

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

Основи схемотехніки
Аналогова та інтегральна схемотехніка

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2013

УДК 621.382(075)

ББК 32.852я73

О-75

Автори:

В. М. Кичак, В. Д. Рудик, А. О. Семенов, О. О. Семенова

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Телекомунікації». Лист №1/11-6788 від 15.05.2012 р.

Рецензенти:

І. П. Лісовий, доктор технічних наук, професор

О. Б. Шарпан, доктор технічних наук, професор

Ю. К. Філіпський, доктор технічних наук, професор

Основи схемотехніки. Аналогова та інтегральна схемотехніка :
О-75 навчальний посібник / [В. М. Кичак, В. Д. Рудик, А. О. Семенов,
О. О. Семенова]. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 267 с.

ISBN 978-966-641-513-7

У навчальному посібнику наведено матеріал теоретичних розділів курсу “Основи схемотехніки”, який охоплює частини аналогової та інтегральної схемотехніки.

Навчальний посібник призначений для студентів бакалаврського напрямку 6.050903 – “Телекомунікації” усіх форм навчання і може бути корисним для студентів суміжних напрямів і спеціальностей.

УДК 621.382(075)

ББК 32.852я73

ISBN 978-966-641-513-7

© В. Кичак, В. Рудик, А. Семенов, О. Семенова, 2013

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
1 Пасивні компоненти.....	9
1.1 Резистори.....	9
1.2 Конденсатори.....	15
1.3 Індуктивні компоненти.....	20
1.4 Запитання та завдання для самоконтролю.....	24
2 Діоди і діодні схеми.....	25
2.1 Класифікація і маркування діодів.....	25
2.2 Параметри і характеристики діодів.....	27
2.3 Напівпровідникові стабілітрони.....	31
2.4 Варикапи.....	34
2.5 Випрямні діоди.....	35
2.6 Тунельні діоди.....	38
2.7 Високочастотні діоди.....	42
2.8 Обернені діоди.....	43
2.9 Імпульсні діоди.....	43
2.10 Запитання та завдання для самоконтролю.....	45
3 Біполярні та уніполярні транзистори.....	47
3.1 Структура транзисторів.....	47
3.2 Класифікація біполярних та уніполярних транзисторів.....	48
3.3 Принцип дії біполярного транзистора.....	51
3.4 Статичні параметри біполярних транзисторів.....	53
3.5 Режими роботи і статичні характеристики біполярних транзисторів.....	55
3.6 Параметри транзистора як чотирьополісника.....	57
3.7 Частотні властивості біполярного транзистора.....	59
3.8 Принципи підсилення в транзисторі при активному режимі роботи.....	61
3.9 Робота транзистора в імпульсному режимі.....	62
3.10 Будова та характеристики уніполярних транзисторів.....	66
3.11 МДН-транзистори.....	69
3.12 Параметри уніполярних транзисторів.....	71
3.13 Частотні властивості уніполярних транзисторів.....	72
3.14 Запитання та завдання для самоконтролю.....	74
4 Показники та характеристики аналогових електронних пристроїв....	75
4.1 Коефіцієнти підсилення.....	75

4.2 Амплітудно-частотна характеристика. Коефіцієнти частотних спотворень.....	76
4.3 Фазочастотна характеристика.....	78
4.4 Перехідні характеристики. Спотворення імпульсних сигналів....	79
4.5 Нелінійні спотворення. Коефіцієнт нелінійних спотворень.....	81
4.6 Амплітудна характеристика. Динамічний діапазон.....	83
4.7 Коефіцієнт корисної дії. Номінальна вихідна потужність.....	83
4.8 Внутрішні завади аналогових пристроїв.....	84
4.9 Запитання та завдання для самоконтролю.....	85
5 Зворотний зв'язок і його вплив на показники та характеристики аналогових пристроїв.....	86
5.1 Основні засоби забезпечення зворотного зв'язку.....	86
5.2 Вплив зворотних зв'язків на коефіцієнти підсилення струму та напруги.....	88
5.3 Вплив зворотних зв'язків на вхідний та вихідний опір.....	90
5.4 Вплив зворотного зв'язку на інші показники пристрою.....	91
5.5 Стійкість пристрою зі зворотним зв'язком.....	94
5.6 Запитання та завдання для самоконтролю.....	95
6 Забезпечення та стабілізація режиму в каскадах аналогових пристроїв.....	96
6.1 Кола живлення каскадів на уніполярних транзисторах.....	96
6.2 Кола живлення каскадів на біполярних транзисторах.....	99
6.3 Динамічні характеристики каскадів.....	107
6.4 Запитання та завдання для самоконтролю.....	112
7 Каскади попереднього підсилення.....	113
7.1 Аналіз властивостей каскаду зі спільним витоком в частотних областях.....	113
7.2 Аналіз резисторного підсилювального каскаду зі спільним емітером у різних частотних областях.....	120
7.3 Перехідні характеристики резисторного підсилювального каскаду.....	123
7.4 Повторювачі напруги.....	125
7.5 Повторювачі струму.....	129
7.6 Каскади з динамічним навантаженням.....	130
7.7 Диференціальні каскади.....	132
7.8 Каскади на складених транзисторах.....	135
7.9 Запитання та завдання для самоконтролю.....	137
8 Корекція частотних та перехідних характеристик.....	138
8.1 Необхідність корекції та її принципи.....	138

