

**Кафедра організації та технічного забезпечення
аварійно-рятувальних робіт
Національного університету цивільного захисту України**

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ

Конспект лекцій

Укладач: Л.В.Борисова

Харків 2017

ЛЕКЦІЯ 1. ЕЛЕКТРОНІКА. СИГНАЛИ

План

Вступ

1. Загальні відомості про електроніку.
2. Класифікація електронних пристроїв.
3. Поняття сигналу. Класифікація сигналів.

Висновки

Література

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
3. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
4. Общая электротехника / Под ред. А. Т. Блажкина. – 4-0 изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.

Вступ

Народження електротехніки відносять до першої половини ХІХ сторіччя, коли були відкриті основні закономірності електричних явищ. У другій половині сторіччя були розроблені сучасні типи основних електричних машин – генератори, трансформатори та двигуни. Це був також період будівництва перших електричних станцій. Початок ХХ сторіччя знаменує значний зріст централізованого виробництва електричної енергії, перехід до широкого використання електродвигунів в промисловості та зародження електроніки. Наступні десятиріччя характеризуються небаченим розвитком електрифікації. За чверть сторіччя (1929 – 1954 р.р.) виробництво електроенергії в усьому світі збільшилось у п'ять разів.

Електротехніка, як наука теоретична і прикладна спочатку розвивалась на основі постійного струму, оскільки першими джерелами електричного струму були гальванічні елементи. В цей період (1800 – 1850 р.р.) були відкриті основні закономірності електричних явищ: закони електричного кола (Ом і Кирхгоф), тепла дія електричного струму і його практичне використання (Ленц, Джоуль, Петров), закони електромагнітної індукції і електромагнітних сил (Фарадей, Максвел, Ленц, Ампер, Якобі), електрохімічна дія струму і т. ін.

У подальшому все більше виявлявся основний недолік системи постійного струму – трудність економної передачі електричної енергії на значні відстані. Можливість передачі електричної енергії на великі відстані,

простота машин та інші переваги забезпечили системі змінного струму широкий розвиток.¹

В електричних колах як постійного, так і змінного струму при будь-яких можливих режимах одночасно проходить неперервний процес утворення електричної енергії і перетворення її в інші види енергії.

1.1. Загальні відомості про електроніку

Електроніка – це галузь науки і техніки, що займається вивченням фізичних основ функціонування, дослідженням, розробкою і застосуванням приладів, робота яких заснована на протіканні електричного струму у твердому тілі, вакуумі і газі. Такими приладами є напівпровідникові (протікання струму у твердому тілі), електронні (протікання струму у вакуумі) і іонні (протікання струму в газі) прилади. Головне місце серед них у даний час займають напівпровідникові прилади. Загальною властивістю всіх названих приладів є те, що вони є істотно нелінійними елементами, нелінійність їхніх вольт-амперних характеристик, як правило, є ознакою, що визначає найважливіші їхні властивості.

Промислова електроніка – це частина електроніки, що займається застосуванням напівпровідникових, електронних і іонних приладів у промисловості. Незважаючи на розходження областей застосування і різноманіття режимів роботи промислових електронних пристроїв, вони будуються на основі спільних принципів і складаються з обмеженого числа функціональних вузлів. Загальні принципи побудови цих функціональних вузлів – електронних схем – розглядає промислова електроніка.

Промислова електроніка поділяється на дві великі області:

1. *Інформаційна електроніка* – займається пристроями для передачі, обробки і відображення інформації. Підсилювачі сигналів, генератори напруг різної форми, логічні схеми, лічильники, індикаторні пристрої і дисплеї обчислювальних машин – все це пристрої інформаційної електроніки. Характерними рисами сучасної інформаційної електроніки є складність і різноманіття розв'язуваних задач, висока швидкодія і надійність. Інформаційна електроніка в даний час нерозривно зв'язана з застосуванням інтегральних мікросхем, розвиток і удосконалювання яких у головній мері визначає рівень розвитку цієї галузі електронної техніки.

