані приклади різноманітних форм напруг і відповідні їм коефіцієнти k_a та k_ϕ .

У лабораторній роботі будуть досліджуватися імпульсні сигнали (рис. 3.1, а-е).

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями, перевірити підготовку обладнання до роботи. До складу обладнання входять генератор імпульсів спеціальної форми і осцилограф.
2. Записати аналітичну залежність $u(t)$ для кожного імпульсу або окремих його частин. Параметри імпульсів задаються викладачем.
3. Знайти активну тривалість імпульсу. Для цього необхідно розв'язати рівняння $u(t) = 0,1 U_m$ при $t = t^{0,1}_+$ та $t = t^{0,1}_-$, де $t^{0,1}_+$ і $t^{0,1}_-$ – моменти часу відповідно на передньому і задньому фронтах імпульсу, при яких амплітуда імпульсу дорівнює $0,1 U_m$. З отриманих розв'язків визначають параметри $t^{0,1}_+$ і $t^{0,1}_-$. Активна тривалість імпульсу $t_a = t^{0,1}_- - t^{0,1}_+$.
4. Знайти тривалості переднього і заднього фронтів імпульсів, що визначаються в інтервалі зміни напруги фронтів від $0,1$ до $0,9 U_m$. Для цього необхідно розв'язати рівняння $u(t) = 0,1 U_m$ при $t = t^{0,1}_+$ та $t = t^{0,1}_-$; $u(t) = 0,9 U_m$ при $t = t^{0,9}_+$ та $t = t^{0,9}_-$, із яких знаходять значення $t^{0,1}_+$, $t^{0,1}_-$, $t^{0,9}_+$, $t^{0,9}_-$. Тривалість переднього t_+ і заднього t_- фронтів визначають за формулами:

$$t_+ = t^{0,1}_+ - t^{0,9}_+, \quad t_- = t^{0,9}_- - t^{0,1}_-$$

5. Експериментально визначити параметри сигналів (прямокутного, трапецеїдального, трикутного і експоненціального).
6. Нарисувати осцилограми зазначених імпульсів.
7. Порівняти результати з розрахованими.

Контрольні питання

1. Які сигнали називаються детермінованими та випадковими?
2. Якими параметрами характеризуються електричні сигнали?
3. Що таке активна тривалість імпульсу?
4. Як визначаються тривалість фронту і зрізу імпульсу?
5. Що таке спад вершини імпульсу?
6. Як визначається приведена енергія імпульсу?

Питання для самостійної роботи

1. Що таке коефіцієнт заповнення?
2. Що таке середнє і діюче значення напруги імпульсної послідовності?
3. Що таке коефіцієнт амплітуди імпульсу?
4. Що таке коефіцієнт форми імпульсу?
5. Якими параметрами імпульсів і імпульсних послідовностей може передаватися інформація?
6. Якими параметрами гармонічних сигналів може передаватися інформація?

Рекомендована література

1. *Скаржепа В. А., Луценко А. Н.* Електроника и микросхемотехника: Учебник: В 2ч. – К.: Вища школа, 1989. Ч.1. - 432 с.
2. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. Радио, 1971. – 672 с.
3. *Гольденберг Л. М.* Импульсные устройства: Учебник. – М.: Радио и связь, 1981. – 222 с.
4. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1978. – 529 с.

Лабораторна робота №4

Дослідження проходження сигналів через лінійні кола

Мета роботи – дослідження електричних процесів при проходженні імпульсів різноманітної форми через диференціюючі та інтегруючі кола.

Загальні теоретичні відомості і методичні вказівки

У електронних пристроях знаходять широке застосування кола, що формують напругу однієї форми з напруги іншої. Таку задачу можна вирішити, використовуючи лінійні елементи, параметри яких (активний опір, ємність, індуктивність, взаємна індуктивність) не залежать від значень і напрямів струмів, що проходять, та прикладених напруг. Струм у такому колі пропорційний вхідній напрузі, тобто залежність між ними виражається прямою лінією.

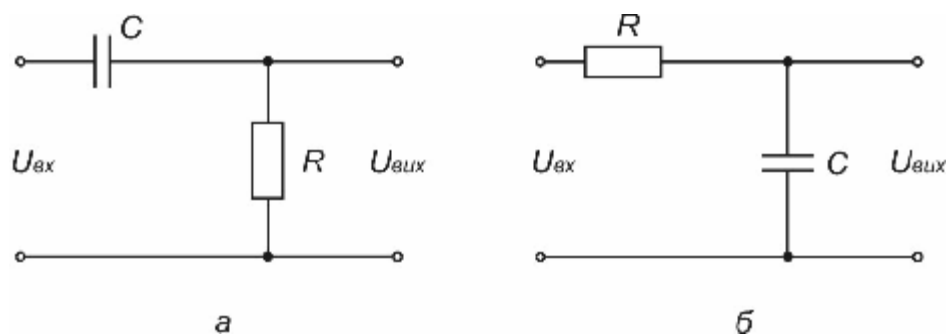


Рис. 4.1 Диференціюючі (а) та інтегруючі (б) кола

При прикладенні до входу лінійного кола синусоїдної напруги на всіх її елементах також буде синусоїдна напруга. Якщо ж на вході лінійного кола, що містить частотно-залежні елементи (наприклад, конденсатор, індуктивна котушка), діє напруга, що являє собою суму гармонік різних частот, то форма напруги на її елементах не повторює форму вхідної напруги. Це пояснюється тим, що гармоніки вхідної напруги по-різному пропускаються цим колом. При цьому співвідношення між їхніми амплітудами, а також фазами на вході кола та його елементів неоднакові. Ця властивість використовується при формуванні імпульсів за допомогою лінійних кіл. Властивості лінійних кіл із частотно-залежними елементами використовуються при побудові диференціюючих та інтегруючих кіл.

Диференціююче коло (рис.4.1, а). Струм через конденсатор пов'язаний із напругою на ньому диференціальною залежністю $i_c = C(du_c/dt)$. Напруга на виході схеми $u_{вих} = i_c R = RC(du_c/dt) = \tau(du_c/dt)$, де $\tau = RC$ – постійна часу кола. Тому що $u_c = u_{вх} - u_{вих}$, тоді:

$$u_{вих} = \tau \frac{du_c}{dt} = \tau \frac{d}{dt}(u_{вх} - u_{вих}) = \tau \frac{du_{вх}}{dt} - \tau \frac{du_{вих}}{dt} \quad (4.1)$$

Перший доданок виразу – корисний результат диференціювання, другий – помилка. Останній зменшується при зменшенні τ (в цьому випадку однаково зменшується і корисний результат).

Помилка відсутня, якщо $dU_{вих}/dt = 0$, тобто коли $u_{вих} = U = \text{const}$. Це пояснюється тим, що в цьому випадку напруга на конденсаторі ($u_c = U_{вх} - U$) змінюється за тим же законом, що і $u_{вх}$. Тому :

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{d}{dt}(u_{вх} - U) = \frac{du_{вх}}{dt}; \quad u_{вих} = t \frac{du_c}{dt} = t \frac{du_{вх}}{dt}, \quad (4.2)$$

тобто, вихідна напруга пропорційна похідній вхідної напруги.

Таким чином, коли на вході кола (рис. 4.1, а) діє постійна напруга $u_{вх} = U_m$ (результат диференціювання дорівнює нулю) або напруга, що

змінюється лінійно $u_{вх} = U_m \frac{t}{t_i}$ (результат диференціювання дорівнює

постійному відмінному від нуля значенню), вихідна напруга, що встановилася – результат її безпомилкового диференціювання (рис. 4.2, а, б).

При впливі на вхід кола (рис. 4.1, а) імпульсу прямокутної форми із нескінченно крутим фронтом (рис. 4.3, а, б, в, г), маємо:

$$u_{вих} = U_m e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.3)$$

тобто, одержимо формулу розрядження конденсатора C на активний опір R , що описує експоненційно падаючу форму вихідного сигналу. Струм розрядження конденсатора C :

$$i_p = \frac{U_m}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.4)$$

Через час $t = \tau$ напруга U_c досягатиме рівня :

$$u_c = U_m(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = U_m(1 - e^{-1}) = 0,63U_m, \quad (4.5)$$

а напруга $u_{вих}$ зменшиться до величини:

$$u_{вих} = U_m - u_c = 0,37U_m. \quad (4.6)$$

Теоретично перехідні процеси тривають нескінченно довго, тому що тільки при $t = \infty$ напруга і струм у RC -кола приймуть сталі значення: $u = U_m$, $u_{вих} = 0$, $i_c = 0$.

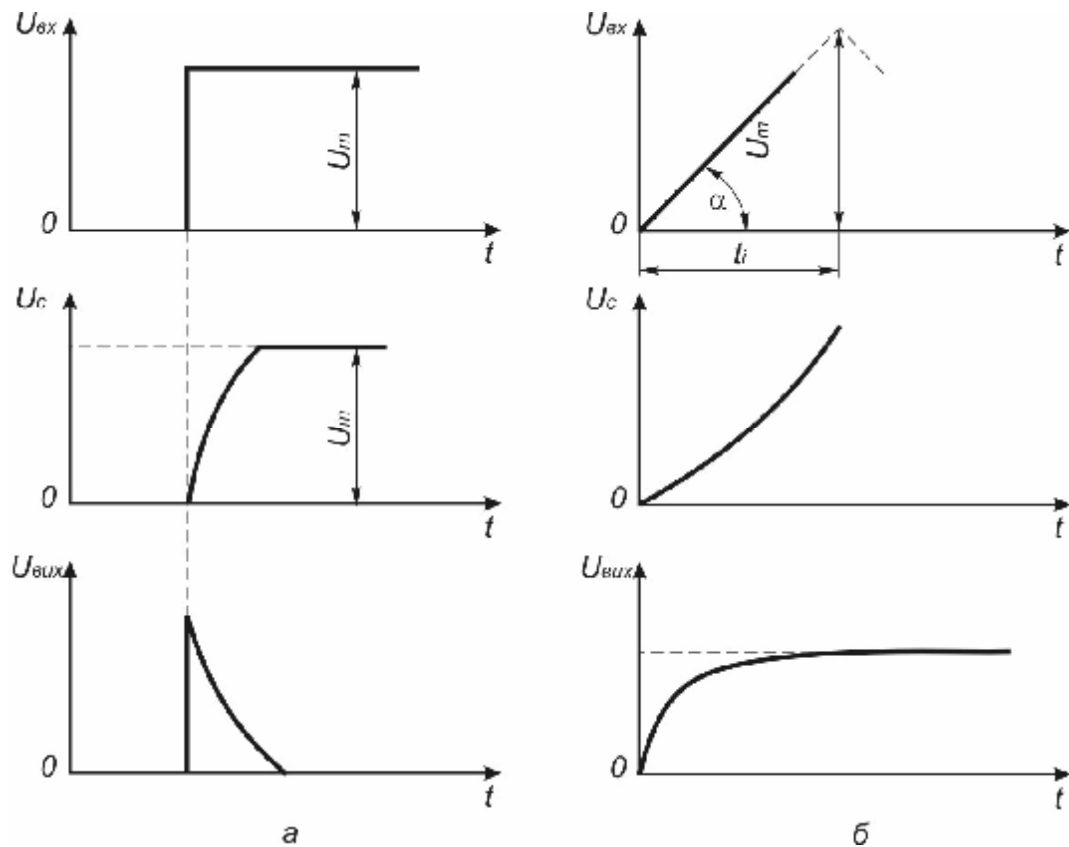


Рис. 4.2

У межах дії імпульсу конденсатор C буде заряджатися за рахунок струму, що протікає в RC -колі. При цьому вихідна напруга буде менша вхідної на значення напруги на конденсаторі. Відбувається завал (сколювання) вершини імпульсу.

Після припинення дії вхідного імпульсу конденсатор C розряджається через резистор R , формуючи на ньому імпульс негативної полярності.

Припускаючи, що вихідний опір живильного генератора дорівнює нулю, падіння напруги на резисторі R при розрядженні конденсатора можна записати у вигляді:

$$u_{вих} = u_C = -U_C e^{-\frac{t}{\tau}} = \Delta U_{вих} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.7)$$

Знайдемо відносний розмір сколювання вершини імпульсу:

$$d_\delta = \frac{\Delta U_{вих}}{U_m} = \frac{u_{вих}(0) - u_{вих}(t)}{u_{вих}(0)} = \frac{U_m - U_m e^{-\frac{t_i}{\tau}}}{U_m} = 1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}} \quad (4.8)$$

На практиці у більшості випадків $d_\delta < 1$, тому виходячи з наближеного співвідношення $1 - e^{-x} \approx x$ при $x \ll 1$, можна записати

$$d_{\epsilon} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_m} \approx \frac{t_i}{t}. \quad (4.9)$$

З останнього виразу можна зробити висновок, що чим довший імпульс, який впливає на RC – кола, тим сколювання вершини буде більше. І навпаки, при малих постійних часу буде спостерігатися різка зміна напруги на виході RC – кола.

У пристроях автоматики найчастіше необхідно зробити передачу або перетворення прямокутного імпульсу, у якого як передній, так і задній фронти мають велику крутість. У залежності від розміру постійної часу RC можливі чотири випадки:

1. Вплив прямокутного імпульсу на прохідне коло. У цьому колі постійна часу $\tau = RC$ повинна бути значно більша тривалості імпульсу, який на нього впливає, тобто $\tau \gg t_i$. Напруги зарядження і розрядження описуються відповідно виразами:

$$u_{Cз} = U_m (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}); \quad u_{Cр} = U_m e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.10)$$

Оскільки постійна часу прохідного кола велика, у колі заряду буде протікати малий струм, конденсатор за час дії імпульсу зарядиться до невеликої напруги. Оскільки $\tau \gg t_i$, то зарядження – розрядження конденсатора протікає практично на лінійній ділянці, і напруга u на рис. 4.3, *a* також є такою, що лінійно змінюється.

З рис. 4.3 *a* очевидно, що вихідний сигнал має завал вершини в межах дії вхідного імпульсу, а після припинення його дії в процесі розрядження конденсатора на резистор R на ньому формується імпульс негативної полярності.

Таким чином, для передачі імпульсів через прохідне коло необхідно вибирати постійну часу, що значно перевищує тривалість вхідного імпульсу.

2. Вплив прямокутного імпульсу на RC – коло, у якого $\tau = t_i$.

Оскільки постійна часу RC – кола $\tau = t_i$, конденсатор встигне зарядитися до напруги, що складає $0,63U_m$.

З схеми рис. 4.3, *a* очевидно, що вхідна напруга імпульсу розподіляється між двома елементами: конденсатором C і резистором R , тому на останньому при $t = t_i$ напруга буде складати $0,37U_m$, (рис. 4.3, *b*).

Конденсатор, що зарядився до напруги $0,67U_m$ після припинення дії вхідного імпульсу при $t = t_i$ почне розряджатися на резистор R , формуючи експоненціальний імпульс негативної полярності, що перевищує за амплітудою той же імпульс, розглянутий у першому випадку.

3. Вплив прямокутного імпульсу на RC – коло, у якого $t_i = 3\tau$.

Відомо [3], що за час 3τ перехідні процеси в RC – колі практично закінчуються. Це значить, що за 3τ конденсатор встигає зарядитися до напруги $0,995U_m$ і за такий же час розрядитися до $0,005U_m$.

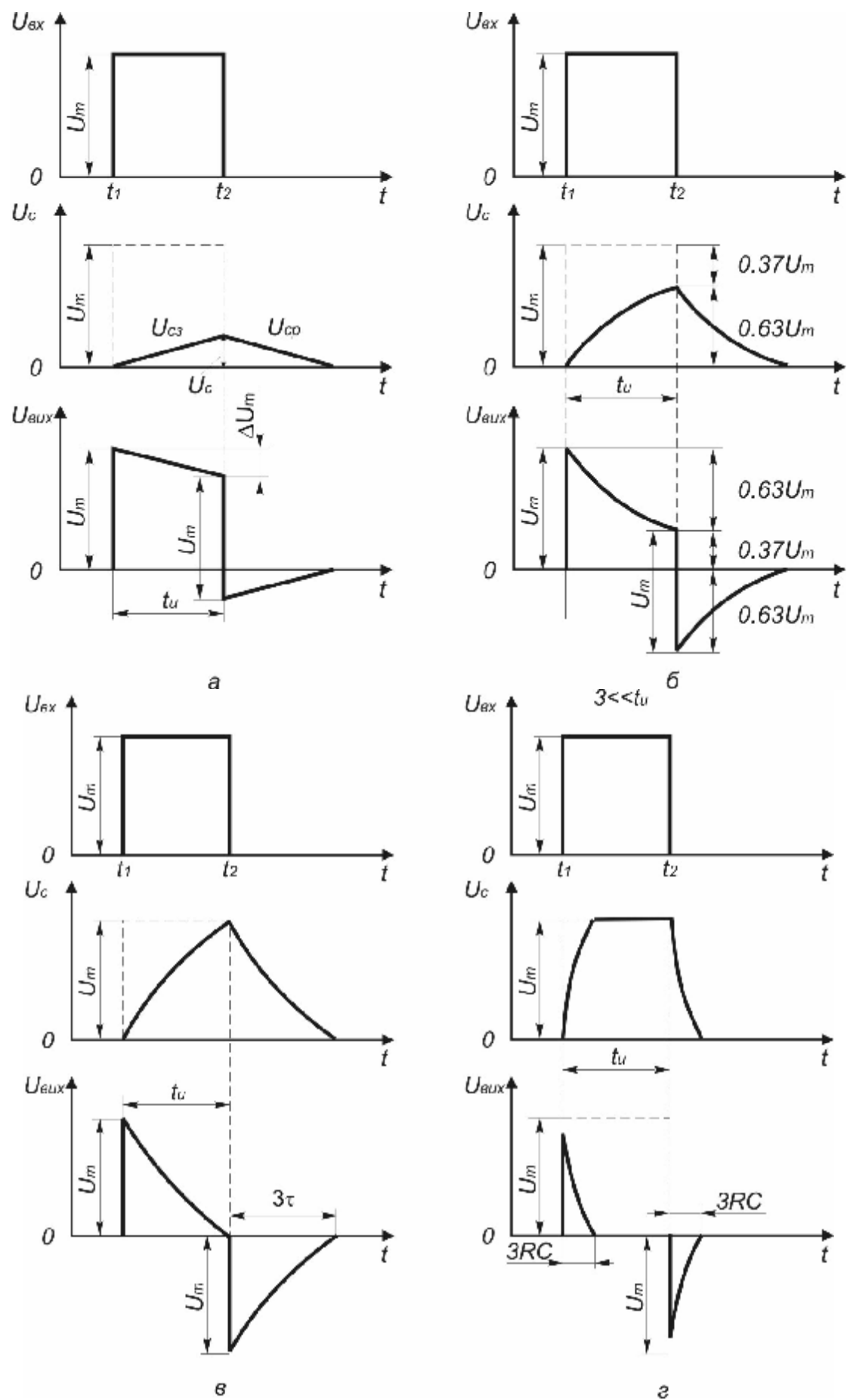


Рис. 4.3

Як впливає з рис. 4.3,а, струм зарядження – розрядження конденсатора на резисторі R формує експоненціальні імпульси однакової амплітуди і тривалості позитивної полярності при зарядженні конденсатора та негативної полярності при його розрядженні.