8.2	Методи визначення параметрів, що забезпечують рівномірність АЧХ та лінійність ФЧХ у найбільшій області частот.....	138
8.3	Каскади з індуктивною ВЧ корекцією.....	149
8.4	Каскади з ВЧ корекцією на основі частотно залежного зворотного зв'язку.....	155
8.5	Каскади з НЧ корекцією	157
8.6	Запитання та завдання для самоконтролю.....	160
9	Вибірні каскади.....	161
9.1	Класифікація, параметри та характеристики вибірних каскадів... ..	161
9.2	Резонансні діапазонні каскади з автотрансформаторним, трансформаторним і комбінованим зв'язками.....	163
9.3	Аналіз каскаду резонансного підсилювача із одиночним контуром.....	167
9.4	Смугові каскади.....	173
9.5	Аналіз каскаду підсилювача з двоконтурним смуговим фільтром.....	179
9.6	Аналіз каскаду вибірного підсилювача з ФЗС на LC-контурах... ..	183
9.7	Перехідний процес у каскадах вибірних підсилювачів.....	186
9.8	Запитання та завдання для самоконтролю.....	188
10	Каскади кінцевого підсилення.....	190
10.1	Вимоги до каскадів кінцевого підсилення.....	190
10.2	Основні режими роботи підсилювальних каскадів.....	191
10.3	Однотактні каскади кінцевого підсилення.....	194
10.4	Двотактні каскади кінцевого підсилення.....	196
10.5	Визначення нелінійних спотворень.....	199
10.6	Вибір транзисторів для каскаду кінцевого підсилення.....	201
10.7	Кінцеві каскади підсилення потужності, що працюють у режимі з ШІМ.....	204
10.8	Запитання та завдання для самоконтролю.....	206
11	Операційні підсилювачі.....	208
11.1	Основні показники операційних підсилювачів та вимоги до них.....	208
11.2	Типові структури та каскади операційних підсилювачів.....	211
11.3	Застосування зворотного зв'язку у операційних підсилювачах для утворення пристроїв аналогової обробки сигналів.....	214
11.4	АЧХ та ФЧХ операційного підсилювача.....	216
11.5	Забезпечення стійкості операційних підсилювачів, що охоплені зворотним зв'язком.....	218
11.6	Запитання та завдання для самоконтролю.....	219

12 Каскади на операційних підсилювачах, що здійснюють операції над сигналом.....	221
12.1 Інвертувальні каскади	221
12.2 Неінвертувальні каскади.....	224
12.3 Диференційні каскади	226
12.4 Інтегрувальні і диференціювальні каскади.....	229
12.5 Логарифмічні та антилогарифмічні каскади.....	231
12.6 Аналогові помножувачі та подільники.....	233
12.7 Перетворювачі опору. Конверсія та інверсія імпедансу.....	234
12.8 Розрахунок каскадів на ОП.....	237
12.7 Запитання та завдання для самоконтролю.....	240
13 Активні фільтри.....	242
13.1 Загальні відомості про фільтри.....	242
13.2 Фільтри Баттерворта і Чебишева.....	244
13.3 Фільтри Бесселя.....	247
13.4 Порівняння фільтрів різних типів.....	249
13.5 Схеми каскадів активних фільтрів на ОП.....	249
13.6 Проектування фільтрів на джерелах напруги, керованих напругою.....	251
13.7 Фільтри, що будуються на основі методу змінного стану.....	253
13.8 Схемні рішення активних фільтрів.....	256
13.9 Запитання та завдання для самоконтролю.....	261
Література.....	262
Глосарій.....	264

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЕ	активний елемент
АФ	активний фільтр
АЧХ	амплітудо-частотна характеристика
БТ	біполярний транзистор
ВАХ	вольт-амперна характеристика
ВЗЗ	від'ємний зворотний зв'язок
ВЧ	високі частоти
ДНКН	джерела напруги керовані напругою
ДСКН	джерела струму керовані напругою
ІМС	інтегральна мікросхема
КК	коливальний контур
ККД	коефіцієнт корисної дії
ККП	каскад кінцевого підсилення
КПП	каскад попереднього підсилення
МДН	метал-діелектрик-напівпровідник
МОН	метал-окисл-напівпровідник
НЧ	низькі частоти
ОКК	одиначний коливальний контур
ОП	операційний підсилювач
ПЕ	підсилювальний елемент
ПЕФ	п'єзоелектричний фільтр
ПТ	польовий транзистор
РП	резонансний підсилювач
СБ	спільна база
СЕ	спільний емітер
СК	спільний колектор
СП	смуговий підсилювач
СФ	смуговий фільтр
СЧ	середні частоти
ТКЄ	температурний коефіцієнт ємності
ТКІ	температурний коефіцієнт індуктивності
ТКН	температурний коефіцієнт напруги
ТКО	температурний коефіцієнт опору
ФВЧ	фільтр високих частот
ФЗС	фільтр зосередженої селекції
ФНЧ	фільтр низьких частот
ФСЧ	фільтр середніх частот
ФЧХ	фазочастотна характеристика
ШМ	широко-імпульсна модуляція

ВСТУП

Запропонований навчальний посібник відповідає розділам «Аналогова схемотехніка» та «Інтегральна схемотехніка» програми дисципліни «Основи схемотехніки» підготовки бакалаврів за напрямом 6.050903 – Телекомунікації. Основу посібника становить теоретичний матеріал лекційних курсів схемотехнічних дисциплін для напрямів радіотехніка та телекомунікації, які читаються авторами протягом останніх 20 років у Вінницькому національному технічному університеті [1-7].

Навчальний посібник складається з 13 розділів, в яких послідовно розглядаються частини дисципліни «Основи схемотехніки» відповідно до ГСВОУ ОПП 6.050903-2009. Зокрема теоретичний матеріал напрямів частини «Аналогова схемотехніка» (ППП.03.10) відображений у таких розділах посібника: Пасивні компоненти (КЗП.03.13) – розділ 1; Діодні схеми (КЗП.03.14) – розділ 2; Схеми на біполярних транзисторах (КЗП.03.15) – розділи 3, 7, 8, 9 і 10. Теоретичний матеріал напрямів частини «Інтегральна схемотехніка» (ППП.03.13) відображений у таких розділах посібника: Зворотний зв'язок (КСП.04.09) – розділ 5; Режими роботи підсилювачів (КСП.04.09) – розділ 6; Регулювання та живлення ОП (КСП.04.10) – розділ 11; Схеми на ОП (КСП.04.10) – розділи 12 і 13. Для покращення сприйняття матеріалу та систематизації термінології авторами посібника введено розділ 4 «Показники та характеристики аналогових електронних пристроїв».