2. *Енергетична електроніка (перетворююча техніка)* – займається перетворенням одного виду електричної енергії в іншій. Майже половина електроенергії, виробленої у світі, споживається у виді постійного струму чи струму нестандартної частоти. Велика частина перетворень електричної енергії в даний час виконується напівпровідниковими перетворювачами. Основними видами перетворювачів є випрямлячі (перетворення змінного

¹ Однак і тепер, коли змінний струм займає центральне місце в електроенергетиці, багато користувачів користуються електроенергією постійного струму, який є для них або єдиним можливим за технологічних умов родом струму, або родом струму, що забезпечує ряд техніко-економічних переваг.

струму в постійний), інвертори (перетворення постійного струму в змінний), перетворювачі частоти, регульовані перетворювачі постійної і змінної напруг.

Вся електроніка поділяється на аналогову, імпульсну і цифрову.

Аналогова охоплює ті електронні пристрої, що призначені для обробки інформації безупинної функції, що змінюється за певним законом.

Цифрова – охоплює електронні пристрої, які використовуються для перетворення й обробки інформації з закону дискретної функції.

Імпульсна – перетворює аналоговий сигнал у дискретний шляхом квантування.

1.2. Класифікація електронних пристроїв

Задачею *електроніки як галузі техніки* (технічної електроніки) є розробка, виробництво і експлуатація електронних приладів і пристроїв самого різного призначення. За допомогою цих приладів можна порівняно просто і в багатьох випадках з високим коефіцієнт корисної дії перетворювати електричну енергію за формою, величиною і частотою струму або напруги. Такий процес перетворення енергії здійснюється в багатьох схемах електронної апаратури (спрямовувачах, підсилювачах, генераторах).

За допомогою електронних приладів вдається перетворювати неелектричну енергію в електричну і навпаки (наприклад, в фотоелементах, терморезисторах). Різноманітні електронні датчики і вимірювальні прилади дозволяють з високою точністю вимірювати, реєструвати і регулювати зміни всіляких неелектричних величин – температури, тиску, пружних деформацій, прозорості і т.д.

Процеси перетворення енергії в приладах електроніки відбуваються з великою швидкістю. Це зумовлене малою інерційністю, характерною для більшості електронних приладів, що дозволяє застосовувати їх в широкому діапазоні частот – від нуля до десятків і сотень ГГц (гігагерц). При цьому досягається така висока чутливість, яка не може бути отримана в приладах іншого типу.

Сучасний етап розвитку електронної техніки характеризується значним ускладненням електронної апаратури. Звичайні (дискретні) компоненти електронних схем вже не можуть в повній мірі задовольнити вимоги щодо різкого зменшення габаритних розмірів і підвищення надійності електронних пристроїв.

Усе більш широкий розвиток отримує *мікроелектроніка* – галузь електроніки, що займається мікромініатюризацією електронної апаратури з метою зменшення її об'єму, маси, вартості, підвищення надійності і економічності на основі комплексу конструктивних, технологічних і схемних методів.

1.3. Поняття сигналу. Класифікація сигналів

Поділ сигналів на класи здійснюється за різними класифікаційними ознаками. Для технічних засобів системної інженерії важливими є наступні ознаки.

За природою носія розрізняють *механічні, електромагнітні, акустичні, теплові, оптичні та інші* сигнали.

Носій – це фізичний процес, що має властивість переміщуватися у просторі і параметри якого можуть змінюватися під дією повідомлення.

Розрізняють три види носіїв у незбуреному стані: *постійний рівень, гармонічне коливання та послідовність імпульсів*.

Сигнал – це носій із нанесеним на нього повідомленням або фізичний процес, параметри якого містять інформацію.

За кількістю параметрів розрізняють *одномірні $n = 1$ і багатомірні $n > 1$* сигнали.

Приклади одномірного сигналу: напруга постійного струму на двох затискачах давача температури, сигнал на виході давача вологості системи мікроклімату.