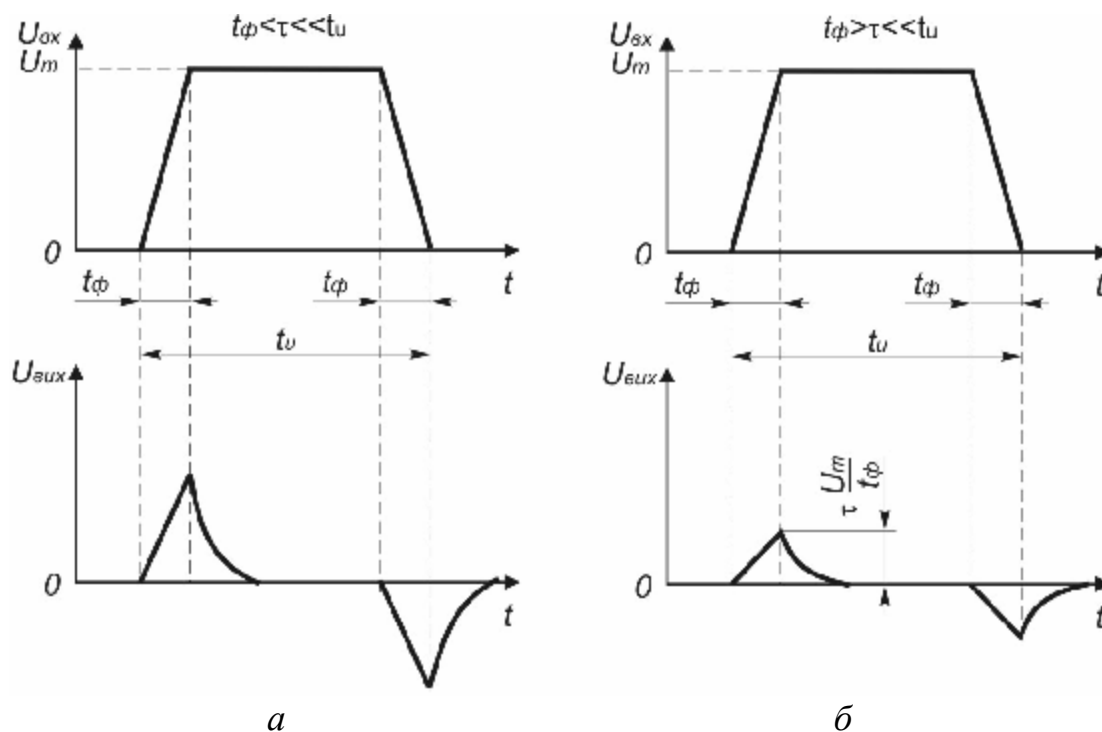


Рис. 4.4

4. Вплив прямокутного імпульсу на диференціююче коло, у якого $\tau < t_i$

Виходячи з того, що $\tau < t_i$, перехідні процеси в RC – колах протікають значно швидше, ніж у попередньому випадку, а їхня тривалість буде як і раніше – залишатися 3τ , тому що й в цьому колі за цей час перехідні процеси повністю закінчуються. Як очевидно з рис. 4.3, з, тривалість вихідного імпульсу в цьому випадку може бути значно менша тривалості вхідного, тому ці кола також є такими, що вкорочують імпульси.

При диференціюванні реальних прямокутних імпульсів, фронти яких мають певну тривалість (рис. 4.4), форма напруги на виході залежить від співвідношення тривалостей фронтів t_ϕ та постійної часу кола τ . Якщо $t_\phi < \tau < t_i$ (рис. 4.4, а), то за час дії фронту вхідного імпульсу конденсатор не встигає зарядитися і напруга на виході практично повторює вхідну напругу. Зарядження конденсатора починається по суті після того, як на вході встановлюється напруга $u_{вх} = U_m = \text{const}$. Із зарядженням конденсатора вихідна напруга швидко зменшується.

Під час дії зрізу вхідного імпульсу напруга на конденсаторі практично не встигає змінитися і залишається рівною U_m . Тому зменшення $u_{вх}$ передається на вихід кола $u_{вих} = u_{вх} - u$, де формується передній фронт

негативного імпульсу, крутість якого дорівнює крутості зрізу вхідного імпульсу. Таким чином, при $t_\phi < \tau < t_i$ коло є диференціалом для вершини вхідного імпульсу.

При $\tau < t_\phi$ (рис. 4.4, б) реакція кола така ж, як при впливі напруги, яка збільшується лінійно (рис. 4.2, б). При дії на вході кола фронту імпульсу на вихід передається зміна вхідної напруги; проте ще під час t_ϕ дії фронту швидкість зарядження конденсатора наближається до швидкості наростання вхідної напруги U_m/t_ϕ . З цього моменту і до закінчення дії фронту вся зміна вхідної напруги виділяється практично на конденсаторі, а напруга на виході залишається постійною.

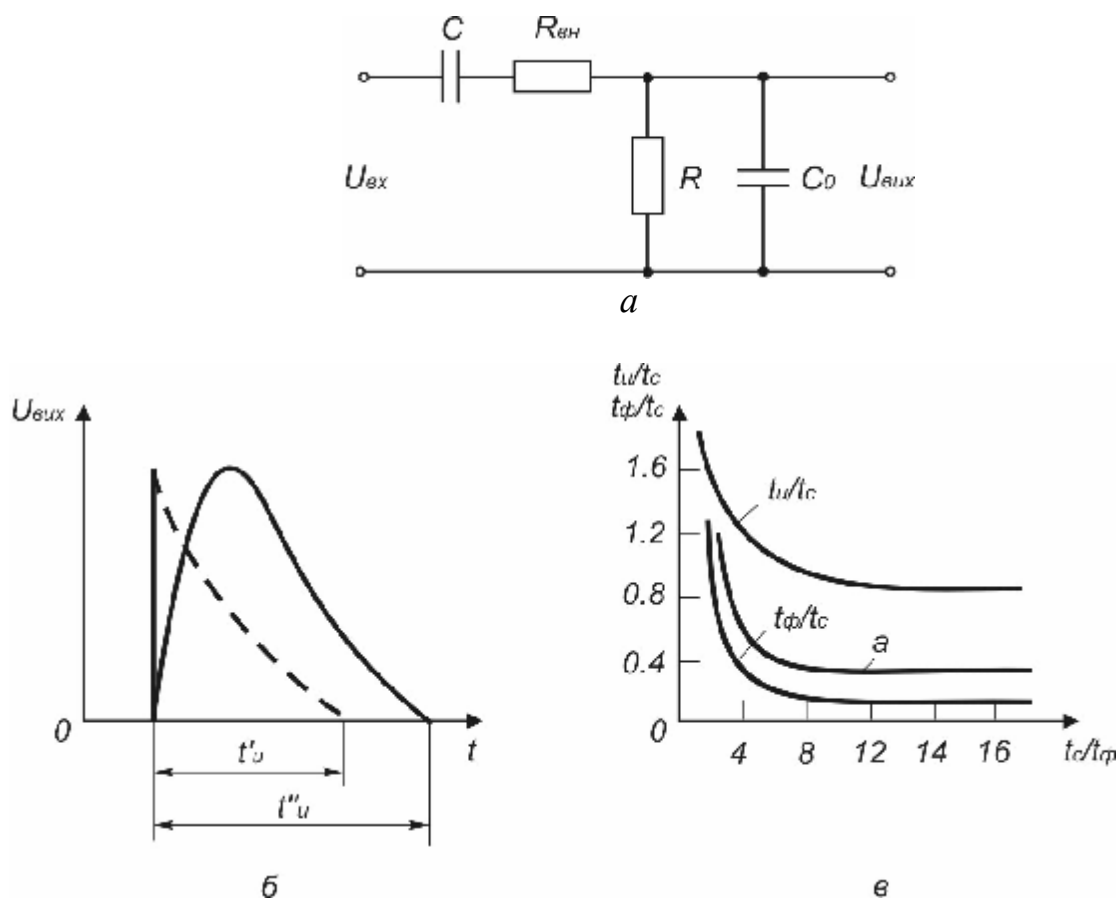


Рис. 4.5

Таким чином, для випадку $\tau < t_\phi$ коло стає диференціалом вже для фронту імпульсу, який збільшується лінійно і напруга на виході швидко досягає сталого значення:

$$u_{вих\ ст} = U_{m\ вих} = t \frac{du_{вх}}{dt} = t \frac{U_m}{t_\phi} = const \quad (4.11)$$

В момент закінчення фронту імпульсу напруга на конденсаторі C $u = U_m - U_{m\ вих}$. Потім відбувається дозарядження конденсатора до напруги U_m , у результаті чого напруга на виході експоненційно спадає до нуля.

Під час дії на вході кола зрізу імпульсу на вихід спочатку передається зміна вхідної напруги, а потім, коли швидкість зарядження конденсатора наблизиться до швидкості зменшення $u_{вх}$, вихідна напруга не змінюється і дорівнює $u_{вх\ ст} = -t \frac{U_m}{t_\phi} = const$. Після закінчення вхідного імпульсу конденсатор продовжує заряджатися і $u_{вх}$ спадає до нуля.

Таким чином, при $\tau < t_\phi$ на виході кола не вдасться одержати гострокінцевих імпульсів.

Дотепер розглядалося ідеалізоване диференціююче коло, де не враховувалися вплив внутрішнього опору генератора імпульсів $R_{вн}$ та паразитної ємності C_0 (рис. 4.5, а). Наявність внутрішнього опору $R_{вн}$ призводить до того, що напруга на виході зменшується. При $C_0=0$ початковий стрибок напруги на виході ділиться між опорами $R_{вн}$ та R : $U_{m\ вих} = U_m / (R_{вн} + R)$. Крім того, за рахунок $R_{вн}$ зростає постійна часу кола $\tau = C(R_{вн} + R)$, що приводить до збільшення тривалості імпульсу.

Наявність ємності C_0 також позначається на зменшенні амплітуди вихідного імпульсу. Так, при $R_{вн}=0$ перепад вихідної напруги ділиться між ємностями C і C_0 та $U_{m\ вих} = U_m / (C + C_0)$, тобто на вихід передається тим менша частина U_m , чим більше C_0 . Крім того, наявність ємності C_0 призводить до подовження заднього фронту імпульсу в цілому, а зв'язок C_0 і $R_{вн}$ – до подовження переднього фронту (на ємності C_0 напруга не може змінюватися стрибком). При спільній дії $R_{вн}$ та C_0 форма вихідного імпульсу погіршується більше, ніж від кожного паразитного параметра окремо (рис. 4.5, б). Для зменшення впливу $R_{вн}$ та C_0 параметри диференціюючого кола вибирають так, щоб виконувалися нерівності: $R > R_{вн}$ та $C > C_0$.

На практиці вибирають $C = (2...3) C_0$. Великі значення ємності C призводять до зменшення R (тому що повинна виконуватись умова $\tau = RC < t_i$), що викликає зменшення амплітуди $u_{вих}$. Постійні часу, що відповідають фронту і зрізу диференційованого імпульсу, а також його амплітуда з достатньою точністю визначаються виразами:

$$t'_\phi = \frac{R_{вн} C_0}{1 + R_{вн} / R + C_0 / C}; \quad t_c = RC \left(1 + \frac{R_{вн}}{R} + \frac{C_0}{C} \right);$$

$$U_{m\ вих} = \frac{U_m t_{Ct'_\phi}}{R_{вн} C_0 (t_c - t'_\phi) a},$$

де a – функція відношення t/t_ϕ , обумовлена кривою (рис. 4.5, в). За кривими визначається також тривалість імпульсу та його переднього фронту.

Інтегруюче коло. Інтегруюче коло є лінійним чотириполусником, сигнал на виході якого змінюється пропорційно інтегралу вхідного сигналу, тобто:

$$u_{вих} = k \int_0^t u_{вх} dt. \quad (4.12)$$

Інтегруючі кола використовуються в схемах формування пилкоподібної напруги, селекції імпульсів за тривалістю і т. д.

Найпростішим і найбільш часто використовуваним з інтегруючих кіл є коло, що містить два елементи: резистор R та конденсатор C (рис. 4.1, б).

Вихідна напруга кола визначається виразом:

$$u_{вих} = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{вх} dt - \frac{1}{RC} \int_0^t u_{вих} dt. \quad (4.13)$$

Як очевидно, формула (4.13) відрізняється від формули (4.12) ідеального інтегратора тим, що під знаком інтеграла замість $u_{вх}$ стоїть різниця $u_{вх} - u_{вих}$. Таким чином, так само, як і у випадку диференціюючого кола, інтегруюче коло інтегрує лише приблизно.

Очевидно, процес інтегрування буде тим точнішим, чим менша амплітуда вихідної напруги в порівнянні з вхідною: $u_{вих} < u_{вх}$. Для виконання цієї нерівності необхідно збільшувати постійну часу інтегруючого кола RC .

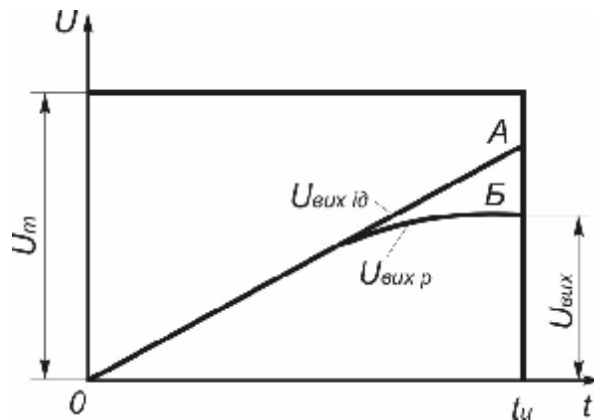


Рис. 4.6

Якщо це так, то другу частину рівняння (4.13) можна відкинути. Тоді вихідна напруга буде пов'язана з вхідною залежністю:

$$u_{вих} \approx \frac{1}{RC} \int_0^t u_{вх} dt. \quad (4.14)$$

Порівнюючи рівняння (4.13) із (4.14), можна зауважити, що постійний коефіцієнт $k=1/(RC)$ є обернена величина постійної часу τ .

Кількісне оцінювання якості інтегрування за допомогою RC – кола зручно зробити, подаючи на її вхід прямокутний імпульс з ідеальним крутим фронтом (рис. 4.6).

Для ідеально інтегруючого кола можна записати:

$$u_{вих\ id} = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{ex} dt = \frac{U_m}{RC} t. \quad (4.15)$$

З (4.16) очевидно, що напруга на виході ідеально інтегруючого кола нарастає лінійно. У реально ж інтегруючого кола напруга на її виході буде наростати за експоненціальним законом:

$$u_{вих.p} = U_m (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.16)$$

Схема експерименту

До складу лабораторного макета входять: генератор імпульсів спеціальної форми, досліджувані кола та осцилограф.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями, перевірити підготовку обладнання до роботи.

2. Вивчити принципову схему дослідження.

2.1. Вивчити роботу лінійних імпульсних кіл, досліджуваних у роботі.

3. Розрахувати і побудувати в масштабі часу діаграми напруг на вході та виході RC – кола, (диференціюючого кола):

а) на вході – прямокутний імпульс негативної полярності $E_{max}=10\text{ В}$; $t_i=30\text{ мкс}$; $C=300, 1000, 10000\text{ н}$, $R=10\text{ кОм}$. Варіанти: постійна часу кола незмінна, а тривалість імпульсу змінюється в межах $20\ldots60\text{ мкс}$. Як зміниться сигнал на виході кола?