Розглянуто схемотехніку каскадів підсилення різного призначення (попередні підсилювачі, підсилювачі потужності, підсилювачі постійного струму, вибірні підсилювальні каскади, корекція перехідних і частотних характеристик, спеціалізовані підсилювачі), виконаних на основі біполярних і польових транзисторів та інтегральних операційних підсилювачів. У процесі оволодіння матеріалом посібника студенти повинні засвоїти основні положення теорії та отримати необхідний обсяг практичних навичок розробки та аналізу аналогових електронних пристроїв на дискретних та інтегральних активних приладах.

Навчальний посібник може бути корисним для студентів радіотехнічних і приладобудівних спеціальностей, а також для інженерів і радіоаматорів, які займаються розробкою, експлуатацією та технічним обслуговуванням аналогових електронних пристроїв.

Автори вдячні рецензентам доктору технічних наук, професору І. П. Лісовому, доктору технічних наук, професору О. Б. Шарпану, доктору технічних наук, професору Ю. К. Філіпському, корисні зауваження яких сприяли поліпшенню змісту книги.

1 ПАСИВНІ КОМПОНЕНТИ

1.1 Резистори

Класифікація й основні параметри резисторів

Згідно з найбільш поширеною класифікацією розрізняють такі типи *резисторів* (resistors).

1. Постійні резистори з фіксованим значенням опору, залежно від призначення бувають: загального застосування, точні, прецизійні, високочастотні, високоомні.

2. *Змінні резистори* (variable resistors) зі змінним значенням опору, залежно від призначення поділяються на підстроювальні та регулювальні. Підстроювальні резистори використовують для точної установки опору в електричному колі, регулювальні використовують у процесі керування РЕА.

3. Спеціальні або *нелінійні резистори* (nonlinear resistors) – особлива група постійних резисторів, опір яких залежить від дії зовнішніх факторів, а саме: величини змінного струму або напруги (варистори), температури (терморезистори), світла (фоторезистори).

За принципом створення резистивного елемента резистори поділяють на дротяні й недротяні. У дротяних резистивним елементом є дріт зі сплаву з високим питомим опором. Дротяні резистори використовуються в РЕА тільки в особливих випадках. Основне застосування мають недротяні резистори: плівкові та об'ємні, у яких резистивні властивості створюються за допомогою плівок або об'ємних композицій з високим питомим опором. Плівкові й об'ємні резистори характеризуються меншою власною ємністю й індуктивністю, що дозволяє використовувати їх у широкому діапазоні робочих частот і виготовляти з більшим числом номіналів.

На рис. 1.1 подано позначення на електричних принципових схемах постійних резисторів (а, б) і підстроювального (в), а на рис. 1.2 подано позначення змінних резисторів.

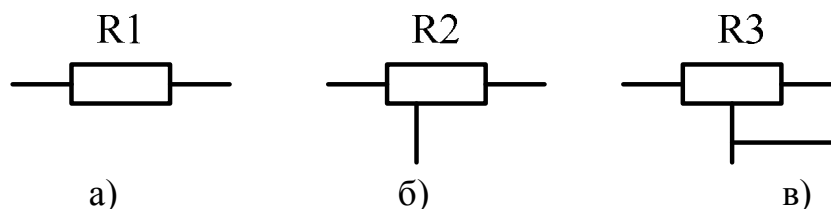


Рисунок 1.1 – Позначення на електричних схемах резисторів:
а) постійного, б) з відведенням, в) підстроювального

Номінальний опір резистора – це нормоване значення опору. Резистори виготовляються на різні номінали, стандартизовані відповідно до рекомендацій МЕК (Міжнародна електротехнічна комісія). Згідно з ДСТУ 2382-94

встановлено шість рядів номіналів опорів: E6, E12, E24, E48, E96, E192. Цифра вказує кількість номінальних значень у даному ряді. Змінні опори мають ряди номіналів: E6, E12, E24.

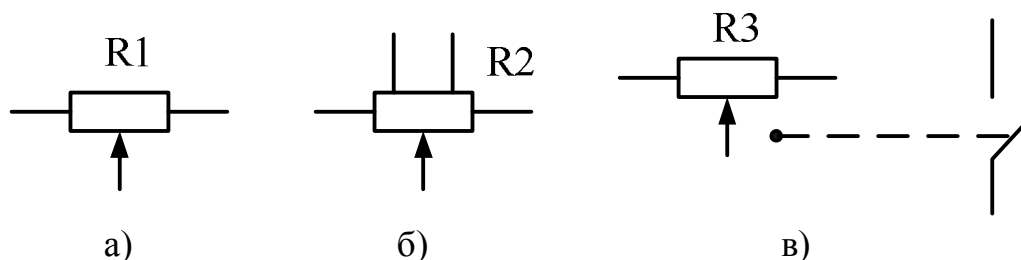


Рисунок 1.2 – Позначення на електричних схемах змінних резисторів: а) звичайний, б) з відведеннями, в) із замикальним контактом

Значення опорів можуть відрізнятися від номінальних в межах певних допусків. Ряд відхилень, що допускаються, є також нормалізованим. Допуск дають відповідно до ряду $\pm 0,01$; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10; 20; 30%.

Номінальна *потужність* (power) розсіювання ($P_{ном}$) вказує на допустиме електричне навантаження протягом тривалого часу при заданій стабільності опору. Потужність розсіювання визначається розмірами резистора, конструкцією та властивостями резистивного елемента. Часто користуються характеристикою питомої потужності розсіювання

$$P_{пит} = P_{ном} / S_R, \quad (1.1)$$

де S_R – поверхня охолодження резистора.