Багатомірні сигнали утворюються в процесі модуляції таких носіїв, як гармонічні коливання чи імпульсна послідовність, що самі по собі мають кілька параметрів (амплітуда, частота, фаза, а для імпульсної послідовності ще і тривалість імпульсів).²

У багатомірних сигналів деякі параметри можуть бути *інформативними* (значення параметрів відповідає повідомленню), інші *неінформативними* (значення частоти змінної напруги на виході електромагнітного давача механічного переміщення).

За структурою (характером зміни значень аргументу часу і параметрів сигналу) розрізняють *неперервні та дискретні*, зокрема *цифрові* сигнали.

Сигнали як функція часу змінюють свої значення в часі, причому подібні зміни можуть відбуватися як плавно, так і дискретно. У зв'язку з цим розрізняють чотири види сигналів:

- *неперервні або аналогові;*
- *дискретні в часі;*
- *квантовані за рівнем;*
- *одночасно дискретні в часі і квантовані за рівнем.*

Неперервні сигнали описують неперервними функціями часу $x(t)$, що можуть набувати безліч миттєвих значень із деякого діапазону $x_{\min} \dots x_{\max}$. Недоліком аналогових сигналів є вразливість, оскільки небажана зміна параметрів сигналу під впливом завад чи спотворень спричиняє похибку відтвореного на прийомі повідомлення. Тому з метою підвищення достовірності передавання повідомлень переходять до дискретизованих сигналів.

² Прикладами багатомірного сигналу можуть бути напруга в мережі змінного струму при контролі її якості (амплітуда і частота – параметри, які можуть коливатися в певних межах), мовний сигнал у системах стільникового зв'язку, сигнали у багатоканальних системах.

Дискретні сигнали – це сигнали, які набувають зліченої кількості значень або станів. Дискретні сигнали можуть безпосередньо утворюватися на виході первинного перетворювача – *природні* дискретні сигнали або утворюватися в результаті дискретизації аналогових сигналів – *штучні* дискретні сигнали.

Дискретні сигнали $x_o(nT)$ виникають унаслідок дискретизації (взяття вибірок) через дискретні інтервали часу $t = nT$ значень аналогового сигналу $x(t)$, тобто рівень кожної вибірки може мати безліч значень із діапазону $x_{\min} \dots x_{\max}$ (рис.1, б).

Зазвичай крок дискретизації $\Delta t = t_n - t_{n-1} = T$ вибирають сталим, але не завжди.