б) на вході – імпульс трикутної форми негативної полярності $E_{max}=10\text{ В}$; $t_{\phi}^+=5\ldots20\text{ мкс}$; $t_{\phi}^-=5\ldots20\text{ мкс}$ (розрахувати для конкретних значень t_{ϕ}^+ та t_{ϕ}^- обраних у заданих межах) $C=300, 1000, 10000\text{ н}$; $R=10\text{ кОм}$. Як зміниться сигнал на виході, якщо при заданій постійній часу кола t_{ϕ}^+ та t_{ϕ}^- незалежно змінювати в зазначених вище межах?

в) на вході – імпульс трапецеїдальної форми $E_{max}=10\text{ В}$; $t_{\phi}^+=10\text{ мкс}$; $t_{\text{верш}}=10\text{ мкс}$; $C=300, 1000, 10000\text{ н}$; $R=10\text{ кОм}$. Як зміниться сигнал на виході при зміні t_{ϕ}^+ , t_{ϕ}^- ?

г) на вході – імпульс із експоненціальним фронтом і зрізом. $E_{max}=10\text{ В}$, показник швидкості наростання експоненти $\alpha=3 \cdot 10^5\text{ 1/с}$; $C=300, 1000, 10000\text{ н}$; $R=10\text{ кОм}$.

4. Для розглянутих варіантів пунктиром зобразити на діаграмах підключення до виходу кола паразитної ємності C_0 .

5. Розрахувати і побудувати в масштабі тимчасові діаграми напруг на вході та виході інтегруючого RC – кола для варіантів, перерахованих в п. 3, а, б, в, г.

Проведення досліджень

1. Досліджувати проходження імпульсу прямокутної форми (трикутної, трапецеїдальної, пилкоподібної – за завданням викладача) через лінійні кола.
2. Зарисувати і пояснити осцилограми вихідного імпульсу при $t_i \ll \tau$, $t_i \approx \tau$, $t_i \gg \tau$.
3. Вивчити осцилограми вихідного імпульсу при підключенні до виходу кола паразитної ємності C_0 діодів.

Контрольні питання

1. Запишіть формулу для визначення тривалості імпульсу на виході диференціюючого кола, якщо на його вході імпульс прямокутної форми.
2. Як змінюється форма напруги на виході диференціюючого кола, якщо змінювати опір, ємність кола, тривалість і період повторення прямокутних імпульсів на вході?
3. У чому відмінність прохідного кола від диференціюючого кола?
4. Зобразити форму напруги на виході прохідного кола при впливі на його вхід послідовності прямокутних імпульсів.
5. Зобразити форму напруги на виході диференціюючого кола, якщо на його вході імпульси трикутної, трапецеїдальної, пилкоподібної форми, імпульси з експоненціальним фронтом і зрізом. Як змінюється реакція на виході кола при зміні тривалості фронту, амплітуди імпульсу, постійної часу кола?
6. Як впливає на форму вихідного імпульсу диференціюючого кола, паразитна ємність, що замикає резистор і вихідний опір генератора імпульсів?
7. Як буде змінюватися форма вихідного сигналу інтегруючого кола, якщо змінити опір кола, ємність, тривалість і період повторення вхідних імпульсів?
8. Визначити форму напруги на виході інтегруючого кола, якщо на його вході імпульс трикутної форми.

Рекомендована література

1. *Скаржепа В. А., Луценко А. Н.* Електроника и микросхемотехника: Учебник: В 2 ч. / Под общ. ред. А. А. Краснопрошиной. —К.: Вища шк., 1989. Ч. 1.— 432 с.
2. *Гольденберг Л. М.* Импульсные устройства: Учебник.— М.: Радио и связь, 1981.— 222с.
3. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники.—М.: Высш. шк., 1978.—529с.
4. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. —М.: Сов. радио, 1971. – 672 с.

Лабораторна робота № 5

Дослідження основних параметрів терморезисторів

Мета роботи – дослідити основні параметри терморезисторів.

Загальні теоретичні відомості

Форма, габарити і конструктивні особливості сучасних терморезисторів досить різноманітні: їх виконують у вигляді дисків, мініатюрних бусинок, плоских прямокутників та ін.

В залежності від типу використовуваного напівпровідникового матеріалу і габаритів чутливого елемента вихідний опір терморезисторів складає від декількох ом до десятків мегаом.

На рис. 5.1 зображене найпростіше електричне коло, що складається з терморезистора R_K і лінійного резистора R , величина якого не залежить від температури. Якщо до цього кола прикласти напругу E , в ній встановиться деякий струм I , величина якого визначається при розв'язуванні системи рівнянь:

$$E = U_T + U_R = U_T + IR \quad (5.1)$$

$$U_T = f(I) \quad (5.2)$$

де U_T - спад напруги на терморезисторі у встановленому режимі.

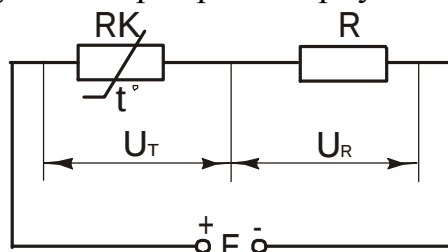


Рис. 5.1. Найпростіше коло з терморезистором

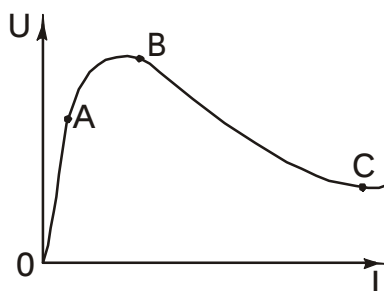


Рис. 5.2. Вольтамперна характеристика терморезистора

Залежність $U_T = f(I)$ являє собою вольтамперну характеристику терморезистора (рис. 5.2) з трьома основними ділянками: OA , AB і BC . На початковій ділянці OA характеристика лінійна, оскільки при малих струмах потужність, що виділяється в терморезисторі, мала і практично не

впливає на його температуру. На ділянці AB лінійність характеристики порушується. Із зростанням струму температура терморезистора підвищується, а його опір (внаслідок збільшення кількості електронів і дірок провідності в матеріалі напівпровідника) зменшується. При подальшому збільшенні струму на ділянці BC зменшення опору є таким значним, що зростання струму приводить до зменшення напруги на терморезисторі. В кінці ділянки BC вольтамперна характеристика все більше наближається до горизонтальної лінії паралельної осі абсцис. Це і дозволяє використовувати деякі типи терморезисторів для стабілізації напруги.

Характерним для кола, що містить терморезистор R_K і лінійний резистор R , є різке, стрибкоподібне зростання чи спадання струму, викликане зміною опору терморезистора. Це явище отримало назву **релейного ефекту**. Релейний ефект може відбутися в результаті зміни температури навколишнього середовища або величини прикладеної до кола напруги.

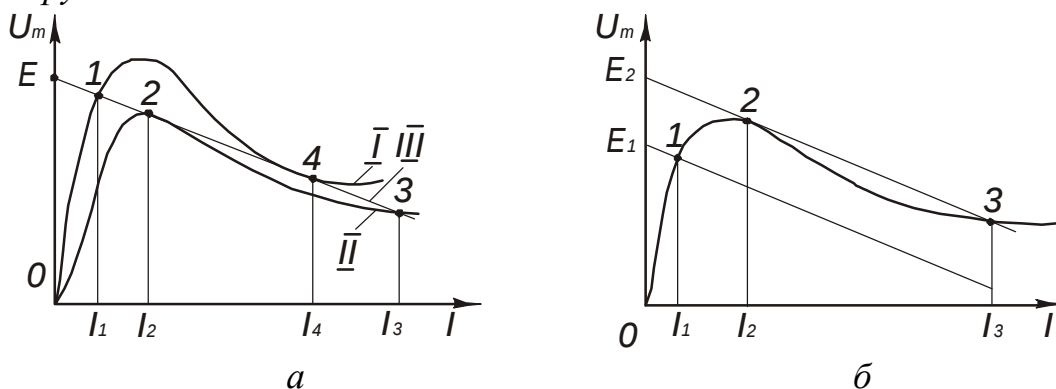


Рис. 5.3. Виникнення релейного ефекту: а - при зміні температури; б - при зміні прикладеної напруги

На рис. 5.3,а показано виникнення релейного ефекту при зміні навколишньої температури.

Вольтамперна характеристика I терморезистора відповідає температурі навколишнього середовища T_1 , характеристика II - температурі T_2 , III - зображує залежність $U_T = E - IR$. При температурі T_1 струм в колі I_1 , визначається абсцисою точки 1 перетину вольтамперної характеристики терморезистора і характеристики III . При підвищенні навколишньої температури від T_1 до T_2 вольтамперна характеристика терморезистора опускається. При цьому струм на початку зростає плавно до значення I_2 в точці 2, яка відповідає нестійкому стану схеми, і далі (при невеликому підвищенні температури) стрибком зростає до I_3 в точці 3, де стійко зберігає своє значення при постійній температурі. Це явище називається **прямим релейним ефектом**.

Зменшення температури приводить до плавного зменшення струму до значення I_4 в точці 4 і далі - до стрибкоподібного зменшення струму до I_1 (точка 1). Це явище називається **зворотним релейним ефектом**.

На рис. 5.3,б показано виникнення релейного ефекту при зміні прикладеної напруги.

При напрузі джерела E_1 режим роботи кола визначається точкою 1. при збільшенні напруги до E_2 робоча точка переходить в положення 2. Тепер досить невеликого збільшення напруги, щоб робоча точка стрибком перемістилась в положення 3, що відповідає різкому збільшенню струму від I_2 до I_3 .

Релейний ефект використовується в різноманітних схемах теплового захисту, температурної сигналізації, автоматичного регулювання температури і т. д.

Крім вольтамперної характеристики, важливою характеристикою терморезистора є залежність його опору від температури. Типова температурна характеристика $R=j(T)$ терморезистора з від'ємним температурним коефіцієнтом показана на рис. 5.4.

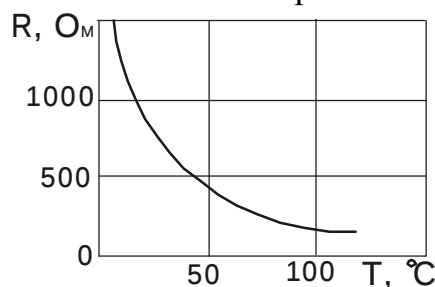


Рис. 5.4. Температурна характеристика терморезистора з від'ємним коефіцієнтом

Найважливішими параметрами терморезисторів є:

1. Номінальний (холодний) опір - опір робочого тіла терморезистора при температурі навколишнього середовища 20°C, Ом.

2. Температурний коефіцієнт опору β_T , який виражає в відсотках зміну абсолютної величини опору робочого тіла терморезистора при зміні температури на 1°C. Звичайно значення β_T приводиться для температури 20°C. Значення β_T для будь-якої температури в діапазоні 20 - 150°C визначається з відношення

$$a_T = -\frac{B}{T^2} \quad (5.3)$$

де $B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}$ - коефіцієнт температурної чутливості, який

залежить від фізичних властивостей матеріалу, T_1 - вихідна температура робочого тіла; T_2 - кінцева температура робочого тіла, для якої визначається значення β_T ; R_{T_1} і R_{T_2} - опори робочого тіла терморезистора при температурах відповідно T_1 і T_2 .

3. Найбільша потужність розсіювання - потужність, при якій терморезистор, що знаходиться при температурі 20°C, розігрівається струмом до максимальної робочої температури.

4. Максимальна робоча температура - температура, при якій характеристики терморезистора залишаються стабільними довгий час (протягом вказаного терміну дії).

5. Постійна часу τ - час, протягом якого температура терморезистора стає рівною 63°C при перенесенні його з повітряного середовища з температурою 0°C в повітряне середовище з температурою 100°C . Таким чином, параметр τ характеризує теплову інерцію терморезистора.

Постійна часу τ являє собою відношення теплоємності C до коефіцієнта розсіювання b

$$\tau = \frac{C}{b} \quad (5.4)$$

6. Теплоємність C - кількість тепла, яку необхідно надати терморезистору, щоб підвищити температуру робочого тіла на 1°C , Дж/ $^\circ\text{C}$.

7. Коефіцієнт розсіювання b - потужність, яка розсіюється терморезистором при різниці температур робочого тіла і навколишнього середовища в 1°C , Вт/град.

Терморезистори з від'ємним температурним коефіцієнтом використовуються для вимірювання і регулювання температури, термокомпенсації різних елементів електричного кола, які працюють в широкому інтервалі температур, вимірювання потужності височастотних коливань та індикації променевої енергії, стабілізації напруги в колах постійного і змінного струмів, в якості регулюючих безконтактних резисторів і т. д.

Терморезистори з додатним температурним коефіцієнтом (позистори) виготовляються на основі титанату барію, які в певному інтервалі температур збільшують свій питомий опір на декілька порядків. Існуюча технологія дозволяє виготовляти позистори з додатним b_T , що складає 0,15-0,2 (1°C). За своїм конструктивним оформленням позистори аналогічні терморезисторам пігулкового типу. Вони мають діаметр біля 5 мм і висоту 1,5 мм. Дротяні виводи припаяні до торцевих поверхонь пігулки. Від атмосферних впливів позистор захищений шаром електроізоляційної емалі.

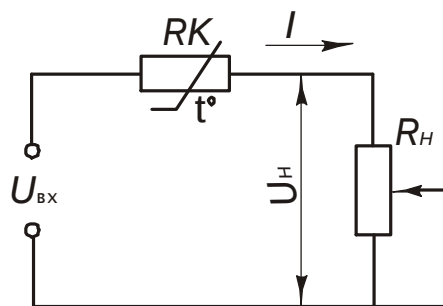


Рис. 5.5. Схема, яка пояснює принцип роботи позистора

Принцип роботи позистора ілюструє схема, приведена на рис. 5.5. В цій схемі позистор R_K , включений послідовно з опором навантаження R_H , використовується в якості обмежувача струму. Коли опір навантаження падає нижче певного значення, в колі збільшується струм і зростає температура позистора. Опір позистора при цьому зростає, що обмежує струм в колі навантаження.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями, перевірити підготовку обладнання для роботи.
2. За допомогою необхідних для цього вимірювальних приладів (Ц4372, В7-16А), попередньо ознайомившись з їх роботою, експериментально визначити опір заданих терморезисторів, використовуючи схему рис. 5.1 при кімнатній температурі.
3. Нагріваючи терморезистор у склянці з водою, визначити опір в залежності від температури.
4. Накреслити отриману залежність.

Контрольні питання

1. Що таке номінальний опір терморезистора і температурний коефіцієнт опору?
2. Інші найважливіші параметри терморезисторів.

Питання для самостійної роботи

1. *Напівпровідникові нелінійні резистори (варістори, магніторезистори) – основні параметри та типи [1,5].*

Рекомендована література

1. *Партала О. Н.* Радиокомпоненты и материалы: Справочник. – К.: Радиоаматор, М.: КУБК-а, 1998. – 720 с.
2. *Боровский В. П., Костенко В. И. и др.* Справочник по схемотехнике для радиолюбителя. – К.: Техніка, 1987. – 432 с.
3. *Могилевский Н.Н. и др.* Общая радиотехника. – Киев: “Вища школа”, 1978.- 344с.
4. *Бахметьев А. А.* Маркировка электронных компонентов. – М.: «Додэка», 1999.- 160с.
5. Справочная книга радиолюбителя-конструктора /под.ред. Н.И.Чистякова – М. : Радио и связь, 1990.- 624 с.

Лабораторна робота № 6

Дослідження основних параметрів трансформаторів, дроселів та котушок індуктивності

Мета роботи – вивчити класифікації, системи позначень та дослідити основні параметри трансформаторів, дроселів та котушок індуктивності.

Загальні теоретичні відомості

Трансформатори, дроселі та котушки індуктивності є найбільш поширеними елементами радіоелектронної апаратури.

Розрізняють узгоджувальні трансформатори, імпульсні трансформатори та трансформатори живлення.

Взагалі трансформатор, це статичний електромагнітний пристрій з двома індуктивно пов'язаними обмотками, призначений для перетворення систем змінного струму.

1. Параметри трансформаторів живлення:

- Номінальна напруга первинної обмотки трансформатора U_1 ,
- Номінальний струм первинної обмотки трансформатора I_1 ,
- Напруга вторинної обмотки трансформатора U_2 ,
- Струм вторинної обмотки трансформатора I_2 ,
- Напруга холостого ходу трансформатора U_0 – напруга на будь-якій вторинній (розімкненій) обмотці при номінальній напрузі і частоті на первинній обмотці ,
- Номінальна потужність трансформатора – сума потужностей вторинних обмоток ,
- Коефіцієнт трансформації n – відношення напруг на первинній і вторинній обмотках при холостому ході.

2. Основні параметри та типи котушок індуктивності

Котушки індуктивності призначені для створення на ділянці електричного кола певного значення індуктивності. Індуктивність характеризує величину енергії, яка запасється котушкою при проходженні по ній електричного струму. Чим більша індуктивність котушки, тим більша енергія магнітного поля при заданій величині струму. Котушки виготовляють з обмоткою із одного або декількох шарів дроту, який намотаний на каркас з ізолюваного матеріалу. В залежності від вимог, які висуваються до котушок, за конструкцією вони можуть бути з магнітним

стержнем або без нього. Індуктивність залежить від розмірів, форми, числа витків котушки, а також від форми та матеріалу стержня.

Конструктивні особливості котушок індуктивностей (значно) залежать від їх конкретного застосування. Основними типами котушок індуктивностей є:

1) *Контурні* – котушки, що входять у склад коливальних контурів генераторів, резонансних підсилювачів та інших вузлів апаратури, які містять коливальні системи.

2) *Дроселі* – котушки, що мають велике значення індуктивного опору на частотах, вищих певного значення.