Максимальна напруга (постійного струму), що тривалий час може бути прикладена до резистора,

$$U_{max} = \sqrt{P_{ном} \cdot R_{ном}}. \quad (1.2)$$

Пробивна *напруга* (voltage) характеризує *електричну міцність* (electrical strength) резистора. Звичайно пробій відбувається по поверхні між виводами і між витками при довжині резистора менше 5 см $U_{пр}$ визначається з формули

$$U_{пр} = 4 \cdot 10^4 \sqrt{\rho \cdot l}, \quad (1.3)$$

де ρ – тиск навколишнього середовища, Па;

l – довжина резистора, см.

Температурний коефіцієнт (temperature coefficient) опору характеризує відносну зміну опору резистора під дією температури і позначається як ТКО або α_T :

$$\alpha_T = \frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{R_0}, \quad (1.4)$$

де R_0 – опір резистора при номінальній температурі.
Значення опору резистора може бути обчислено за формулою

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T \cdot \Delta T), \quad (1.5)$$

де ΔT – зміна температури відносно номінальної.

Власні шуми резисторів характеризують тепловий і струмовий шуми.

Тепловий шум – випадково змінюється електрична напруга на кінцях провідника внаслідок неупорядкованого теплового руху *електронів* (electrons).

Струмовий шум виникає при протіканні струму по провіднику та обумовлюється дискретною структурою струмопровідного елемента. При проходженні електричного струму відбувається місцеве нагрівання, що супроводжується порушенням контактів між одними частинами й утворенням контактів у результаті спікання між іншими. Через це флюктують значення опору та струму і на резисторі з'являється шумова складова напруги.

Вологостійкість резисторів визначається відносною зміною опору, що виникає після перебування резистора в камері вологості при $T = 40$ °С і відносній вологості 95...98 % протягом заданого часу. Захисні покриття (лаки, емалі, пластмаси) повністю не вберігають резистор від впливу вологи. Вони затримують проникнення вологи на час, приблизно пропорційний квадрату товщини матеріалу покриття. Повний захист може бути досягнутий тільки за допомогою вакуумно-щільної герметизації.

Коефіцієнт старіння характеризує стабільність резисторів у часі

$$\beta_R = \frac{dR}{dt} \cdot R_0. \quad (1.6)$$

Частотні властивості резисторів визначаються номінальним опором і розподіленими індуктивністю і ємністю. Опір резистора на змінному струмі залежить як від його номінального значення, так і від його ємності та індуктивності, що, в свою чергу, визначаються конструкцією резистора.

Маркування резисторів

На кожному недротяному резисторі вказуються номінальний опір, допустимі відхилення опору від номінального та тип резистора. Якщо рівень шумів резистора менше 1 мкВ/В, на ньому ставиться буква А.

Для резисторів прийнята спеціальна система скорочених позначень. Резистори постійного опору позначаються літерою С, змінного – СП, цифровий індекс указує на матеріал резистивного елемента (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Позначення матеріалу резисторів

Постійні	Змінні	Тип резистора
C1	СП1	Вуглеродисті
C2	СП2	Металоплівкові, металоокисні
C3	СП3	Плівкові композиційні
C4	СП4	Об'ємні композиційні
C5	СП5	Дротові

Після дефіса зазначається номер розробки резистора.

Кодоване позначення номінального опору резисторів складається із цифр, що позначають номінальний опір, і літери, що позначає одиницю вимірювання опору.

Спеціальні резистори

Спеціальні або нелінійні резистори – це елементи із заздалегідь передбаченими та спрямованими змінами опору при наявності тих або інших впливів.

Варистори (varistors) – це елементи, опір яких значно змінюється при зміні прикладеної напруги. Їх основним призначенням є стабілізація та обмеження напруги.

Терморезистори (thermistors) – це термочутливі резистори, опір яких значно змінюється зі зміною температури.

За призначенням терморезистори поділяються на такі групи:

- для вимірювання і регулювання температури;
- для термокомпенсації елементів електричного кола в широкому інтервалі температур;
- для систем теплового контролю;
- для вимірювання потужності НВЧ коливань;

За знаком ТКО терморезистори поділяються на термістори та позистори.

Термістори (thermistors) характеризуються від'ємним ТКО (опір падає з ростом температури).

Позистори – це терморезистори з великим додатним ТКО.

Фоторезистори (photoresistors) – це дискретні світлочутливі резистори, принцип дії яких оснований на зміні провідності напівпровідникового матеріалу під дією випромінювання оптичного діапазону. Світлочутливий елемент фоторезистора виготовляється у вигляді прямокутної або круглої таблетки, спресованої з напівпровідникового матеріалу або тонкої плівки на скляній підкладці. Темновий опір R_T – опір фоторезистора при відсутності падаючого на нього випромінювання (при прикладеній робочій напрузі U_p і темновому струмі I_T $R_T = U_p / I_T$).

Світловий струм I_{CB} – струм, що протікає через фоторезистор при дії потоку випромінювання заданих інтенсивності та спектрального розподі-

лу. Тоді опір освітленого фоторезистора $R_{CB} = U_p/I_{CB}$. Кратність зміни опору $K_j = R_{CB}/R_T$.

Резистивний оптрон (resistive optron) – це комбінація світлодіода та фоторезистора в одному елементі. Дозволяє здійснювати передачу сигналів при відсутності електричного з'єднання в колі. Використовується для гальванічної розв'язки в сигнальних колах.

Тензорезистори (tensoresistors) – це елементи, електричний опір яких залежить від величини механічних деформацій. Розрізняють:

- дровові тензорезистори, як чутливий елемент мають ґратки з тонкого дроту діаметром 2...30 мкм;

- фольгові тензорезистори, мають ґратки з фольги товщиною 4..10 мкм;

- напівпровідникові тензорезистори, як чутливий елемент мають напівпровідник товщиною 20...50 мкм.