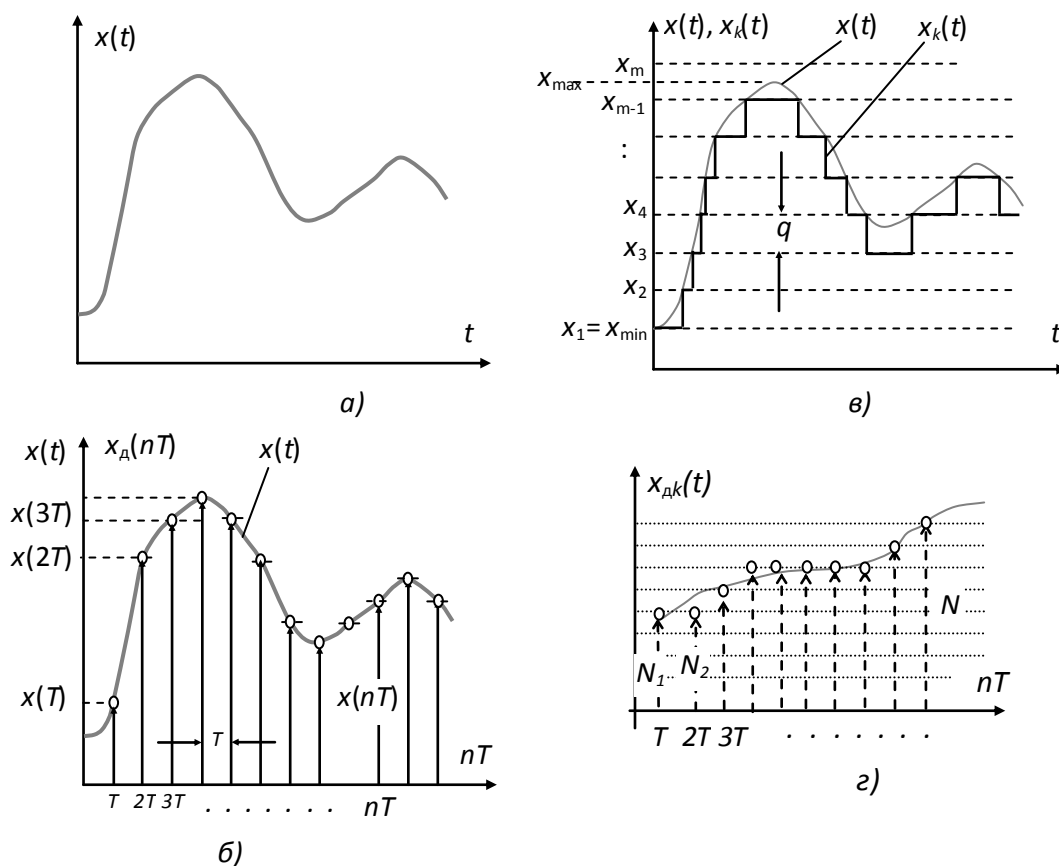


Рис. 1 – Форми сигналів: а) неперервний; б) дискретний у часі; в) квантований за рівнем; г) дискретний і квантований

За характером зміни в часі сигнали бувають *детерміновані і випадкові*. Реальні сигнали в системах автоматизації є *випадковими* з двох причин:
 – під час передавання сигнал спотворюється та піддається впливу завад, які мають випадковий характер;
 – щоб сигнал містив інформацію, його інформативний параметр принципово має бути невизначеним, оскільки повністю детермінований сигнал інформації вже не містить і його немає сенсу передавати.

Детерміновані сигнали використовуються в системах автоматизації як:

- як службові (синхроімпульси, сигнал «старт-стоп»);
- контрольні (випробувальні);
- як носії в незбуреному стані, тобто до модуляції.

Детерміновані сигнали залежно від методів аналізу можна поділити на:

- неперіодичні сигнали;
- періодичні сигнали;
- квазіперіодичні сигнали;
- модульовані (радіо-) сигнали.

Випадкові сигнали зазвичай поділяють на *стаціонарні* і *нестационарні*.

У класі стаціонарних сигналів виділяють так звані *ергодичні сигнали*. Властивості випадкових сигналів можуть бути описані за допомогою математичного апарату теорії ймовірностей.

За складністю моделі розрізняють *прості (елементарні)* і *складні сигнали*.

Математичною моделлю елементарного сигналу є проста функція часу.

Елементарні сигнали є математичною абстракцією і використовуються для аналізу складних реальних сигналів і систем. Наведемо приклади елементарних сигналів, що набули широкого застосування на практиці:

а) гармонічне коливання: $s(t) = A_m \sin((\omega_0 t + \varphi_0))$;

б) функція одиничного скачка, імпульс включення (функція Хевісайда)

$$x(t - t_0) = \begin{cases} 1, & t_0 \geq 0 \\ 1/2, & t_0 = 0 \\ 0, & t_0 < 0 \end{cases}$$

в) дельта-імпульс (імпульс Дірака)

$$-\delta(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t \neq t_0 \\ \infty, & t = t_0 \end{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt$$

Зв'язок дельта-імпульсу та одиничного стрибка:

$$\delta(t) = \frac{d}{dt} x(t) \text{ і } x(t) = \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau$$

Складні сигнали описуються такими функціями часу, які неможливо подати у вигляді простої математичної формули. Більшість реальних сигналів – складні, наприклад, телефонний. Для опису складних сигналів використовують, наприклад, апарат ортогональних функцій.

ЛЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

План

Вступ

1. Електричний струм.
2. Структура електричних кіл. Лінійні та нелінійні електричні кола.
3. Схеми заміщення реальних електротехнічних пристроїв.
4. Джерело ЕРС, і джерело струму.
5. Розгалужені і нерозгалужені електричні кола.

Література

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
3. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
4. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
5. Общая электротехника / Под ред. А. Т. Блажкина. – 4-0 изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
6. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

Вступ

Електроніка – область науки і техніки, яка вивчає:

1. фізичні явища у вакуумі, газі і твердому тілі;
2. електричні характеристики і параметри електронних приладів;
3. властивості приладів і пристроїв, які використовуються в електронних приладах.

2.1. Електричний струм

Атом будь-якої речовини – це система матеріальних часток з електричними зарядами, центральна частина якої – ядро – виявляє властивості позитивного заряду, врівноваженого негативними зарядами оточуючих його електронів. Під впливом різних чинників можливо відщеплення одного або декількох електронів, найбільш віддалених від ядра, або збільшення їх в атомі за рахунок вільних електронів, що викликає порушення електричної рівноваги, та супроводжується набуттям атомом відповідного електричного заряду, в наслідок чого він становиться позитивним або негативним іоном.

Речовини з атомами, що легко іонізуються, в яких носії електричних зарядів безладно переміщуються по всьому об'єму, характеризуються

основною електричною властивістю – електропровідністю та є провідниками (срібло, мідь, алюміній, сталь та ін.). Речовини, що практично не мають цю властивість, є діелектриками (наприклад, гума, пластмаса, смола, фарфор). Ті речовини, основною якістю яких є велика залежність їх електропровідності від складу домішок та впливу таких зовнішніх чинників, як температура, електричне поле, освітленість, називають напівпровідниками (кремній, германій, селен та ін.).

Безладний рух носіїв електричних зарядів у металевих провідниках – електронів, в електролітах – позитивних та негативних іонів, а у плазмі – електронів, позитивних та негативних іонів можна упорядкувати, якщо ці провідні тіла приєднати до джерела електричної енергії, що збудить в них електричне поле.

Під дією електричного поля носії позитивних зарядів зміщуються у напрямку поля, а носії негативних зарядів – у протилежному напрямку з невеликою швидкістю порядку декількох доль міліметра або декількох міліметрів на секунду.

Електричний струм (синонім – сила струму) – це явище руху вільних носіїв електричних зарядів в речовині або вакуумі, що має напрямок. Напрямок струму приймають співпадаючим з напрямком руху носіїв позитивних зарядів або відповідно протилежним напрямку руху носіїв негативних зарядів.

Швидкість переносу електричного заряду dq через поперечний переріз провідника за час dt визначається *миттєвим струмом*

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Величина i скалярна, тому що в різних елементах поверхні S напрямок руху заряджених часток може бути різним. Якщо ж розглядати малий елемент поверхні ΔS , то можна вважати напрямок руху заряджених часток у всіх його точках однаковим.

Розрізняють постійний і змінний струм.

Постійним струмом називають *струм, незмінний у часі. Постійний струм являє собою спрямований упорядкований рух часток, що несуть на собі електричні заряди.*

У Міжнародній системі одиниць (СІ) одиницею струму служить ампер (А), а заряду – кулон (Кл), причому один кулон відповідає заряду 6.25×10^{18} електронів.

Середовище, в якому переміщуються носії електричних зарядів, здійснює їм деяку протидію, що характеризується її *електричним опором*. Одиницею електричного опору є ом (Ом).

Електричний опір R однорідних проводів з площею поперечного перерізу S по всій довжині l знаходять по формулі

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де ρ – удільний опір матеріалу проводу, який в одиницях СІ прийнято виражати у мікроом-метрах [$\mu\text{Ом} \times \text{м}$].