3) *Фільтрові* – котушки, що входять у склад електричних фільтрів.

4) *Котушки зв'язку* – призначені для передачі електромагнітної енергії з одних електричних кіл у інші.

Основним параметром котушок вважають індуктивність (мкГ).

Серед інших параметрів котушок виділяють такі:

Добротність – відношення реактивного опору котушки до її активного опору втрат:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (6.1)$$

Добротність котушки характеризує активні втрати у котушці та у більшості випадків визначає резонансні властивості та к.к.д. контура.

Власна ємність є паразитним параметром. Наявність власної ємності призводить до збільшення втрат енергії та зменшення стабільності настройки контурів.

*Стабільність параметрів при зміні температури та вологості у часі має особливе значення для котушок контурів, гетеродинів, фільтрів та ін. Стабільність індуктивності характеризується **температурним коефіцієнтом індуктивності** ТКІ, що дорівнює відносній зміні індуктивності при зміні температури на 1°C.*

Одношарові циліндричні котушки використовують на частотах вище 1-2 МГц. Намотка може бути безперервною та з примусовим кроком намотки. Одношарові котушки з примусовим кроком намотки характеризуються високою добротністю (150 – 400) та стабільністю. Котушки з неперервною намоткою також можуть мати високу добротність, однак їх власна ємність більша, що обумовлює меншу стабільність параметрів.

Індуктивність одношарової котушки із неперервною намоткою визначається за формулою :

$$L = \frac{0,01 D w^2}{\frac{l}{d} + 0,44} \quad (6.2)$$

де L – індуктивність, мкГ; D – діаметр котушки, см; l – довжина намотки, см; w – кількість витків котушки.

Багатошарові циліндричні котушки використовують у тих випадках, коли потрібна індуктивність більша 30-50 мкГ. Несекціоновані багатошарові циліндричні котушки характеризуються невисокими добротністю та стабільністю, більшою власною ємністю. Для знищення паразитних зв'язків, що обумовлені зовнішнім електромагнітним полем котушки, її екранують, тобто розміщують у замкненому металевому екрані. Під впливом екрана змінюються параметри котушки: зменшуються індуктивність та добротність, збільшується власна ємність.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями, перевірити підготовку обладнання для роботи.
2. Використовуючи необхідні для цього вимірювальні прилади (Ц4372, Ф4320, В7-16А), попередньо ознайомившись з їх роботою, експериментально визначити основні параметри заданих радіокомпонентів.
3. Порівняти експериментально отримані результати з розрахунковими, зробити необхідні висновки щодо похибок вимірювань.

Контрольні питання

1. Основні параметри трансформаторів.
2. Основні параметри котушок індуктивності та дроселів.

Питання для самостійної роботи

1. Класифікація та основні характеристики електричних реле.
2. Поляризаційні та реле-перемикачі – основні параметри та типи.
3. Основні параметри та типи дроселів високої частоти .

Рекомендована література

1. Сидоров И.Н., и др. Малогабаритные трансформаторы и дроссели. Справочник. – М.: Радио и связь, 1985. – 416 с.
2. Бокуняев А.А. и др. Справочная книга радиолюбителя-конструктора/Под ред. Н.И.Чистякова. – М.: Радио и связь, 1990. – 624 с.

Лабораторна робота № 7

Дослідження параметрів напівпровідникових діодів

Мета роботи – вивчення принципу дії та основних властивостей напівпровідникових діодів: випрямних; високочастотних (універсальних); імпульсних; стабілітронів; тунельних; варікапів, ознайомлення з основними параметрами і застосуванням та дослідження їх вольтамперних характеристик.

Загальні теоретичні відомості

1. Класифікація діодів, система умовних позначень і маркування

Напівпровідниковим діодом (НД) називають електроперетворювальний напівпровідниковий прилад із дірково–електронним p - n переходом, що має два виводи. Малі габаритні розміри та маса, висока швидкодія та надійність, низька вартість дозволяють застосовувати їх практично в будь-яких сучасних електронних вузлах.

НД класифікуються за рядом ознак, найважливішими з яких є призначення, конструктивно–технологічні особливості, вид вихідного напівпровідникового матеріалу. За призначенням НД діляться на випрямні, високочастотні і надвисокочастотні (ВЧ– і НВЧ–діоди), імпульсні, напівпровідникові стабілітрони (опорні діоди), тунельні, варікапи та інші; за конструктивно–технологічними особливостями – на площинні та точкові; за типом вихідного матеріалу – на германієві, кремнієві, селенові, арсенідо-галієві, карбідо-кремнієві, антимонідо-індієві та інші.

Умовні графічні позначення діодів показані на рис. 7.1.

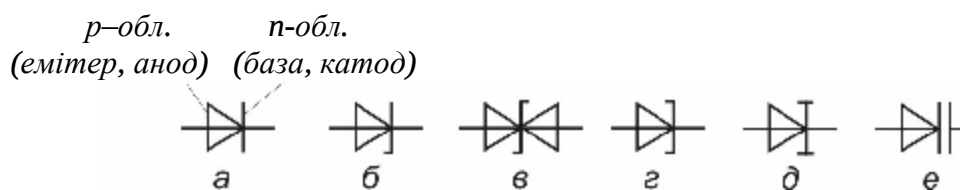


Рис. 7.1. Напівпровідникові діоди

а - випрямний, б, в - стабілітрони, г - тунельний, д - обернений, е - варікап

Умовне позначення (маркування) діодів складається з елементів: 1–й елемент (цифра або літера) позначає вихідний матеріал напівпровідника: 1 або Г – германій; 2 або К – кремній; 3 або А – арсенід галія і т. п.; другий (літера) – характеризує клас або групу діодів: Д – випрямні, універсальні (високочастотні) та імпульсні; А – надвисокочастотні; С – стабілітрони; У

– варіації; И – тунельні; Ц – випрямні стовпи і блоки; третій, четвертий і п'ятий (тризначний номер) – говорить про групу застосування (вказується в довіднику); шостий елемент – великі букви російського алфавіту А, Б, В і Г т. д. – вказує на різновид діода даного типу. Наприклад, КС147А – кремнієвий стабілітрон малої потужності, різновидом типу А.

2. Випрямні діоди

Випрямні діоди (ВД) – це напівпровідникові діоди, призначені для перетворення змінного струму в постійний, в обмеженому діапазоні частот (50 Гц... 100 кГц). Крім того, ВД широко використовуються в схемах керування і комутації для обмеження паразитних викидів напруг, у якості елементів електричної розв'язки кіл і т. д.

В наш час у якості ВД широко використовуються кремнієві площинні діоди, що мають значно менші зворотні струми і більші допустимі зворотні напруги, ніж германієві. Недоліком кремнієвих діодів є більш пряме падіння напруги, ніж на германієвих. Конструкції ВД приведені в [3, 4, 8].

ВД виконуються на основі *p-n* переходу і мають дві області. Одна з них є більш низькоомною (містить велику концентрацію домішків – звичайно область із провідністю типу *p*) і називається емітером. Інша область – база, яка більш високоомна (містить меншу концентрацію домішків – звичайно область із провідністю типу *n*). До емітера і бази підводяться металеві контакти, названі відповідно анодом і катодом (рис. 7.1, а).

В основі роботи ВД лежить властивість односторонньої провідності *p-n* переходу, яка полягає в тому, що останній добре проводить струм (має малий опір) при прямому вмиканні, і практично не проводить струм (має дуже високий опір) при зворотному вмиканні. Сказане відображають вольтамперні характеристики ВАХ ВД: ідеального (рис. 7.2, а) і реального (рис. 7.2, б).

Пряма гілка ВАХ ВД описується рівнянням

$$I_{\text{пр}} = I_0 \left(e^{\frac{U_{\text{пр}} - I_{\text{пр}} r_{\delta}}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (7.1)$$

де $I_{\text{пр}}$, $U_{\text{пр}}$ – відповідно прямий струм та пряма напруга; r_{δ} – опір базової області (складає одиниці десятки омів); $\varphi_T = \frac{kT}{q}$ – тепловий потенціал; k – постійна Больцмана; q – заряд електрона; T – абсолютна температура; I_0 – зворотний струм *p-n* переходу.

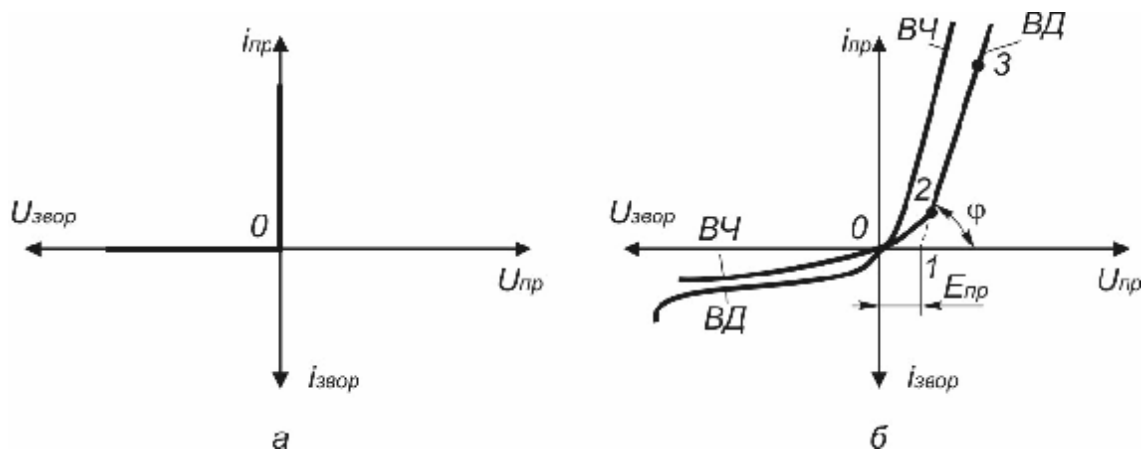


Рис. 7.2

Робочою ділянкою ВАХ ВД є лінійна (омічна) ділянка характеристики при прямому вмиканні (ділянка 2–3, рис. 7.2, б). Нахил характеристики на цій ділянці визначається опором базової області r_b . На практиці пряму гілку ВАХ реального ВД апроксимують ламаною лінією (ділянки 0–1, 1–3, рис. 7.2, б).

З рисунка бачимо, що $I_{пр} = \frac{U_{пр} - E_{пр}}{r_b}$ при $U_{пр} > E_{пр}$ (ділянка 1–3);

$I_{пр} = 0$ при $U_{пр} < E_{пр}$ (ділянка 0–1), де $E_{пр} \approx (0,5 \dots 0,7) D j_{k0}$, $D j_{k0}$ – напруга потенціального бар'єра p - n переходу (складає порядку 0,3...0,9 В); $r_b = \text{ctg } j$.

ВАХ ВД залежить від температури навколишнього середовища. З її збільшенням зростають прямий й зворотний струми діода. Особливо сильно змінюється зворотний струм, тому що його створюють неосновні носії заряду, число яких у напівпровіднику збільшується із ростом температури. Значення прямого струму в основному залежить від концентрації домішків в напівпровіднику.

Основні параметри, що характеризують роботу ВД у випрямних схемах, приведені в [1, 7, 8].

Якщо вхідна напруга перевищує $U_{звор, \max}$ діода, то декілька ВД вмикають послідовно, а якщо прямий струм перевищує $I_{пр, \max}$ діода, декілька ВД вмикають паралельно. Для усунення нерівномірності розподілу оберненої напруги між послідовно ввімкненими діодами, останні шунтують опорами $R_{ш}$, а для усунення нерівномірності розподілу струмів, що протікають у паралельно ввімкнених діодах при прямому вмиканні, послідовно з кожним діодом вмикають додаткові резистори R_d . Значення $R_{ш}$ складають десятки – сотні кілоомів, а R_d – сотні омів. Їхні значення повинні задовольняти співвідношення:

$$R_{ш} \ll r_{звор \text{ ВД}}; \quad R_d \gg r_{пр \text{ ВД}}, \quad (7.2)$$

3. Високочастотні і надвисокочастотні діоди (ВЧ і НВЧ – діоди)

ВЧ–діоди (рис. 7.1, а) є більш універсальними, ніж випрямні діоди, тому їх називають універсальними діодами. Вони можуть працювати у випрямлячах змінного струму, а також у модуляторах, детекторах, різноманітних перетворювачах електричних сигналів у широкому діапазоні частот (до сотень мегагерц). Їхнім недоліком в порівнянні з ВД є більш низька навантажувальна спроможність. ВЧ–діоди ранніх розробок містять точковий р-п перехід і називаються точковими. Зараз знаходять застосування мікросплавні високочастотні напівпровідникові діоди із площинними р-п переходами дуже малих розмірів. У порівнянні з точковими, такі ВЧ–діоди мають великі допустимі струми і кращі характеристики при зворотному вмиканні. Конструкції ВЧ і НВЧ–діодів приведені в [3, 4, 8]. Пряма гілка ВАХ таких діодів за формою не відрізняється від ВАХ випрямних діодів. Зворотний струм має менше значення, ніж у ВД через малу площу р-п переходу, але на ВАХ практично відсутні ділянки насичення і за рахунок струмів термогенерації і відтоку зворотний струм рівномірно зростає (рис. 7.2, б). Значення постійних прямих струмів точкових діодів не перевищує 50 мА, значення допустимих зворотних напруг – 150 В. У мікросплавних діодах ці параметри децю вищі. Основним параметром ВЧ–діодів є бар'єрна ємність C_d . Чим менша C_d , тим ширше частотний діапазон діода. Звичайно $C_d < 1 \text{ пФ}$. На надвисоких частотах ($f_{\text{max}} > 1000 \text{ МГц}$) на роботу діода впливає його інерційність, що разом із наявністю C_d обмежує застосування діодів. Інші параметри ВЧ і НВЧ–діодів ті ж, що і ВД.

4. Імпульсні діоди (ІД)

ІД (рис. 7.1, а) є різновидом високочастотних діодів і призначені для використання в якості ключових елементів у швидкодіючих імпульсних схемах. Їх конструкція, ВАХ, статичні і динамічні параметри такі ж, як і у ВЧ та НВЧ діодів. ІД працюють під впливом короткочасних імпульсів і повинні добре передавати їх форму. Якщо на ІД подати різнополярні прямокутні імпульси (рис. 7.3, а), то в моменти зміни полярності форма вихідних сигналів відрізняється від прямокутної (мають місце перехідні процеси, див. рис. 7.3, б). При стрибкоподібній зміні вхідної напруги з негативної в позитивну в момент часу $t = t_1$ на імпульсному діоді з'являється стрибок напруги. При сталості прямого струму, сила якого в основному визначається значенням $R_n \gg \Gamma_{\text{пр.ід}}$, цей стрибок викликаний збільшенням у перехідному процесі прямого опору ІД – $\Gamma_{\text{пр.ід}}$ ($U_{\text{пр.ід}} = \Gamma_{\text{пр.ід}} I_{\text{пр}}$). Збільшення $\Gamma_{\text{пр.ід}}$ пов'язано з введенням з емітера в базу ІД (процес інжекції) великого числа неосновних носіїв (для бази – дірок), що мають скінченний час життя і сповільнюють наростання прямого

струму. Після закінчення деякого часу, що називається часом устанавлення прямого опору $\tau_{уст} = t_2 - t_1$, дірки в базі частково рекомбінують з електронами, а частково переміщуються в глиб бази, і прямий опір знижується до свого сталого малого значення. При зміні вхідного сигналу з позитивного в негативний в момент часу $t = t_3$ має місце стрибок вихідного струму, що потім зменшується до свого малого сталого значення. Це відбувається за рахунок виведення дірок з бази назад у емітер (процес екстракції), що в перехідному процесі створює додатковий зворотний струм діода і відповідно зменшує його зворотний опір $r_{об.ід}$. У цьому випадку перехідний процес оцінюється часом відновлення зворотного опору $\tau_{віднов.} = t_4 - t_3$, після закінчення якого зворотний опір приймає своє велике стає значення.

Для зменшення тривалості перехідних процесів у ІД зменшують його дифузійну $S_{диф}$ і бар'єрну $S_{бар}$ ємності. Для цього зменшують товщину бази, збільшують її питому провідність, зменшують площу р-п переходу, зменшують час життя неосновних носіїв у базі і т.д.