Тензочутливість резистора визначається виразом

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

де l , R , ΔR і Δl – довжина й опір тензочутливого елемента та їх прирости, відповідно.

Застосування резисторів у схемотехніці

Резистори у схемотехніці виконують одну з основних функцій – забезпечення зміщення робочої точки транзисторних каскадів за допомогою подільника напруги (рис. 1.3, а) або подільника струму (рис. 1.3, б), операцію додавання струмів або напруг (рис. 1.3, в), узгодження активних вхідних або вихідних опорів каскадів, а також спільно з реактивними елементами L або C утворюють ланки фільтрування або блокування, а також ланки корекції частотних і перехідних характеристик каскадів.

Для подільника напруги на рис. 1.3, а

$$U_{вих} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ex}. \quad (1.8)$$

Для подільника струму на рис. 1.3, б

$$I_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1$$

або

$$I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1. \quad (1.9)$$

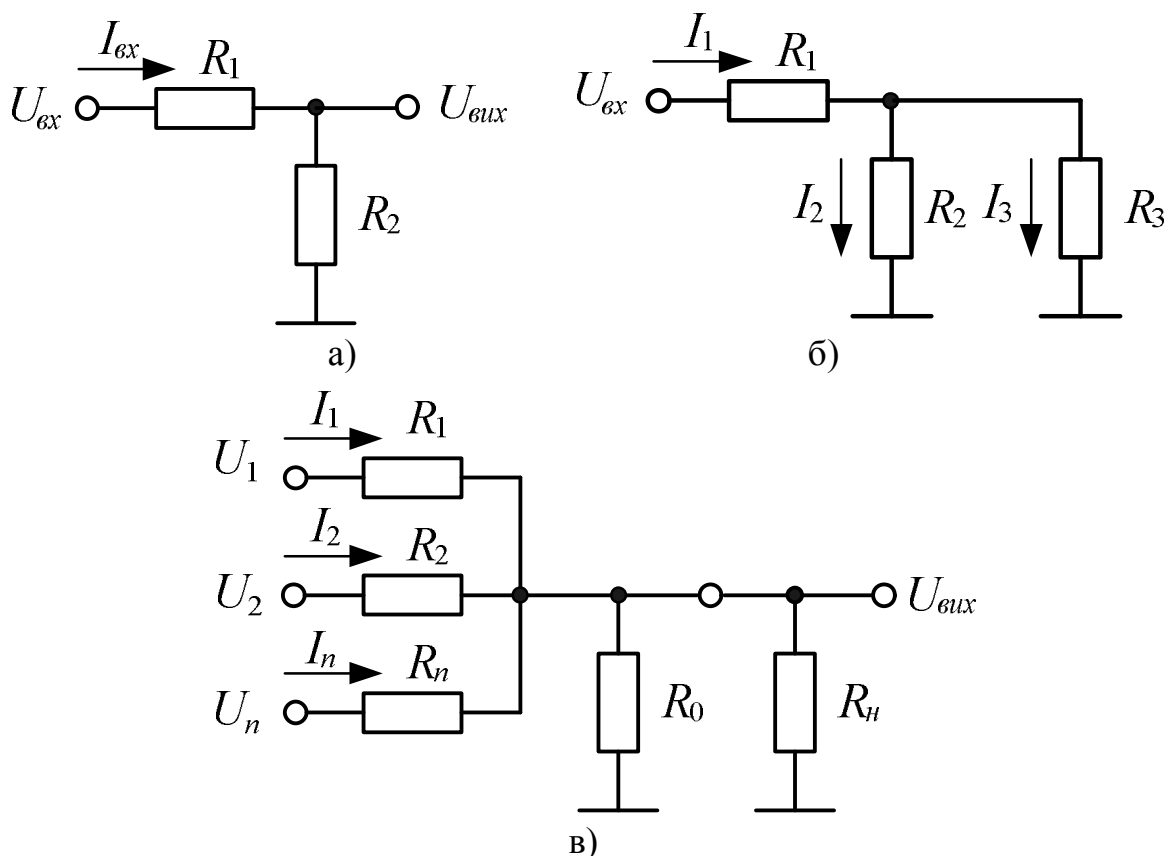


Рисунок 1.3 – Схемні рішення резисторних ланок подільника напруги (а) подільника струму (б) суматора струмів/напруг (в)

Для схеми на рис. 1.3, в матимемо

$$\frac{U_1 - U_{вих}}{R_1} + \frac{U_2 - U_{вих}}{R_2} + \dots + \frac{U_n - U_{вих}}{R_n} = \frac{U_{вих}}{R_0} + \frac{U_{вих}}{R_n}, \quad (1.10)$$

звідки отримаємо

$$U_{вих} = \frac{\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_n}}. \quad (1.11)$$

Найбільш часто в практичній схемотехніці застосовують *подільники напруги* (voltage dividers) та *регулятори напруги* (voltage regulators), еквівалентна схема яких подана на рис. 1.3, а. Основним параметром подільника напруги є коефіцієнт передачі по напрузі

$$K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}.$$

З урахуванням рівняння (1.8) в режимі холостого ходу рівняння *коефіцієнта передачі* (transmission gain) має вигляд

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Подільник напруги працюватиме на якесь *навантаження* (load) R_n , яке підмикається до нижнього плеча R_2 , що приводить до зменшення вихідної напруги $U_{\text{вих}}$. Тоді коефіцієнт передачі навантаженого подільника напруги становить

$$K_n = \frac{R_2 \parallel R_n}{R_1 + R_2 \parallel R_n},$$

де $R_n = \frac{R_2 \cdot R_n}{R_2 + R_n}$ – опір нижнього плеча навантаженого подільника напруги.