Величину, яка зворотна електричному опору, називають *електричною провідністю*

$$G = \frac{1}{R}$$

Одиницею електричної провідності є сименс (См).

Зміна температури середовища впливає на електричний опір, який у проміжку від нуля до 100 °С обчислюють так:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2^0 - t_1^0)]$$

де R_1 та R_2 – опори відповідно при температурах t_1^0 і t_2^0 ; α – температурний коефіцієнт опору.

При визначенні електричного опору деяких середовищ враховують ще вплив зовнішнього тиску (порошкоподібні провідники), магнітного поля (вісмут), освітленості (селен) та інших чинників.

Температура проводу, нагрітого електричним струмом, що встановилася, залежить від щільності струму J [$\text{А}/\text{мм}^2$]. Великі щільності струму відповідають проводам меншого перерізу, що знаходяться у кращих умовах охолодження, ніж дріт більшого перерізу.

2.2. Структура електричних кіл. Лінійні та нелінійні електричні кола

Електричним колом називають сукупність пристроїв та об'єктів, що утворюють шлях електричному струму, електромагнітні процеси в яких можна описати за допомогою понять про електрорушійну силу, струм та напругу.

Електричні кола складаються з пристроїв для генерування електричної енергії, передачі її на відстань та перетворювання в інші види енергії. Перші називають *джерелами електричної енергії*, другі – *лініями електричного зв'язку*, а треті – *приймачами електричної енергії*.

Джерела електричної енергії являють собою такі джерела, що перетворюють хімічну, теплову або механічну енергію в електричну. До них відносяться гальванічні та акумуляторні елементи, електромеханічні генератори, термопари, сонячні фотоелементи, магнітогідродинамічні генератори, паливні елементи та інші перетворювачі. *Джерело електричної енергії характеризується величиною і напрямком електрорушійної сили (ЕРС) і величиною внутрішнього опору.*

Умовимося позначати постійний струм буквою I . ЕРС джерела – буквою E . Опір – буквою R . У міжнародній системі одиниць (у системі СІ) струм вимірюється в амперах (А), ЕРС – у вольтах (В) і опір – в омах (Ом).

Зображення електричного кола на рисунку за допомогою умовних знаків прийнято називати електричною схемою (рис.2), в якій генеруючі та перетворюючі засоби, а також з'єднуючі їх лінії електричного зв'язку представлені умовними графічними позначеннями.

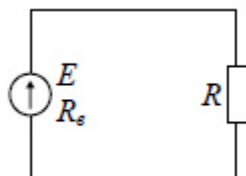


Рис. 2 – Найпростіша електрична схема

Умовним знаком опору на електричній схемі є витягнутий прямокутник. Умовним знаком джерела електричної енергії є кружок із зображеною усередині нього стрілкою. Стрілка вказує позитивний напрямок ЕРС.

За позитивний напрямок ЕРС джерела енергії приймається напрямок зростання потенціалу усередині цього джерела.

Приймач енергії і привода, що з'єднують приймач із джерелом енергії, називають «зовнішньою» частиною електричного кола або зовнішнім колом. В зовнішньому колі струм тече від плюса джерела енергії до мінуса, а усередині джерела – від мінуса до плюса.

Залежність струму, що протікає по опору від напруги на цьому опорі $I = f(U)$ називають вольт-амперною характеристикою.

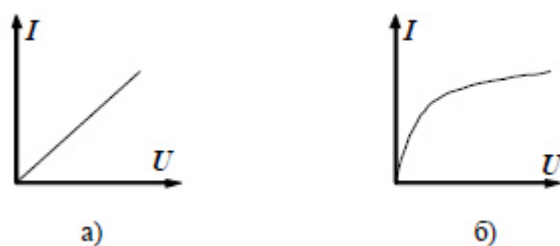


Рис. 3 – Вольт-амперні характеристики: лінійна (а) та нелінійна (б).

Вольт-амперні характеристики зображують графічно. У цьому випадку по осі абсцис на графіку в деякому масштабі відкладається напруга, а по осі ординат – струм.