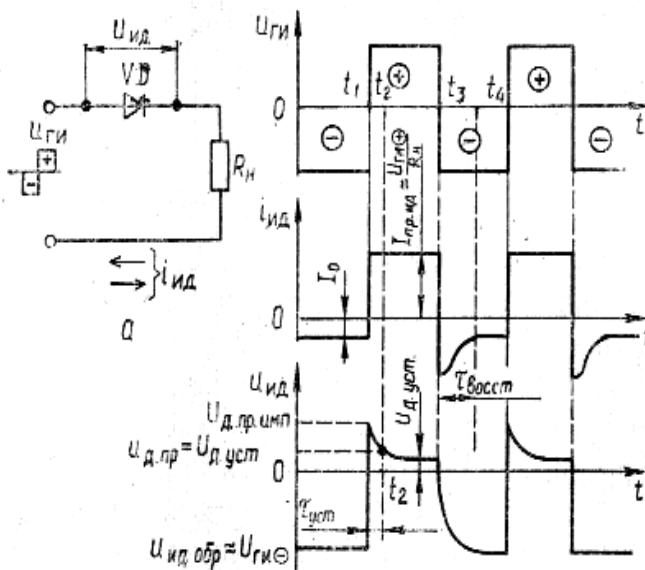


Рис. 7.3

б)

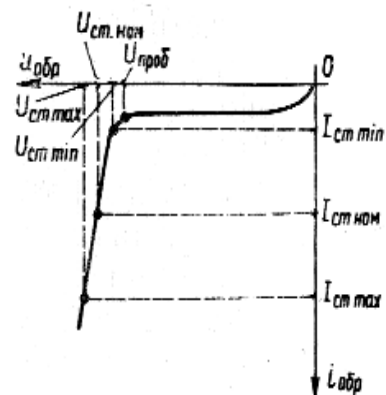


Рис. 7.4

5. Напівпровідникові стабілітрони (опорні діоди)

Напівпровідниковим стабілітроном (НС) (рис. 7.1, б) називають напівпровідниковий діод, напруга на якому в області електричного пробую слабо залежить від струму. Робочою ділянкою ВАХ НС є область пробую р-п переходу при його зворотному ввімкненні (рис. 7.4). При обмеженні зворотного струму стан пробую в стабілітроні може підтримуватися і відтворюватися протягом десятків - сотень тисяч годин. Значення напруги стабілізації залежить від вихідного напівпровідникового матеріалу і

технології його обробки. При виготовленні стабілітронів використовується кремній, тому що зворотні струми р-п переходів на його основі невеликі і мало залежать від температури, отже, у них менше імовірність необоротного теплового пробію за рахунок протікання зворотного струму і саморозігріву р-п переходу. В якості стабілітронів з $U_{ст}$ порядку 3...5 В застосовуються діоди з низькоомного (високолегованого домішкою) матеріалу. У цьому випадку утворюється вузький площинний перехід з чіткими границями, у якому при порівняно низьких зворотних напругах виникає тунельний електричний пробій.

У стабілітронів з $U_{ст} > 7$ В (виготовляються з більш високоомних матеріалів) виникає лавинний електричний пробій. У діапазоні $U_{ст} = 5...7$ В пробій викликаний взаємодією тунельного і лавинного механізмів. Конструкції стабілітронів і основних електричних параметрів приведені в [3, 4, 8].

Стабілітрони використовуються для стабілізації напруг джерел постачання, а також для фіксації рівнів напруг у різних схемах (звідси походить друга назва стабілітронів - опорні діоди). Стабілізацію низьковольтної напруги в межах 0,3...1В можна одержати при використанні прямої вітки ВАХ кремнієвих діодів, що називаються стабісторами. Існують також двосторонні (симетричні) стабілітрони, що мають симетричну ВАХ відносно початку координат (рис. 7.1, в). У цьому випадку напруга стабілізації при прямому зсуві дорівнює напрузі стабілізації при зворотному зсуві.

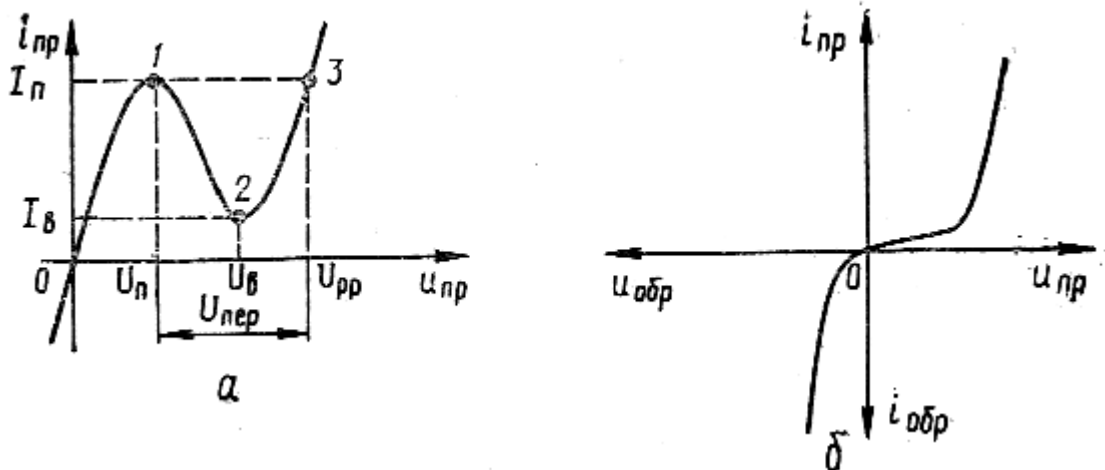


Рис. 7.5

6. Тунельні діоди (ТД)

Тунельним називається напівпровідниковий діод (рис. 7.1, г), у якому використовується тунельний механізм перенесення носіїв заряду через р-п

перехід і у ВАХ якого є ділянка негативного диференціального опору. ТД виготовляють з германію або арсеніда галію з високою концентрацією домішок (вироджені напівпровідники). Це дозволяє одержати дуже вузький р-п перехід. На відміну від розглянутих раніше діодів у таких переходах виникають умови для відносно вільного тунельного проходження електронів через потенціальний бар'єр (тунельний ефект) [1-4]. Тунельний ефект приводить до появи на прямій вітці ВАХ діода спадної ділянки з негативним опором (рис. 7.5, а, ділянка 1-2). Оскільки тунельний струм не пов'язаний з порівняно повільними процесами дифузії і дрейфу електронів, ТД є практично безінерційними приладами. До переваг ТД варто віднести широкий інтервал робочих частот і температур, малу споживану потужність, високий допустимий рівень радіації, здатність використання для посилення електричних сигналів. Їхніми недоліками є низький діапазон робочих напруг і струмів, а також несумісність технології виготовлення ТД із технологією виготовлення інтегральних схем, що перешкоджає їх широкому впровадженню в сучасну апаратуру. Крім того, ТД - двополюсники і при використанні їх, наприклад, у підсилювачах необхідні складні кола розв'язки між входом і виходом пристрою, що також обмежує їхнє застосування. Конструкції ТД і їхні основні параметри приведені в [1-4,8]. Робочим для ТД є пряме ввімкнення. ТД знаходять застосування в перемикальних, підсилювальних і генераторних схемах. В наслідок того, що вони працюють при низьких робочих напругах, для їх роботи необхідні високостабільні джерела живильних напруг.

Різновидом ТД є обернені діоди (рис. 7.1, д). Це ТД, у яких максимум струму на прямій вітці ВАХ або незначний, або цілком відсутній (рис. 7.5, б). Провідність обернених діодів в області малих напруг при зворотній напрузі вища, ніж при прямій.

7. Варикапи

Варикапами називають напівпровідникові діоди (Рис. 7.1, е), робота яких основана на використанні залежності бар'єрної ємності р-п переходу від прикладеної зворотної напруги. Ємністю варикапів можна керувати дистанційно, змінюючи зворотню напругу на р-п переході. Варикапи мають низьку інерційність, високу добротність, низький рівень шумів на високих частотах, малі габарити, високі температурну стабільність і надійність. Конструкції варикапів приведені в [4,8], а вольт-фарадна характеристика - на Рис. 7.6. Мінімальна ємність $C_{\min}$ визначається максимально допустимою зворотною напругою, що не приводить до пробоя р-п переходу. Ємність $C_{\max}$ залежить від заданої початкової напруги на варикапі $U_{\text{об.поч.}}$. Звичайно до варикапа прикладається невелика змінна напруга $U_{\sim}$ і постійна напруга зсуву ($U_{\text{зсуву}} \gg U_{\sim}$). Їхнє сумарне значення може змінюватися від $U_{\max}$ до $U_{\min}$. При цьому

значення ємності для змінної складової напруги змінюється від $C_{\min}$ до $C_{\max}$. Значення U_{zm} складає одиниці-десятки вольт; $C_{\max}$ – десятки пікофарад; коефіцієнт перекриття ємності $K_c = C_{\max}/C_{\min}$ – декілька одиниць.

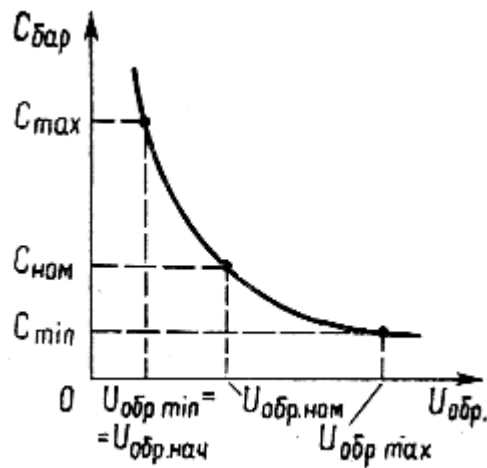


Рис. 7.6

Варикапи широко застосовуються в різних схемах для автоматичного підстроювання (зміни) частоти, у параметричних підсилювачах та ін. Варикап, призначений для застосування в діапазоні СВЧ у параметричних підсилювачах називається параметричним діодом[4].

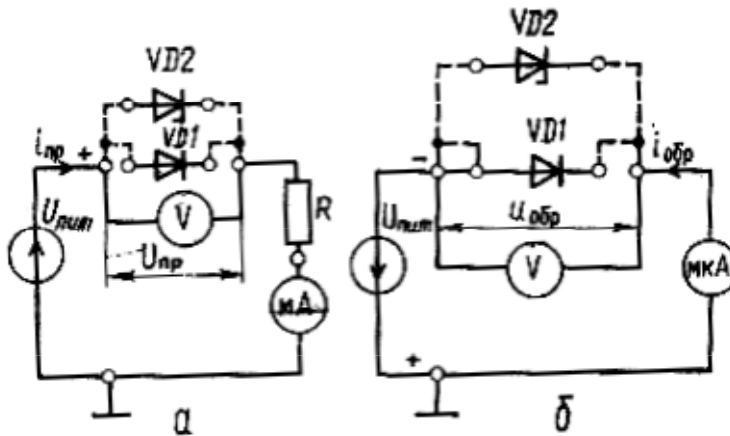


Рис. 7.7

8. Схеми ввімкнення досліджуваних приладів

При дослідженні характеристик напівпровідникових діодів рекомендуються схеми: для зняття ВАХ ВД, ВЧ-діода, ІД і НС - Рис. 7.7 (а - пряме ввімкнення; б - зворотне ввімкнення); для зняття ВАХ ТД - Рис. 7.8, а; для зняття вольт-фарадної характеристики варикапа - Рис. 7.8, б; для

дослідження динаміки приладів: Рис. 7.8, в – ВД та СВЧ-діода; Рис. 7.3, а – імпульсного діода.

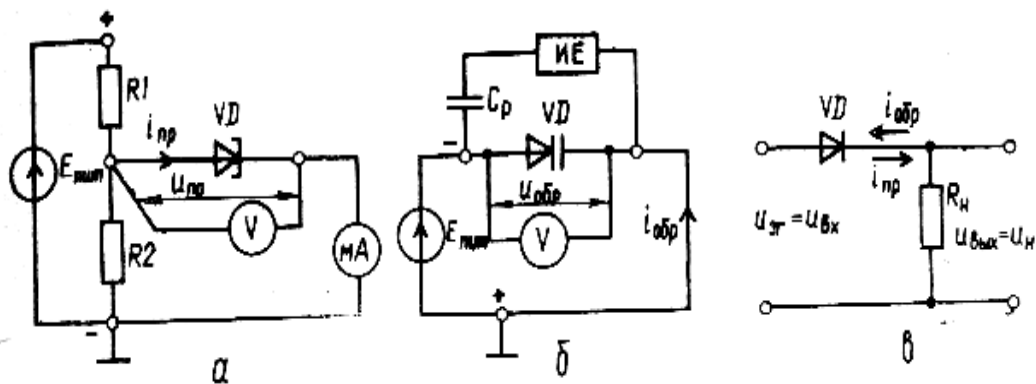


Рис. 7.8

Підготовка до роботи

1. Користуючись методичними вказівками, або рекомендованою літературою і конспектом лекцій, вивчити призначення, принцип дії, позначення, конструктивне виконання, схеми ввімкнення, основні характеристики і параметри, властивості, особливості і галузі застосування напівпровідникових приладів, які підлягають дослідженню.
2. Накреслити їх вольт-амперні характеристики .
3. Визначити за довідником діапазони зміни вимірюваних параметрів і їхні гранично допустимі значення.
4. Накреслити схему експерименту і при необхідності розрахувати її елементи.

Проведення досліджень

1. Експериментально зняти вольт-амперні характеристики кремнієвого і германієвого випрямного діодів, ВЧ- та імпульсного діода, стабілітронів з лавинним і тунельним механізмами пробією, тунельного діода при кімнатній температурі. Порівняти ВАХ кремнієвого і германієвого ВД за значеннями зворотного струму і прямого спаду напруги на приладі; порівняти ВАХ ВД-, ВЧ-діодів з ІД.
2. Зняти вольт-фарадну характеристику варикапа.
3. За знятими характеристиками визначити основні параметри досліджуваних приладів.
4. Дослідити ВД- і ВЧ-діоди в динамічному режимі при входному гармонічному сигналі (Рис. 7.8, в). Зняти їх амплітудно-частотну характеристику. Визначити $I_{np.cер.}$ і $U_{np.cер.}$ [1]. Оцінити вплив частоти входного сигналу на властивість односторонньої провідності ВД (при підвищенні частоти входного сигналу ця властивість починає

порушуватися через шунтування високого зворотного опору ВД малим ємнісним опором бар'єрної ємності діода).

5. Дослідити можливість використання у випрямлячах діодів, що мають значення $U_{об.мах.}$ менші, ніж величина випрямлюваної напруги, шляхом їхнього послідовного ввімкнення.

6. Дослідити можливість одержання прямого струму ВД більшого, ніж $I_{пр.мах.}$ шляхом паралельного з'єднання діодів.

7. Дослідити динаміку роботи імпульсного діода, подавши на нього різнополярні прямокутні імпульси (Рис. 7.3, а). Визначити параметри $\tau_{уст}$ і $\tau_{відн}$ (Рис. 7.3, б). Для цього рекомендується скористатися двопробним осциллографом.

8. Порівняти експериментально отримані результати з теоретичними і зробити висновки.

Контрольні питання

1. Чим відрізняються ВАХ реального діода та р-п переходу?
2. Як позначаються на схемах напівпровідникові діоди?
3. В чому полягає принцип дії досліджуваних діодів?
4. Назвіть основні характеристики і параметри досліджуваних НД.
5. Як включаються досліджувані НД в електричне коло?

Список рекомендованої літератури

1. Скаржепа В.А., Луценко А.И. Электроника и микросхемотехника Учебник: В 2 ч. / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989 - Ч. 1. - 432 с.
2. Жеребцов И.П. Основы электроники.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. —352с.
3. Руденко В.С., Сенако В.И., Трифонюк В.В. Основы промышленной электроники. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. - 400 с.
4. Крупякова М.Г., Чарыков Я.Л., Юдин В.В. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. - М: Радио и связь, 1983. - 352 с.
5. Иванов В.И., Аксенов А.И., Юшин А.М. Справочник по полупроводниковым оптоэлектронным приборам /Под ред. Н.Н. Горюнова. —М.: Энергоатомиздат, 1984. —184с.
6. Скаржепа В.А., Новацкий А.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника. Лабораторный практикум. / Под общ. ред. А.А.Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989. - 279 с.
7. Полупроводниковые приборы: Транзисторы: Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. - 2-е изд., перераб и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1985. - 904 с.
8. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под общ. ред. А.А. Куликовского. —М.: Энергия, 1977. — 576с.

Лабораторна робота № 8

Дослідження транзисторів

Мета роботи: вивчення принципу дії і основних властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами і застосуванням транзисторів.

Теоретичні відомості

Транзистором називають електроперетворювальний напівпровідниковий прилад із електронно-дірковими переходами, призначений для посилення потужності, містить три виводи. Найбільш поширеними є біполярні і польові транзистори.

На рис. 8.1 приведені умовні графічні позначення транзисторів. Відмінність у маркуванні транзисторів і напівпровідникових діодів в тому, що другий елемент містить літеру Т для біполярних і П - для польових транзисторів.

Біполярні транзистори (БТ). БТ з'явилися першими в сімействі транзисторів, тому їх часто називають просто транзисторами. Термін «біполярний» характеризує участь у роботі транзистора носіїв заряду двох полярностей: електронів і дірок. Умовні позначення $p-n-p$ і $n-p-n$ БТ приведені на рис. 8.1, а і б.

БТ являє собою структуру $p-n-p$ або $n-p-n$ типу, отриману в одному монокристалі напівпровідника (рис. 8.1, а і б). Внутрішня область, що розділяє $p-n$ переходи, називається базою. Зовнішній шар, призначений для інжектування носіїв у базу, називається емітером, а $p-n$ перехід П 1, що примикає до емітера, - емітерним.