1.2 Конденсатори

Електричний *конденсатор* (capacitor) – це елемент, що являє собою системою з двох провідників (обкладинок), розділених діелектриком, і має властивість накопичувати електричну енергію (ємність). Ємність конденсатора C визначається відношенням накопиченого у ньому електричного заряду q до прикладеної напруги U : $C = q/U$. Одиниця вимірювання ємності: $[C] = \Phi$ (фарада).

Ємність (capacity) конденсатора залежить від матеріалу діелектрика, форми і взаємного розташування обкладинок.

Ємність плоского конденсатора, що складається з n обкладинок,

$$C = \frac{8,8 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon \cdot S(n-1)}{d}, \quad (1.12)$$

де d – товщина діелектрика;

S – площа обкладинок;

ε – діелектрична проникність діелектрика.

Для циліндричного конденсатора ємність можна знайти за формулою

$$C = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon \cdot l}{\frac{D_1}{D_2}}, \quad (1.13)$$

де D_1 і D_2 – діаметри зовнішньої та внутрішньої циліндричних обкладинок; розмірності величин – $[C] = \text{пФ}$; $[l, d] = \text{мм}$; $[S] = \text{мм}^2$.

Загальна класифікація конденсаторів

За характером зміни ємності конденсатори поділяють на декілька груп (рис. 1.4, 1.5).

Конденсатори постійної ємності – це конденсатори з фіксованою ємністю, що у процесі експлуатації не регулюється. Застосовуються у колах блокування, розв'язки по живленню, як перехідні, розділові, елементи фільтрів і коливальних контурів.

Конденсатори змінної ємності (КЗЄ) використовують для плавного настроювання коливальних контурів.

Підстроювальні конденсатори застосовують у колах, ємність яких повинна точно встановлюватися при разовому або періодичному регулюванні і не змінюватися в процесі експлуатації.

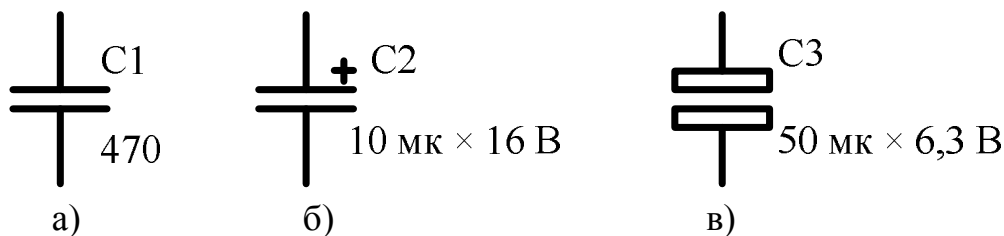


Рисунок 1.4 – Позначення на електричних схемах конденсаторів постійної ємності: а) звичайного, б) оксидного полярного, в) оксидного неполярного

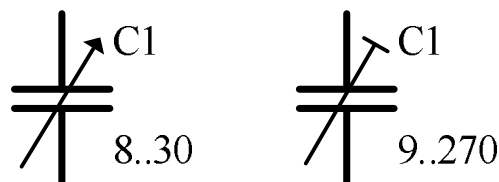


Рисунок 1.5 – Позначення на електричних схемах конденсаторів: а) змінної ємності, б) налаштовувального

Нелінійні конденсатори, ємність яких визначається прикладеною напругою (вариконди) або температурою (термоконденсатори).

За іншу класифікаційну ознаку було вибрано вид діелектрика. Залежно від виду діелектрика конденсатори можна розділити на елементи з органічним, неорганічним, газоподібним та оксидним діелектриком.

На принципових схемах конденсатори позначають латинською літерою С з порядковим цифровим або буквеним індексом.

Основні параметри конденсаторів

Питома ємність конденсатора – відношення ємності до об'єму або маси конденсатора. Цей параметр використовується при масогабаритній оптимізації конструкції.

Номинальна ємність конденсатора – ємність, яку повинен мати конденсатор відповідно до нормативної документації.

Номинальна робоча напруга (*номинальна напруга* - rated voltage) – максимальна напруга, при якій конденсатор може працювати у заданих умовах експлуатації протягом гарантованого строку служби. Як правило, вона вказується на конденсаторі.

Досліджувальна напруга – максимальна напруга, при якій конденсатор може перебувати без пробою протягом невеликого проміжку часу (від одиниць секунд до одиниць хвилин).

Пробивна напруга – мінімальна напруга, при якій відбувається електричний пробій конденсатора при швидкому дослідженні. Зазвичай перевищує номінальну в 1,5-3 рази.

Опір ізоляції – опір конденсатора постійному струму

$$R_{iz} = \frac{U}{I_{ym}}, \quad (1.14)$$

де I_{ym} – струм (current) витікання (leakage) або провідності (conduction). Найбільший опір ізоляції (десятки тисяч мегаом) мають плівкові конденсатори, найменший – електролітичні оксидні.

Постійна часу конденсатора – добуток опору ізоляції і ємності конденсатора $\tau_c = R_{iz} \cdot C$. Постійна часу τ_c є основною характеристикою якості конденсатора на постійному струмі. Розмірність $[\tau_c] = c$ (секунди). Для різних типів конденсаторів τ_c може становити від декількох хвилин до декількох діб і характеризує час, протягом якого напруга на конденсаторі зменшується в e разів (або до 37% від початкового значення).

Реактивна потужність (reactive power) конденсатора характеризує “навантажувальну” здатність конденсатора на змінному струмі.

Тангенс кута втрат ($tg\delta$) характеризує втрати (loss) енергії в конденсаторі при протіканні змінного струму. Втрати відбуваються в обкладинках і діелектрику, але основні втрати приходяться на діелектрик.