Розрізняють два принципово відмінних типи вольт-амперних характеристик. У першій з них вольт-амперна характеристика являє собою пряму лінію (рис. 3,а), у другому – деяку криву лінію (рис. 3,б).

Опори, вольт-амперні характеристики яких є прямими лініями, називаються лінійними опорами, а електричні кола які містять тільки лінійні опори, прийнято називати лінійними електричними колами.

Опори, вольт-амперні характеристики яких не є прямими лініями (тобто нелінійні), називаються нелінійними опорами, і відповідно, електричні кола, з нелінійними опорами, називають нелінійними електричними колами.

2.3. Схеми заміщення реальних електротехнічних пристроїв

В елементах реальних електротехнічних пристроїв (електричних колах) відбуваються досить складні процеси протікання струмів провідності, струмів зсуву, виділення теплової енергії, наведення *ЕРС*, накопичення і перерозподіли енергії електричних і магнітних полів і т.п. Для того щоб можна було математично описати ці процеси, у теорії кіл користуються розрахунковими схемами (схемами заміщення), уводячи в них резистивні, індуктивні та ємнісні елементи. За допомогою резистивного елемента враховують виділення теплоти в реальному елементі; за допомогою індуктивного елемента – наведення *ЕРС* і накопичення енергії в магнітному полі; за допомогою ємнісного елемента – протікання струмів зсуву і накопичення енергії в електричному полі.

Кожен елемент реального електричного кола на схемі заміщення можна представити тією чи іншою сукупністю ідеалізованих схемних елементів.

Так, резистор для низьких частот можна представити одним резистивним елементом R (рис. 4,а). Для високих частот той самий резистор повинний бути представлений уже іншою схемою (рис. 4,б). У ній мала (паразитна) індуктивність L_n враховує магнітний потік, зчеплений з резистором, а мала паразитна ємність C_{Π} враховує протікання струму зсуву між затискачами резистора.

Конденсатор на низьких частотах заміщають одним ємнісним елементом (рис. 4,в), а на високих частотах конденсатор представляють схемою (рис. 4,г). У цій схемі резистор R_n враховує втрати в неідеальному діелектрику конденсатора, а L_n – паразитна індуктивність контактів.

Індуктивну котушку в першому наближенні можна представити одним індуктивним елементом L (рис. 3,д). Більш повно вона може бути представлена схемою (рис. 4,е). У ній R враховує теплові втрати в опорі обмотки у сердечнику, на якому вона намотана, а паразитна ємність C_{Π} враховує струми зсуву між витками котушки.

Узагальнено можна сказати, що при складанні схеми заміщення реальних елементів кіл та електричних кіл у цілому, у неї входять ті ідеалізовані схемні елементи, за допомогою яких описуються основні процеси в реальних елементах кола, а процесами, що є відносно другорядними в цих елементах, для розглянутої смуги частот і амплітуд впливів, звичайно зневажають. Реальне електричне коло, представлене у виді сукупності ідеалізованих схемних елементів, надалі будемо називати *схемою заміщення електричного кола*.

Якщо можна вважати, що *напруга і струм на всіх елементах реального кола не залежать від просторових координат, то таке коло називають електричним колом із зосередженими параметрами, якщо залежать – колом з розподіленими параметрами*. Процеси в колі із зосередженими параметрами описують алгебраїчними чи звичайними диференціальними рівняннями; процеси в колі з розподіленими параметрами описують рівняннями в частинних похідних. Відповідність розрахункової моделі реального електричного кола перевіряють шляхом зіставлення розрахунку з експериментом. Якщо розрахункові дані недостатньо сходяться з експериментом, модель уточнюють.