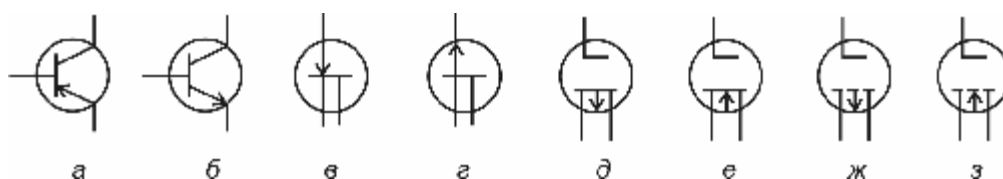


Рис. 8.1

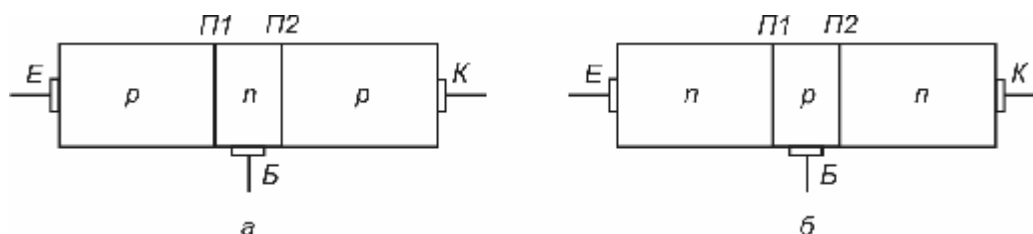


Рис. 8.2

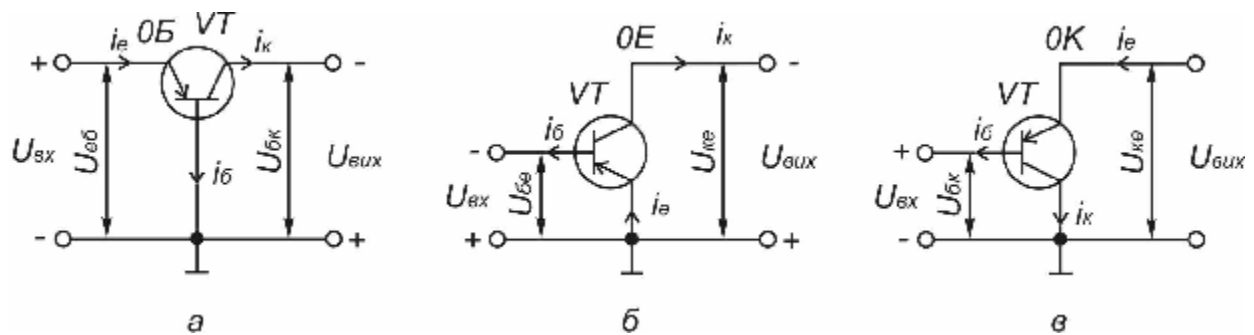


Рис. 8.3

Інший зовнішній шар, що екстрагує (витягує) носії з бази, - колектор, а $p-n$ перехід П2 - колекторний. Для виготовлення біполярних транзисторів у якості вихідних матеріалів в основному використовують кремній або германій, а $p-n$ переходи одержують за спавною, дифузійною, епітаксіальною, планарною і іншими технологіями. Перші транзистори були точковими, але вони працювали нестійко, тому в наш час застосовуються переважно площинні транзистори. Конструкції транзисторів приведені в [1, 4, 8]. Основними їхніми особливостями є те, що товщина бази повинна бути менша дифузійної довжини пробігу неосновних носіїв, інжекттованих із емітера в базу (декілька мікрометрів), емітер повинен містити значно більшу концентрацію домішок, ніж база, а площа колекторного переходу повинна бути більша, ніж емітерного.

Транзистор - активний елемент, що підсилює потужність електричного сигналу. Це посилення відбувається за рахунок споживання енергії зовнішніх джерел напруги. Змінюючи струм у входному колі за певним законом, можна одержати посилений сигнал на виході тієї ж форми.

У електричне коло транзистор вмикають таким чином, що один із його виводів (електродів) є входним, другий - вихідним, а третій - загальним для входного і вихідного кола. У залежності від того, який електрод є загальним, розрізняють три схеми вмикання транзисторів: із загальною базою ЗБ, із загальним емітером ЗЕ і з загальним колектором ЗК. Ці схеми для транзистора типу $p-n-p$ приведені на рис. 8.3. Для транзистора $n-p-n$ у схемах вмикання змінюються лише полярності напруг і напрямки струмів.

Варто пам'ятати, що в підсилювальному режимі роботи транзистора його емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний - у зворотному, незалежно від схеми вмикання.

Найбільш поширеною є схема із ЗЕ (рис. 8.3, б), яка має найбільше підсилення потужності. Кожна схема вмикання, у загальному випадку, характеризується чотирма сімействами статичних ВАХ: а - вихідними; б - входними; в - характеристиками зворотного зв'язку за напругою; г - характеристиками передачі струму. Перші дві з них є основними.

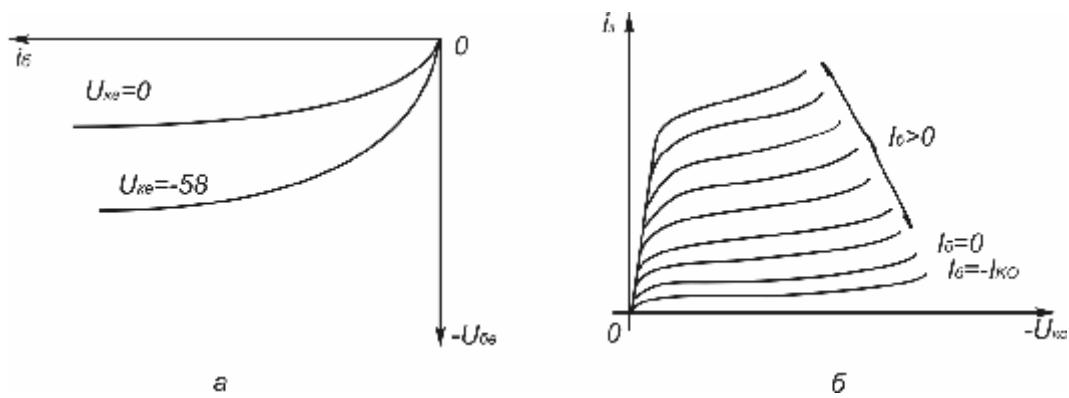


Рис. 8.4

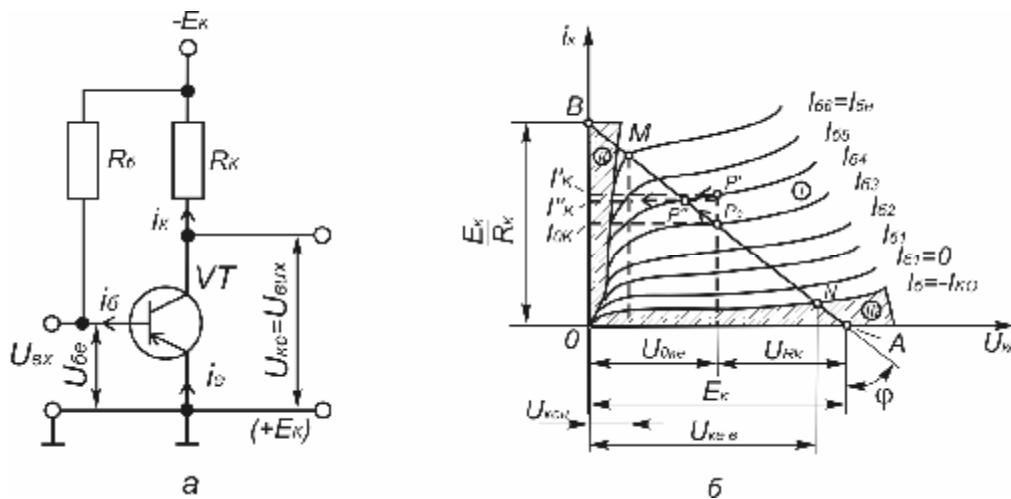


Рис. 8.5

На рис. 8.4 приведені: *а* - входні; *б* - вихідні характеристики схеми із ЗЕ.

Статичні ВАХ (рис. 8.4) знімаються при відсутності опору навантаження у вихідному колі. При наявності цього опору (рис. 8.5, а) говорять про динамічний режим роботи транзистора. У такому режимі зміни колекторного струму при $E_k = \text{const}$ і $R_k = \text{const}$ залежать не тільки від зміни базового струму, але і від зміни напруги на колекторі, яка, у свою

$$|U_{ke}| = |E_k| - |I_k R_k| \quad (8.1)$$

чергу, визначається змінами як базового, так і колекторного струмів, тобто в динаміці одночасно змінюються всі струми і напруги в транзисторі (I_B -, I_k -, U_{ke} -, I_k -). Характеристики, що визначають зв'язок між струмами і напругами транзистора при наявності опору навантаження, називаються динамічними. Вони будуються на сімействах статичних ВАХ при заданих значеннях E_k і R_k . Для побудови динамічної вихідної характеристики схеми із ЗЕ (рис. 8.5, б) використане рівняння динамічного режиму (8.1), що являє собою рівняння прямої. Точка перетину динамічної характеристики (навантажувальної прямої) з однією зі статичних ВАХ називається робочою точкою транзистора. Змінюючи I_B , можна

переміщати її по навантажувальній прямій. Початкове положення цієї точки при відсутності вхідного змінного сигналу називають точкою спокою - P_0 . Існує 3 основних режими роботи транзистора: активний (лінійний, підсилювальний), насичення й відсічки. Поняття режиму пов'язано з наявністю трьох областей у транзистора; активної, насичення й відсічки. На рис. 8.5, б вони позначені відповідно I , II і III . Область відсічки III обмежена зверху ВАХ відповідною $I_B = -I_{ko}$ (обидва $p-n$ переходи транзистора закриті). Область насичення II обмежена справа майже прямою лінією, із якої виходять статичні ВАХ (обидва $p-n$ переходи транзистора відкриті). Активна область I лежить між областями відсічки і насичення (емітерний перехід відкритий, а колекторний закритий). У активному режимі точка спокою транзистора P_0 знаходиться приблизно посередині ділянки навантажувальної прямої MN (рис. 8.5, б) і робоча точка не виходить за межі ділянки MN . У режимі насичення робоча точка знаходиться в області насичення, а в режимі відсічки - відповідно в області відсічки. Активний режим є основним. Він використовується в більшості підсилювачів, генераторів і ін. Режими відсічки і насичення характерні для імпульсної роботи транзистора і використовуються в імпульсних пристроях.

При аналітичному розрахунку транзисторних каскадів, що дозволяє провести кількісне оцінювання їхніх параметрів, користуються малосигнальними еквівалентними схемами транзисторів (МЕС) [1-4]. Ці схеми відбивають структурний зв'язок малосигнальних параметрів транзистора в режимі посилення змінного струму. Малосигнальні параметри є кількісним вираженням зв'язку між малими змінами напруг і струмів у лінійній області характеристик транзистора. МЕС являють собою лінійні кола і діляться на 2 групи: еквівалентні схеми, складені з врахуванням фізичних властивостей транзистора, його структури і т.д. (фізичні еквівалентні схеми, моделі), і еквівалентні схеми, що відбивають властивості транзистора як активного лінійного чотириполюсника (формальні еквівалентні схеми). Перші МЕС характеризуються фізичними параметрами транзистора (власними або внутрішніми параметрами), а другі МЕС-параметрами транзистора як чотириполюсника (характеристичними параметрами). Обидві групи МЕС можна використовувати для транзисторних каскадів, що працюють в активній області. Еквівалентну схему, що містить фізичні параметри транзистора, можна скласти для будь-якої схеми вмикання (ЗБ, ЗЕ, ЗК).

Характеристичні параметри транзистора можна знайти, якщо формально зобразити його у вигляді активного лінійного чотириполюсника (рис. 8.6, а, б), а зв'язок між напругами і струмами на його вході і виході - у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2, \end{aligned} \quad (8.2)$$

де $h_{11} = U_1/I_1$ і $h_{21} = I_2/I_1$ - вхідний опір і коефіцієнт передачі (посилення) струму, обумовлені в режимі короткого замикання змінного струму на виході транзистора $U_2 = 0$; $h_{12} = U_1/U_2$ і $h_{22} = I_2/U_2$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою і вихідна провідність, обумовлені в режимі холостого ходу х.х. на вході транзистора ($I_1 = 0$). Для реалізації режиму х.х. на вході і к.з. на виході досить ввімкнути велику індуктивність на вході транзистора і велику ємність на виході, не змінюючи при цьому зворотного режиму роботи з постійного струму.

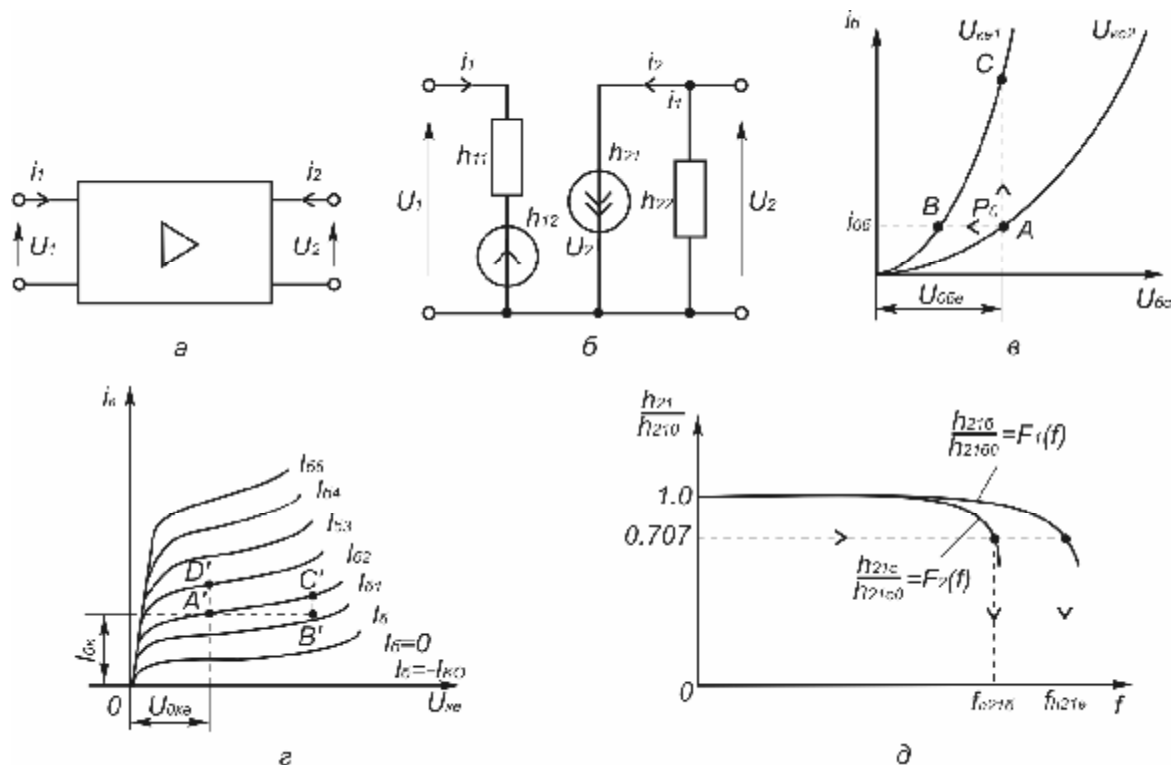


Рис. 8.6

Наближені значення h -параметрів можна визначити графоаналітичним способом на лінійних ділянках вхідних і вихідних статичних характеристик транзистора. Для визначення всіх h -параметрів необхідно мати не менше двох характеристик кожного сімейства (вхідних і вихідних). Параметри розраховуються за кінцевими збільшеннями струмів і напруг біля робочої точки транзистора. У цьому випадку для схеми із загальним емітером справедливі такі рівняння:

$$\begin{aligned} \Delta U_{BE} &= h_{11}\Delta I_B + h_{12}\Delta U_{KE} \\ \Delta I_K &= h_{21}\Delta I_B + h_{22}\Delta U_{KE}, \end{aligned} \quad (8.3)$$

де

$$h_{11} = \left| \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=\text{const}}; h_{21} = \left| \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=\text{const}};$$

$$h_{12} = \left| \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B=\text{const}}; h_{22} = \left| \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B=\text{const}}.$$

Наприклад, для визначення параметрів h_{11} і h_{12} схеми із 3Е на сімействі вхідних характеристик у робочій точці А будують трикутник АВС (з А проводять прямі, рівнобіжні осі абсцис і осі ординат до перетину з другою характеристикою в точках В і С), рис. 8.6,в. З отриманого характеристичного трикутника знаходять усі значення, необхідні для визначення h_{11} і h_{12} :

$$h_{11} = \left| \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right| = \frac{AB}{AC}, h_{12} = \left| \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{KE}} \right| = \frac{AB}{|U_{KE2} - U_{KE1}|}. \quad (8.4)$$

У робочій точці А' на вихідних характеристиках (рис. 8.6,з) визначають параметри h_{22} і h_{21} :

$$h_{21} = \left| \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right| = \frac{A'D'}{I_{B2} - I_{B1}}; h_{22} = \left| \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right| = \frac{B'C}{AB'} \quad (8.5)$$

Аналогічно можна визначити h- параметри для схеми із 3Б [1-3].

Частотні властивості БТ. Фізична Т-образна еквівалентна схема БТ на високих частотах містить ємності C_K і C_E , які шунтують колекторний і емітерний переходи. Тому властивості транзисторів залежать від частоти сигналу. Особливо сильно на роботу БТ в області високих частот впливає ємність C_K , тому що її ємнісний опір виявляється значно меншим, ніж опір зворотного зміщеного колекторного переходу r_K . Це приводить до зменшення струму, що передається на навантаження, тобто до зменшення коефіцієнта передачі струму $h_{21Б}$ у схемі із 3Б і коефіцієнта підсилення струму $h_{21Е}$ в схемі із 3Е. Граничною вважається частота, при якій модуль коефіцієнта передачі (підсилення) струму зменшується на 3 дБ у порівнянні зі значенням на середніх частотах. Вона позначається $f_{h21Б}$ для схеми із 3Б і $f_{h21Е}$ для схеми із 3Е (рис. 8.6,д). Параметри $b_{21Е0}$ і $h_{21Б0}$ відповідають значенням коефіцієнтів підсилення і передачі струму на середніх частотах. При підвищенні частоти коефіцієнт $h_{21Б}$ зменшується

набагато більше, ніж $b_{21Б}$, тому схема із ЗЕ має значно гірші частотні властивості в порівнянні зі схемою із ЗБ:

$$f_{h_{21E}} \approx \frac{f_{h_{21Б}}}{h_{21E}} \quad (8.6)$$

Властивості транзисторів істотно залежать від температури. Підвищення температури, у першу чергу, збільшує зворотний струм насичення колекторного переходу (початковий струм колектора). Це приводить до зміни характеристик транзистора. Тому часто схеми на транзисторах містять елементи температурної стабілізації [1,3].