Величину, зворотну $tg\delta$, називають добротністю конденсатора

$$Q_c = \frac{1}{tg\delta}. \quad (1.15)$$

Сучасні конденсатори (крім електролітичних) мають дуже малі втрати $tg\delta \leq 0,01...0,001$.

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) характеризує зворотні зміни ємності конденсатора зі зміною температури. ТКЄ або α_c являє собою відносну зміну ємності при зміні температури на один градус

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{\Delta T \cdot C_0}, \quad (1.16)$$

де C_0 – ємність конденсатора при номінальній температурі.

Необоротні зміни ємності конденсатора під дією температури характеризуються коефіцієнтом температурної нестабільності ємності (КТНС)

$$\beta_c = \frac{\Delta C}{C}. \quad (1.17)$$

З підвищенням температури зменшуються також електрична міцність конденсатора і строк його служби. При зниженні атмосферного тиску відбуваються зменшення електричної міцності, зміна ємності внаслідок механічної деформації, порушення герметизації. При поглинанні вологи діелектриком збільшується ємність і зменшується опір ізоляції.

Маркування конденсаторів

Повне маркування конденсаторів містить: позначення типу конденсатора, номінальну ємність і напругу, допустиме відхилення ємності від номінальної (у процентах), групу ТКЄ, місяць і рік випуску. Маркування може бути літерно-цифровим або колірним.

Конденсатори постійної ємності маркуються буквою К. Цифровий код позначення типів конденсаторів (залежно від діелектрика) наведений у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Цифровий код позначення конденсаторів

Група конденсаторів	Код
1	2
Керамічні	
$U_n \leq 1600$ В	10
$U_n > 1600$ В	15
Скляні	21
Склокерамічні	22
Тонкоплівкові	26
Слюдяні малої потужності	31
Слюдяні великої потужності	32
Паперові ($U_n \leq 2$ кВ)	40
Паперові фольгові	41
Паперові металізовані	42
Оксидно-електричні, алюмінієві	50
Оксидно-електролітичні	51
Об'ємно-пористі	52

Продовження таблиці 1.2

1	2
Оксидно-напівпровідникові	53
Оксидні неполярні	58
Повітряні	60
Вакуумні	61
Полістирольні	71
Фторопластові	72
Поліетилентерефталатні	73
Комбіновані	75
Лакоплівкові	76
Полікарбонатні	77
Поліпропіленові	78

Конденсатори змінної ємності

Конденсатори змінної ємності (КЗЄ) – елементи радіоапаратури, призначені для зміни параметрів резонансних контурів.

Конструкція будь-якого конденсатора змінної ємності містить: систему нерухомих пластин (плоскі або циліндричні) – статор; систему рухомих пластин – ротор; корпус або підставку для складання всіх елементів конденсатора; напрямних обертального або поступального руху ротора; струмомірач. Як правило, статор ізолюють від корпусу, іноді ізолюють і ротор.

Єдиної класифікації КЗЄ немає. Можна лише вказати основні класифікаційні ознаки.

1. Призначення: вхідні та підсилювальні каскади приймачів, гетеродини приймачів, генератори передавачів, антенно-фідерні пристрої, вимірвальна апаратура і т. п.

2. Застосовуваний діелектрик – твердий, рідкий, газоподібний, вакуумний.

3. Закон зміни ємності: прямоємнісний, прямочастотний, прямохвильовий, логарифмічний, косинусоїдальний, за заданою функцією.

4. Величина ємності і діапазон частот. Розрізняють КЗЄ для діапазонів довгих, середніх, коротких, ультракоротких і дециметрових хвиль.

5. Форма електродів: пластинчаста, циліндрична, спіральна.

6. Вид переміщення електродів: поступальний, обертальний.

7. Спосіб зміни ємності: зміна площі перекриття пластин, зміна зазорів між пластинами, зміна діелектричної проникності діелектрика.

8. Кут повороту (для КЗЄ з обертальним переміщенням електродів): нормальний (приблизно 180°), розширений (більше 180°), рівний 90°.

9. Тип струмомірача: третьюий, гнучкий, ємнісний.

Нелінійні конденсатори

Варикондами (varicond) називаються конденсатори з діелектриком зі

спеціального сегнетокерамічного матеріалу, що має властивість різко змінювати діелектричну проникність при зміні напруженості електричного поля. Ємність таких конденсаторів під впливом прикладеної до них змінної напруги може змінюватися в 4-6 разів.

Номінальні значення ємності варикондів визначаються при напрузі 5 В і частоті 50 Гц і для різних типів перебувають в інтервалі 100 пФ...0,1 мкФ. При збільшенні напруги ємність варикондів зростає, досягає максимального значення й потім знижується.

Ця властивість дозволяє застосовувати вариконди як підсилювачі змінного і постійного струмів, помножувачі частоти, стабілізатори напруги, генератори напруги, генератори імпульсів й інші пристрої.

Опір ізоляції постійному струму – не менше 10^4 МОм.

Термоконденсатори призначені для роботи як вбудовані елементи у колах термостабілізації і термокомпенсації електронної апаратури.

1.3 Індуктивні компоненти

Індуктивні компоненти (inductive components) – це елементи, опір яких змінному струму має індуктивний характер (рис.1.6, 1.7). До індуктивних компонентів відносять: високочастотні котушки індуктивності, дроселі, трансформатори, магнітні головки для запису і зчитування аудіо, відео або цифрової інформації.

Високочастотні котушки індуктивності та дроселі

Залежно від призначення розрізняють:

– контурні *катушки* (coils), які утворюють разом з конденсаторами *коливальний контур* (oscillatory circuit);

– катушки зв'язку, які передають високочастотні коливання з одного кола до іншого;

– високочастотні *дроселі* (chokes), які перекривають шлях струмам високої частоти.