При конструктивному виконанні транзисторних схем (особливо потужних) необхідно передбачити заходи щодо відведення тепла від транзистора [1-4,8].

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схеми для зняття сімейства статичних ВАХ БТ, включеного за схемою із ЗБ (рис. 8.3, а) і ЗЕ (рис. 8.3, б), використавши для цього наявні в лабораторії дискретні елементи і вимірювальні прилади: вольтметри і мікро(мілі)амперметри.

2. Накреслити схему для дослідження динамічного режиму роботи БТ (рис. 8.5, а). Значення опору R_k вибрати рівним 1...5 кОм, а R_B у залежності від значень I_{OB} і U_{OBE} розрахувати за формулою $R_B = \frac{E_k - U_{OBE}}{I_{OB}}$.

Значення E_k вибрати за знятими вихідними статичними ВАХ БТ, включеного за схемою із ЗЕ.

3. Нарисувати очікуваний вид характеристик досліджуваних БТ і визначити за довідником діапазони зміни параметрів, що вимірюються і їх гранично допустимі значення.

Проведення досліджень

1. Експериментально зняти і побудувати сімейства вхідних і вихідних статичних характеристик БТ, включеного за схемою із ЗБ і ЗЕ, при кімнатній температурі. При знятті ВАХ схеми із ЗБ (рис. 8.3,а) використовувати джерело струму у вхідному колі, тому що схема із ЗБ має малий вхідний опір.

2. За знятими ВАХ для схем із ЗБ і ЗЕ визначити h -параметри БТ і пояснити їх фізичну суть.

3. Користуючись формулами, обчислити для схем із ЗБ і з ЗЕ значення фізичних параметрів через визначені в п. 2 h -параметри.

4. Дослідити динамічний режим роботи БТ (режим із навантаженням, рис. 8.5, а). Звернути увагу на взаємозв'язок у динаміці значень I_k ; U_{KE} , I_B і оцінити вплив значення R_k на динаміку роботи БТ. Побудувати на вихідних ВАХ БТ навантажувальні прямі для різних значень R_k .

5. Зняти амплітудно-частотну характеристику БТ, включеного за схемою із ЗЕ. Визначити значення граничних частот f_{h21E} і f_{h21B} порівняти їх між собою. При знятті АЧХ скористатися схемою, приведеною на рис. 8.5,а. Значення f_{h21E} визначити за знятою АЧХ, а f_{h21B} — з формули (8.6).

7. Порівняти експериментальні дані з теоретичними і зробити відповідні висновки.

Контрольні питання

1. Опишіть принцип дії БТ, приведіть його схеми вмикання і статичні ВАХ.
2. Які три області (режиму) роботи має БТ?
3. Охарактеризуйте особливості динамічного режиму роботи БТ.
4. Як визначити h -параметри БТ за його ВАХ?
5. Як визначити фізичні параметри БТ через його h -параметри?
6. Чим визначаються частотні властивості БТ?
7. Охарактеризуйте основні параметри транзисторів і особливості їх застосування.

Список рекомендованої літератури

1. Скаржепа В.А., Луценко А.И. Электроника и микросхемотехника. Учебник: В 2 ч. / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989. Ч. 1. - 432 с.
2. Жеребцов И.П. Основы электроники.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. —352с.
3. Руденко В.С., Сенако В.И., Трифонюк В.В. Основы промышленной электроники. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. - 400 с.
4. Крупякова М.Г., Чарыков Я.Л., Юдин В.В. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. - М: Радио и связь, 1983. - 352 с.
5. Иванов В.И., Аксенов А.И. , Юшин А.М. Справочник по полупроводниковым оптоэлектронным приборам / Под ред. Н.Н.Горюнова. —М.: Энергоатомиздат, 1984. —184с.
6. Скаржепа В.А., Новацкий А.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника. Лабораторный практикум. / Под общ. ред. А.А.Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989. - 279 с.
7. Полупроводниковые приборы: Транзисторы: Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. - 2-е изд., перераб и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1985 - 904 с.
8. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под общ. ред. А.А. Куликовского. – М.: Энергия, 1977. — 576с.

Лабораторна робота № 9

Дослідження польових транзисторів

Мета роботи – вивчення принципу дії та основних властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням польових транзисторів.

Теоретичні відомості

Загальні відомості про транзистори, їх умовні графічні позначення наведені у теоретичній частині лабораторної роботи № 8.

Польові транзистори (ПТ). ПТ (рис. 8.1, в – з) – це транзистор, у якому струм створюють основні носії заряду під дією повздовжнього електричного поля, а керування струмом здійснюється поперечним полем, яке утворюється напругою на керуючому електроді. ПТ – уніполярні напівпровідникові прилади, їх робота основана на дрейфі носіїв заряду одного знака в повздовжньому електричному полі через керований канал n або p -типу. Для виготовлення ПТ в основному використовується кремній, він має значно менший зворотний струм насичення, ніж германій. Конструкції ПТ приведені в [3, 4, 8]. У електронних пристроях застосовуються два різновиди ПТ: із затвором у вигляді p - n переходу та з ізольованим затвором (МДН- або МОН-транзистори).

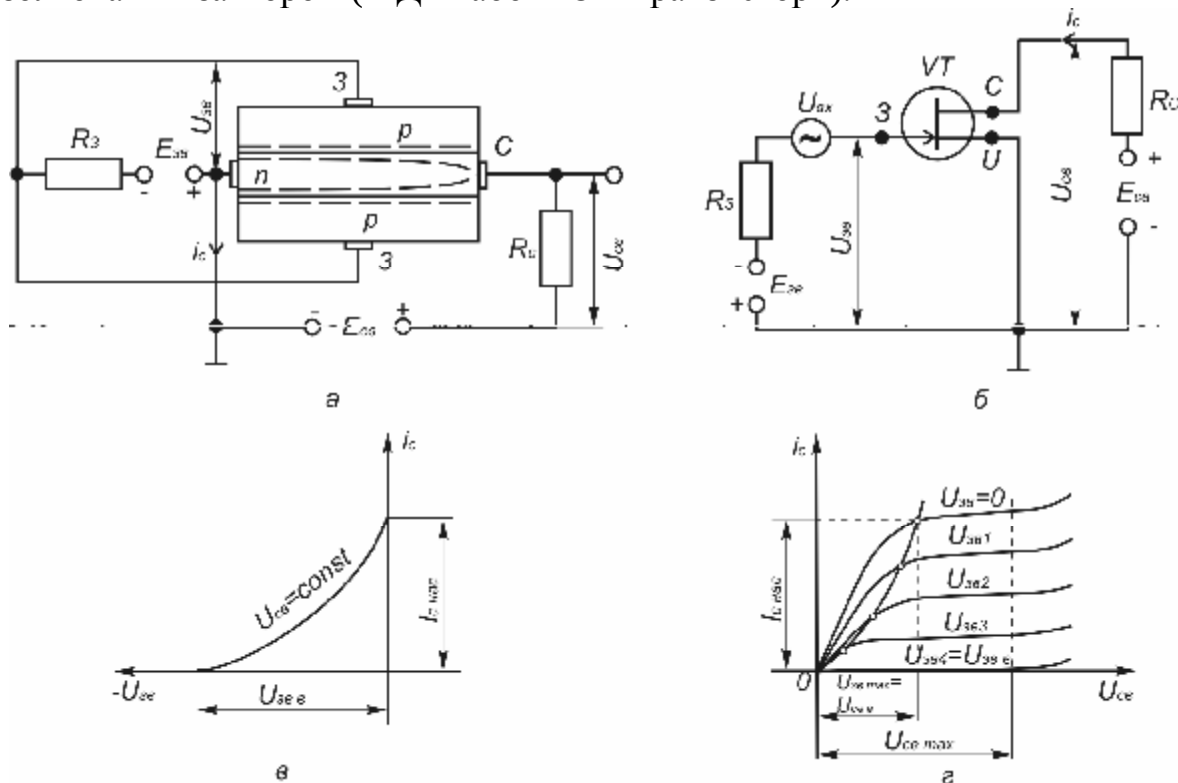


Рис.9.1. Структура та схема включення (а,б) ПТ із затвором у вигляді p - n -переходу та каналом n -типу, характеристики ПТ (в,г).

В залежності від провідності каналу польові транзистори діляться на: ПТ із каналом p -типу і n -типу. Канал p -типу має діркову провідність, а n -типу – електронну. На рис. 9.1, *а, б* у якості прикладу зображені структура і схема вмикання ПТ із затвором у вигляді p - n переходу і каналом n -типу. На затвор подається напруга зворотної полярності щодо витоку. Ширина p - n переходів, а, отже, ефективна площа поперечного перерізу каналу, його опір і струм у каналі залежать від цієї напруги. З його зростанням розширюються p - n переходи, зменшується площа перерізу каналу, збільшується його опір, отже зменшується струм у каналі. Ці процеси ілюструє стокозатворна характеристика (характеристика передачі) такого ПТ. При напрузі відсічки на затворі $\bar{U}_{3B\bar{I}} = \bar{U}_{3B, відс}$ канал практично замикається, ефективна площа його поперечного перерізу прямує до нуля, опір каналу прямує до нескінченності, а $I_C = 0$ (рис. 9.1, *в*). Варто звернути увагу, що ПТ із затвором у вигляді p - n - переходу працює при керуючій напрузі на затворі лише однієї полярності (для каналу типу n - негативної, а типу p - позитивної).

На рис. 9.1, *г* приведені стокові (вихідні) характеристики розглянутого ПТ. Стокові характеристики мають яскраво виражену ділянку насичення. Це пояснюється тим, що в процесі протікання струму в каналі, що спочатку росте при збільшенні U_{CB} , збільшується падіння напруги в каналі. Це падіння в області стоку має позитивне значення, тому зміщує p - n переходи в зворотному напрямку. Переріз каналу починає зменшуватися. Відбувається перекриття каналу (спочатку в області стоку, а потім воно поширюється всередину до витоку, рис. 9.1, *а*). Це призводить до того, що розмір струму I_C практично не змінюється при збільшенні U_{CB} . Межами області насичення (рис. 9.1, *г*) є: $U_{CBнас} = U_{3B}$ при $U_{3B} = 0$ (при цьому $I_C = I_{Cнас}$); $U_{CBнас} = U_{3B} - U_{3B}^1$ при $U_{3B}^1 > 0$ (значення струму стоку насичення зменшується). У робочому режимі використовуються лінійні ділянки вихідних характеристик ПТ. При великих напругах на стоку може відбутися пробій структури ПТ. Тому в робочому режимі перевищення максимальної напруги U_{CBmax} неприпустиме.

Характерним для ПТ із ізольованим затвором, які називають також МДН - (метал-діелектрик-напівпровідник) або МОН - (метал-окисел-напівпровідник) польовими транзисторами, є те, що в них між металевим затвором і областю напівпровідника знаходиться прошарок діелектрика, у якості якого часто використовують двоокис кремнію SiO_2 . Існують два різновиди МДН (МОН) ПТ: з вбудованим каналом (рис. 8.1, *д, е*) і з індукованим каналом (рис. 8.1, *ж, з*).

Наявність прошарку діелектрика дозволяє в такому ПТ подавати на затвор керуючу напругу обох полярностей.

При подачі на затвор позитивної напруги електричним полем, що при цьому створюється, дірки з каналу будуть виштовхуватись у підкладку, а електрони витягуватись з підкладки в канал. Канал збагачується основними носіями заряду – електронами, його провідність

збільшується. Цей режим називається режимом збагачення. При подачі на затвор негативної напруги електрони з каналу виштовхуються в підкладку, а дірки втягуються з неї в канал. Канал збіднюється основними носіями заряду і його провідність зменшується. Такий режим називається режимом збіднення.

У МОН ПТ із індукованим каналом на відміну від ПТ з вбудованим каналом канал між областями витоку і стоку при виготовленні транзистора технологічно не створюється, а індукується за рахунок явища інверсії, що виникає в системі метал-діелектрик-напівпровідник. МОН ПТ із індукованим каналом керується напругою затвора лише одного знака.

Основні параметри ПТ приведені в [1- 4,8].

Подібно біполярним транзисторам ПТ можна ввімкнути в електричне коло за однією з трьох схем; ЗВ – загальним витоком; ЗЗ – загальним затвором і ЗС – загальним стоком. Основною є схема вмикання ПТ із загальним витоком (рис. 9.1, б).

Польові транзистори мають такі основні властивості: низький рівень власних шумів (відсутній рекомбінаційний флуктуаційний шум, характерний для біполярних транзисторів), високий вхідний опір – (у МОН ПТ складає тисяча мегаом), висока економічність (управляється не струмом, як БТ, а напругою (полем)); висока стійкість до дії іонізуючого випромінювання і висока радіаційна стійкість, можливість використання МОН ПТ для виготовлення високо економічних інтегральних схем із великим ступенем інтеграції; менша, ніж у БТ, залежність параметрів від температури. Недоліком МОН ПТ є те, що вони можуть вийти з ладу при випадковому виникненні на затворі статичних електричних зарядів.

ПТ застосовуються в якості вхідних підсилювальних каскадів із високим вхідним опором, у запам'ятовувальних пристроях при виготовленні інтегральних схем із високим ступенем інтеграції та ін.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Накреслити схеми для зняття сімейства статичних ВАХ ПТ із затвором у вигляді *p-n* переходу, *МДН ПТ* з вбудованим та індукованим каналами, що ввімкнені за схемою ЗВ. Для виконання цього пункту використати наявні у лабораторії дискретні елементи та вимірювальні прилади.
3. Нарисувати вигляд характеристик досліджуваних ПТ та визначити за довідником діапазони зміни вимірювальних параметрів та їх гранично допустимі значення.
4. Експериментально зняти та побудувати сімейства стокозатворних та стокових статичних ВАХ характеристик ПТ з *p-n* переходами та МОН

ПТ з вбудованим та індукованими каналами для схеми із загальним витоком (рис.9.1, б).

5. Порівняти отримані результати між собою та зробити відповідні висновки.

Контрольні питання

1. Назвіть типи ПТ та вкажіть особливості їх структури.
2. Наведіть ВАХ ПТ з *p-n* переходами та МОН ПТ та дайте порівняльну характеристику.
3. Чим обумовлена наявність ділянки насичення струму стоку I_c на вихідних (стокових) характеристиках ВАХ ПТ?
4. Охарактеризуйте основні параметри транзисторів та особливості їх використання.
5. Умовні графічні позначення існуючих транзисторів.

Список рекомендованої літератури

1. *Скаржєна В.А., Луценко А.И.* Электроника и микросхемотехника. Учебник: В 2 ч. / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989. Ч. 1. - 432 с.
2. *Жеребцов И.П.* Основы электроники.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. —352с.
3. *Руденко В.С., Сенако В.И., Трифонюк В.В.* Основы промышленной электроники. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. - 400 с.
4. *Крупякова М.Г., Чарыков Я.Л., Юдин В.В.* Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. - М: Радио и связь, 1983. - 352 с.
5. *Иванов В.И., Аксенов А.И., Юшин А.М.* Справочник по полупроводниковым оптоэлектронным приборам / Под ред. Н.Н.Горюнова. —М.: Энергоатомиздат, 1984. —184с.
6. *Скаржєна В.А., Новацкий А.А, Сенько В.И.* Электроника и микросхемотехника. Лабораторный практикум. / Под общ. ред. А.А.Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989. - 279 с.
7. *Полупроводниковые приборы: Транзисторы:* Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. - 2-е изд., перераб и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1985. - 904 с.
8. *Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под общ. ред. А. А. Куликовского.* —М.: Энергия, 1977. — 576с.

Лабораторна робота №10

Дослідження тиристорів та одноперехідних транзисторів

Мета роботи – дослідження принципів дії, основних властивостей, характеристик і параметрів тиристорів і одноперехідних транзисторів (ОТ), їх експериментальне дослідження, набуття навичок їх застосування.

Теоретичні відомості та методичні вказівки

Тиристори. Тиристором називається електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, що містить три і більше p - n переходів, вольт-амперна характеристика якого має ділянку від'ємного диференціального опору.

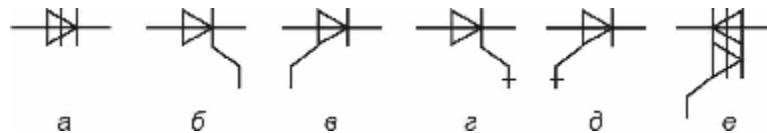


Рис.10.1

Якщо такий прилад ввімкнути в електричне коло змінного струму, то він відкривається, пропускаючи струм у навантаження, коли миттєве значення напруги на ньому досягне певного рівня або при подачі напруги відкриття на спеціальний керуючий електрод.

Тиристори є ключовими елементами і довгий час можуть знаходитись в одному з двох стійких станів: включеному або виключеному. За числом зовнішніх електродів вони діляться на двоелектродні (некеровані) – діодні тиристори і триелектродні (керовані) – тріодні тиристори.

На рис. 10.1 приведені позначення тиристорів на схемах електричних принципів. Маркування тиристорів аналогічне тому, яке використовують для напівпровідникових діодів і транзисторів. Відмінність у тому, що другий елемент позначення має букву Y із цифрою, яка вказує на тип тиристора. Конструкції тиристорів приведені в [3, 4, 8].

Найпростіший тиристор (діодний) являє собою чотиришаровий напівпровідниковий прилад, що складається з чотирьох областей із провідностями p - і n -типу, які послідовно чергуються, (рис.10.2, а). Крайні області p_1 і n_2 називаються емітерами, а середні n_1 і p_2 - базами, p - n переходи $П1$ і $П3$ - емітерні, а $П2$ - колекторний. До областей p_1 і n_2 підводяться металеві контакти A і K , названі анодом і катодом.

На рис.10.2, б приведені відповідно схема вмикання в електричне коло і вольт-амперна характеристика діодного тиристора.

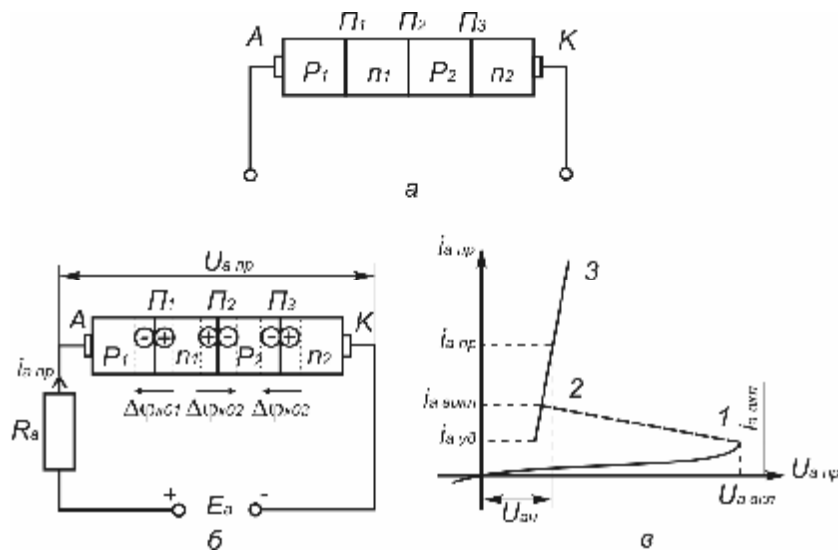


Рис.10. 2

При відсутності зовнішньої напруги ($E_a=0$) у p - n переходах діодного тиристора виникають потенціальні бар'єри Dj_{k01} , Dj_{k02} , Dj_{k03} (рис. 10.2, б). Структура знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Струми, що протікають у ній, врівноважують один одного і сумарний струм дорівнює нулю. Якщо до тиристора прикласти пряму напругу $U_{a, пр} < U_{a, вкл}$ (рис. 10.2, б), то переходи $П1$ і $П3$ зміщуються в прямому, а $П2$ - в зворотному напрямку. Висота потенціальних бар'єрів $П1$ і $П3$ зменшується. Дірки будуть інжектувати з емітера p_1 у базу n_1 , а електрони – з емітера n_2 у базу p_2 . Поле зворотно зміщеного переходу $П2$ дірки з бази n_1 виводяться в базу p_2 , а електрони – із бази p_2 у базу n_1 (явище екстракції). Поява в базах n_1 і p_2 додаткових основних носіїв зарядів ще більше зменшує висоту потенціальних бар'єрів переходів $П1$ і $П3$. Це викликає додаткову інжекцію дірок і електронів через переходи $П1$ і $П3$. Далі описані процеси повторюються. Із збільшенням прямої напруги $U_{a, пр}$ відбувається поступове насичення баз n_1 і p_2 основними носіями зарядів і зменшення їхнього опору. При певному значенні $U_{a, пр} > U_{a, вкл}$ описаний процес приймає лавиноподібний характер (у структурі діє внутрішній позитивний зворотний зв'язок). Різко зменшуються опори областей p_2 і n_1 і відкривається перехід $П2$. Струм $I_{a, пр}$ збільшується, а напруга $U_{a, пр}$ зменшується. У ВАХ з'являється ділянка від'ємного диференціального опору - ділянка 1-2 (рис. 10.2, в). Тиристор відкривається – переходить із закритого стану (ділянка 0-1) у відкритий (ділянка 2-3). Закритому стану відповідає високий диференціальний опір, а відкритому - малий.

Умови вмикання діодного тиристора: $U_{a, пр} \geq U_{a, вкл}$; $I_{a, пр} \geq I_{a, вкл}$, де $I_{a, вкл}$ – мінімальний прямий струм, що підтримує тиристор у ввімкненому стані (процес вмикання).

Для вимикання діодного тиристора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{a, пр} < I_{a, уд}$, де $I_{a, уд}$ – струм утримання – мінімальний

прямий струм, при якому тиристор ще залишається у ввімкненому стані (процес вимикання) або подати на прилад напругу зворотної полярності.

На відміну від діодного тиристора тріодний тиристор містить додатковий електрод - КЕ, що називають керуючим (рис.10.1, б - д). Від додаткового зовнішнього джерела E_y за рахунок струму керування $I_{упр}$ через керуючий електрод КЕ в базу p_2 вводиться додаткова кількість основних носіїв - дірок (рис. 10.3, а). Це дозволяє включити тріодний тиристор при меншому значенні $U_{a. вкл}$, ніж діодний (рис. 10.3, б). З ростом струму керування $U_{a. вкл}$ зменшується. При $I_{кер} = I_{кер. с}$ (струм випрямлення) відбувається випрямлення ВАХ тріодного тиристора, що перетворюється в характеристику звичайного діода.

Умова вмикання тріодного тиристора $U_{a. пр} \geq U_{a. вкл}$ при $I_y = const$, $I_{a. пр} \geq I_{a. вкл}$, де $I_{a. вкл}$ – мінімальний прямий струм, що підтримує тиристор у ввімкненому стані безпосередньо після його вмикання і зняття керування.

Для вимикання тріодного тиристора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{a. пр} < I_{a. уд}$, де $I_{a. уд}$ - струм утримання - мінімальний прямий струм, що не вимикає тиристор, протікаючи через нього при розімкненому ланцюзі керування, або подати на прилад напругу зворотної полярності.

Основні параметри тиристора приведені в [1-4,8].

Тиристори виготовляються на основі кремнію. В наш час створені кремнієві тиристори на струми від одиниць міліампер до десятків кілоампер і напругою від декількох вольт до декількох кіловольт. Швидкість наростання струму в них складає до 10^9 А/с. Час вмикання складає від сотих долей до десятків мікросекунд, час вимикання – від одиниць до сотень мікросекунд.

Застосування тиристорів обумовлено в основному двома властивостями: 1 – наявністю ділянки негативного опору; 2 – наявністю двох стійких станів. Перша властивість дозволяє використовувати тиристори в підсилюючих і генераторних схемах, а друга – застосовувати їх у ключових і перемикальних електронних пристроях різного призначення.

Одноперехідні транзистори ОТ. Одноперехідний транзистор (двобазовий діод) є напівпровідниковим приладом з одним р-п переходом і трьома зовнішніми електродами. Назва «двобазовий діод» пов'язана з конструктивною особливістю – наявністю р-п переходу і двох базових виводів, але не відображає принцип роботи і призначення приладу, що є активним елементом. Тому інша його назва - одноперехідний транзистор. На рис. 10.4, а, б показані відповідно структура, схема вмикання і вольт-амперна характеристики одноперехідного транзистора.

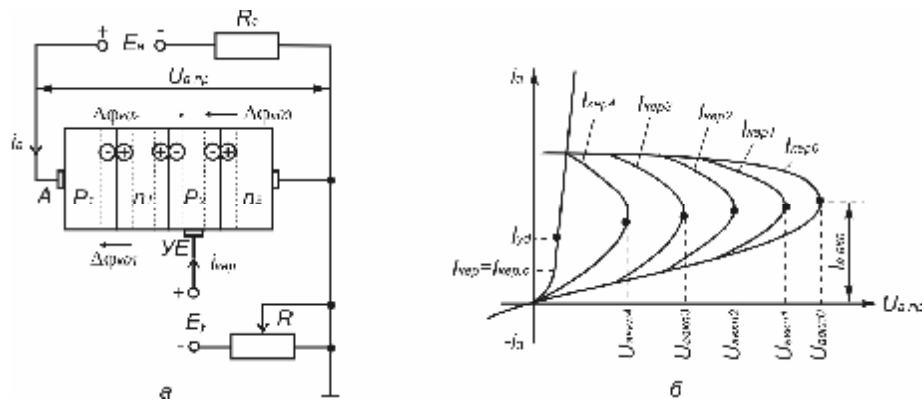


Рис. 10.3

Структура ОТ являє собою кристал високоомного напівпровідника (частіше всього кремнію) *n*-типу, у якому шляхом введення акцепторної домішки створюється емітерна область (емітер) *p*-типу. Повздовжні ділянки вихідного монокристалу, розташовані по обох сторонах від емітера, є верхньою *B2* і нижньою *B1* базами транзистора. При цьому нижня база *B1* у з'єднанні з емітером і *p*-*n* переходом між ними виконує функцію діода, а база *B2* є плечем у ділянці напруги зсуву U_B , що підходить до зовнішніх виводів баз. Конструкція ОТ приведена в [4].

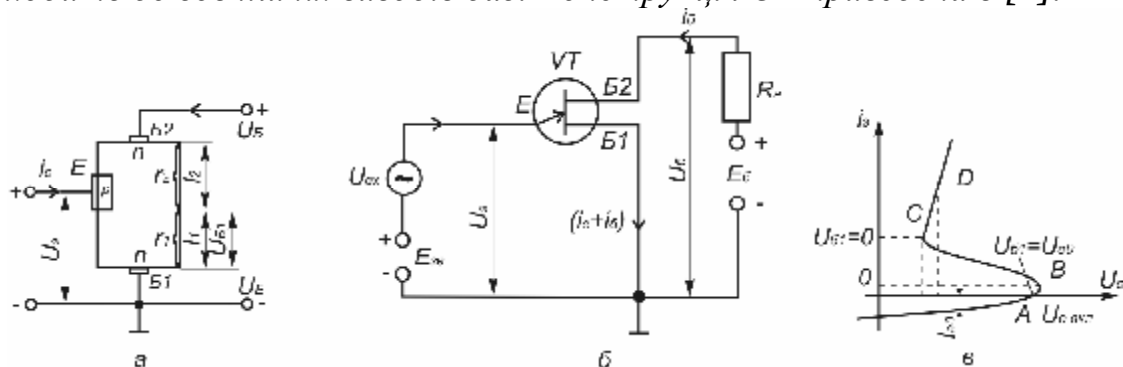


Рис.10.4

При наявності зовнішньої напруги зсуву ($U_B > 0$) і $U_s = 0$: через бази послідовно протікає невеликий струм зсуву (бази високоомні), що виділяє на базі *B1* невелику напругу $U_{B1} = I_B r_{10}$ де r_{10} - початковий (немодульований) опір бази *B1* при $U_s = 0$. Якщо на емітер подати напругу будь-якої полярності відносно бази *B1*, яка не перевищує за абсолютним розміром U_{B1} , то *p*-*n* перехід емітер-база *B1* стає зміщеним в зворотному напрямку. В колі емітера буде протікати зворотний струм переходу I_{E0} . Якщо до емітера прикласти позитивну напругу, то при її збільшенні зворотний струм I_{E0} зменшується і стає рівним нулю, коли $U_E = U_{E0} = U_{B1}$. Цей момент відзначений на вольт-амперній характеристиці ОТ (рис. 10.4,в) точкою *A*. При подальшому збільшенні позитивної напруги U_E , при якому виконується умова $U_E > U_{E0}$ перехід зміщується в прямому напрямку і через нього протікає прямий струм, що збільшується з ростом U_E (ділянка *AB*, рис.10.4,в). При протіканні прямого струму відбувається накопичення носіїв заряду в підемітерному прошарку - базі *B1*, що знижує її опір, а отже і напругу U_{B1} . Зменшення U_{B1} рівносильне збільшенню позитивної

напруги U_E щодо бази Б1. Потенціальний бар'єр знижується, створюючи умову для інжекції додаткових носіїв з емітера в базу Б1 і подальшого росту струму емітера. Відбувається подальше зниження опору бази Б1 (електрична модуляція бази). Такий процес розвивається лавиноподібно при певному значенні $U_E^3 U_{E_{\text{вкл}}}$ (рис. 10.4, в). Відбувається різке зростання струму емітера і зниження напруги на емітері, що призводить до появи ділянки з негативним диференціальним опором (ділянка ВР) на ВАХ ОТ. Коли прошарок бази Б1 насичується зарядами, його опір перестав зменшуватися, а ріст струму емітера пов'язаний із підвищенням напруги на емітері. При цьому має місце перехід від ділянки характеристики з негативним диференціальним опором до позитивного (ділянка СД, рис. 10.4, в).

При збільшенні напруги U_B ВАХ зміщується паралельно сама собі вправо без зміни форми, а при зниженні U_B - вліво. При $U_E=0$ ВАХ набуває вигляд характеристики звичайного діода (штрихова лінія на рис. 10.4, в). Основні параметри ОТ приведені у [1-4,8].

Одноперехідні транзистори застосовуються як ключові елементи в генераторах релаксаційних коливань, дільниках частоти, для керування тиристорами, у різних перемикальних пристроях і т.д. До переваг ОТ варто віднести простоту конструкції, стабільність напруги спрацьовування, мале споживання струму в колі керування, добру повторюваність параметрів від зразка до зразка. Недоліками ОТ є: порівняно невисока швидкодія ($f_{\text{max}}=100\ldots 300\text{кГц}$), велика потужність розсіювання, велика залишкова напруга, несумісність за рівнем сигналів з іншими дискретними елементами.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити призначення, принцип дії, позначення, конструкції, схеми ввімкнення, основні характеристики і параметри, властивості і застосування тиристорів і ОТ.

2. Нарисувати їх ВАХ.

3. Визначити за довідником діапазони зміни параметрів, що вимірюються і їх гранично допустимі значення.

4. Накреслити схему експерименту і при необхідності розрахувати її елементи. При дослідженні діодного тиристора за основу взяти схему, приведену на рис. 10.2,б, для дослідження тріодного тиристора – схему на рис. 10.3,а, для дослідження ОТ- схему на рис. 10.4,б, доповнивши їх вимірювальними приладами[1-4]. Значення опору R_A вибрати в залежності від значень I_{AH} і $U_{AH}(R_A=U_{AH}/I_{AH})$ Резистор R вибрати в залежності від діапазону зміни струму керування $\left(R = \frac{E_y}{I_y}\right)$. При дослідженні ОТ для зняття його ВАХ прийняти $u_{BX}=0$ і $R_H=0$.

5. Дослідити засоби вмикання і вимикання тиристора і вплив на його роботу значення анодного резистора R_A (Рис. 10.2, б; 10.3, а).

6. Оцінити вплив на ВАХ тиристора струму керування, а на ВАХ ОТ значення напруги U_B .

7. За знятими ВАХ визначити основні параметри досліджуваних приладів.

8. Порівняти результати досліджень із теоретичними і зробити висновки.

Контрольні питання

1. Приведіть структуру і схеми вмикання діодного і тріодного тиристорів.

2. У чому полягає принцип дії цих елементів?

3. Охарактеризуйте їхні основні параметри і характеристики.

4. Як можна ввімкнути і вимкнути діодний і тріодний тиристори?

5. Як зміниться ВАХ тріодного тиристора при збільшенні струму керування?

6. Приведіть структуру, схему вмикання і ВАХ ОТ.

7. Як зміниться вид ВАХ ОТ при збільшенні напруги U_B ?

8. Де застосовуються тиристори і ОТ?

Список рекомендованої літератури

1. *Скаржепа В.А., Луценко А.И.* Электроника и микросхемотехника. Учебник: В 2 ч. / Под общ. ред. А. А. Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989. Ч. 1. - 432 с.

2. *Жеребцов И.П.* Основы электроники.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. —352с.

3. *Руденко В.С., Сенако В.И., Трифонюк В.В.* Основы промышленной электроники. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. - 400 с.

4 *Крупякова М.Г., Чарыков Я.Л., Юдин В.В.* Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. - М: Радио и связь, 1983. - 352 с.

5. *Иванов В.И., Аксенов А.И., Юшин А.М.* Справочник по полупроводниковым оптоэлектронным приборам / Под ред. Н.Н.Горюнова. —М.: Энергоатомиздат, 1984. —184с.

6. *Скаржепа В.А., Новацкий А.А., Сенько В.И.* Электроника и микросхемотехника. Лабораторный практикум. / Под общ. ред. А.А.Краснопрошиной. - К.: Вища шк., 1989 - 279 с.

7 *Полупроводниковые приборы: Транзисторы:* Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. - 2-е изд., перераб и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1985. - 904 с.

8 *Справочник по элементам радиоэлектронных устройств* / Под общ. ред. А.А. Куликовского. —М.: Энергия, 1977. — 576с.

Навчальне видання

Олег Костянтинович Колесницький
Геннадій Дмитрович Дорощенко
Станіслав Євгенійович Тужанський

Радіокомпоненти

Лабораторний практикум

Оригінал-макет підготовлено Г.Д.Дорощенковим

Редактор В.О.Дружиніна
Коректор З.В.Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7х421/4
Друк різнографічний
Тираж прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