За конструктивними ознаками катушки можуть бути розділені на групи:

- за формою – циліндричні, спіральні, тороїдальні;
- за кількістю шарів намотки – одношарові або багатшарові;
- за наявністю осердя – із осердям або без осердя;
- за наявністю екрана – екрановані або неекрановані;
- за сталістю індуктивності – з постійною або змінною індуктивністю.

На принципових електричних схемах поруч з умовним графічним зображенням катушки індуктивності розміщують її символічне літерне позначення (латинська велика буква L) с порядковим цифровим (іноді літерним) індексом. Значення індуктивності на схемі звичайно не вказують.

Дроселі мають таке ж графічне зображення, але позначаються літерами Др.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рудик В. Д. Конспект лекцій до курсу "Аналогові електронні пристрої" / Рудик В. Д. – Вінниця : ВП, 1991. – 93 с.
2. Рудик В. Д. Методичні вказівки до лабораторного практикуму з курсу "Аналогові електронні пристрої" / В. Д. Рудик, С. П. Кононов. – Вінниця : ВП, 1991 – 46 с.
3. Рудик В. Д. Методичні вказівки та контрольні завдання з курсу "Аналогові електронні пристрої" / В. Д. Рудик, С. П. Кононов. – Вінниця : ВДТУ, 1994. – 34 с.
4. Рудик В. Д. Аналогові електронні та підсилювальні пристрої : лабораторний практикум / В. Д. Рудик, М. А. Шутило. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 62 с.
5. Рудик В. Д. Основи схемотехніки. Підсилювальні та аналогові пристрої : лабораторний практикум / В. Д. Рудик, М. А. Шутило. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 142 с.
6. Божко А. П. Основи теорії кіл. Лабораторний практикум / Божко А. П., Семенов А. О., Семенова О. О. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 105 с.
7. Кичак В. М. Основи радіоелектроніки : навчальний посібник МОНУ / Кичак В. М., Крушевський Ю. В., Гаврілов Д. В. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 368 с.
8. Олейников В. П. Элементная база электронных аппаратов (пассивные элементы) : учебное пособие / В. П. Олейников, Н. В. Долженков. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – 62 с.
9. Чижма С. Н. Основы схемотехники : учебное пособие для вузов / Чижма С. Н. – Омск : Издательство «Апельсин», 2008. – 424 с.
10. Гершунский Б. С. Основы электроники и микроэлектроники : Учеб. пособие / Гершунский Б. С. – К. : Вища шк., 1989. – 424 с.
11. Жеребцов И. П. Основы электроники / Жеребцов И. П. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
12. Лачин В. И. Электроника / В. И. Лачин, Н. С. Савёлов. – Ростов н/Д : изд-во «Феникс», 2002. – 576 с.
13. Скаржепа В. А. Электроника и микросхемотехника / В. А. Скаржепа, А. Н. Луценко. – К. : Выща школа, 1989. – 431 с.
14. Прянишников В. А. Электроника: Курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : КОРОНА принт, 1998. – 400 с.
15. Джонс М. Х. Электроника – практический курс / Джонс М. Х. – М. : Постмаркет, 1999. – 528 с.
16. Кучумов А. И. Электроника и схемотехника / Кучумов А. И. – М. : Гелиос АРВ, 2002. – 304 с.
17. Остапенко Г. С. Усилительные устройства : учеб. пособие для вузов / Остапенко Г. С. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
18. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп / Мамонкин И. Г. – М. : Связь, 1987. – 359 с.

19. Войшвилло Г. В. Усилительные устройства : учеб. пособие / Войшвилло Г. В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1983. – 264 с.
20. Цыкин Г. С. Усилительные устройства : учеб. пособие / Цыкин Г. С. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1984. – 368 с.
21. Цыкина А. В. Электронные усилители / Цыкина А. В. – М. : Радио и связь, 1982. – 236 с.
22. Малахов В. П. Схемотехника аналоговых устройств : учебник / Малахов В. П. – Одесса : Астро-Прикт, 2000. – 211 с.
23. Зорі А. А. Аналогова схемотехніка електронних систем / А. А. Зорі, В. І. Бойко. – Донецьк : ДонНТУ, 2003 – 324 с.
24. Бойко В.І. Схемотехніка електронних систем / Бойко В. І., Гужий А. М., Жуков В. Я. – К. : Вища школа, 2004 – 366 с.
25. Травин Г. А. Основы схемотехники устройств радиосвязи, радиовещания и телевидения / Травин Г. А. – М. : Высшая школа, 2007 – 606 с.
26. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники : 3-е изд., перераб. и доп. / Манаев Е. И. – М. : Радио и связь, 1990. – 512 с.
27. Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1982. – 512 с.
28. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 2003. – 704 с.
29. Проектирование радиоприёмных устройств / Под ред. А. П. Сиверса. – М. : Сов. Радио, 1976. – 486 с.
30. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы / Шило В. Л. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Сов. радио, 1979. – 366 с.
31. Алексенко А. Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем / [Алексенко А. Г., Коломбет Е. А., Стародуб Г. И. и др.]. – М. : Радио и связь, 1985. – 256 с.
32. Бойко В. И. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства / [Бойко В. И., Гуржий А. Н., Жуйков В. Я. и др.]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.
33. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Волович Г. И. – М. : Издательский дом «Додэка-XX1», 2005. – 528 с.
34. Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника / Опадчий Ю. Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И. – М. : Горячая линия, 2005. – 768 с.
35. Павлов В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 320 с.

Навчальне видання

Василь Мартинович Кичак
Вадим Данилович Рудик
Андрій Олександрович Семенов
Олена Олександрівна Семенова

Основи схемотехніки
Аналогова та інтегральна схемотехніка

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук
Оригінал-макет підготовлено А. Семеновим

Підписано до друку 25.02.2013 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 17,3.
Наклад 300 (1-й запуск – 100) прим. Зам. № 2013-024.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.