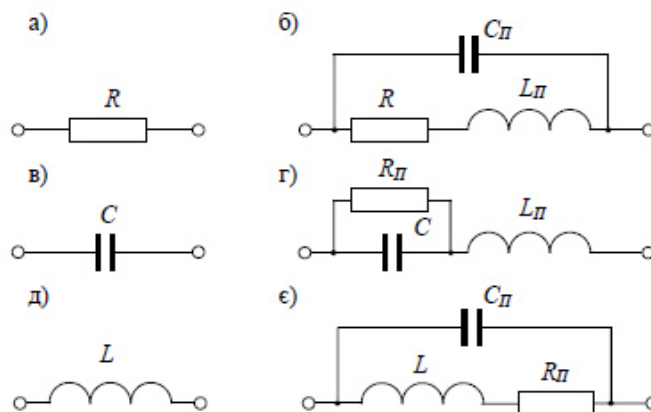


Рис. 4 – Приклади схем заміщення резистора (а та б), ємності (в та г), індуктивності (д та є)

2.4. Джерело ЕРС, і джерело струму

При розрахунку та аналізі електричних кіл джерело електричної енергії замінюють розрахунковим еквівалентом. У якості останнього може бути прийнято:

1. Або джерело ЕРС і послідовно з ним ввімкнений опір R_v , що дорівнює внутрішньому опору реального джерела енергії (рис. 5,а).
2. Або джерело струму з паралельно ввімкненим з ним опором R_v , що дорівнює внутрішньому опору реального джерела енергії (рис. 5,б).

Під *джерелом ЕРС* – розуміють таке ідеалізоване джерело живлення, ЕРС якого постійна, не залежить від величини струму, що протікає через нього, і дорівнює ЕРС реального джерела енергії. Внутрішній опір цього ідеалізованого джерела живлення дорівнює нулю.

Джерело ЕРС на схемах зображують у вигляді кружка зі стрілкою і записаної рядом букви E . Стрілка вказує позитивний напрямок ЕРС (напрямок зростання потенціалу усередині джерела).

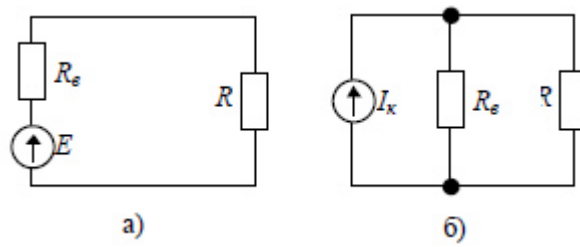


Рис. 5 – Джерело *EPC* (а) та джерело струму (б)

Під джерелом струму розуміють таке ідеалізоване джерело живлення, що дає струм I_k , який не залежить від величини навантаження R кола і дорівнює частці від ділення *EPC* реального джерела на внутрішній його опір R_e .

$$I_k = \frac{E}{R_e}$$

Для того щоб джерело струму могло давати струм I_k , який не залежить від величини опору навантаження, внутрішній опір його і його *EPC* теоретично повинні прагнути до нескінченності.

На схемі джерело струму зображують у вигляді кружка зі стрілкою, поруч з яким написана буква I . Стрілка показує позитивний напрямок струму.

Властивості джерела *EPC* та джерела струму можна досить наочно охарактеризувати графіками, зображеними на рис. 6, а і б. На цих графіках подані залежності струму I , що протікає через ідеалізоване джерело енергії у функції напруги U на його затискачах (на рис. 6, а, зображена залежність $I = f(U)$ для джерела *EPC* і на рис. 6, б, – для джерела струму).

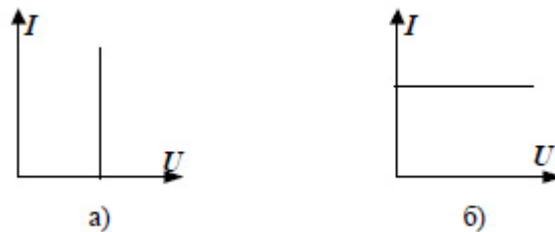


Рис. 6 – Вольт-амперні характеристики джерела *EPC* (а) і джерела струму (б)

2.5. Розгалужені і нерозгалужені електричні кола

Електричні кола підрозділяються на нерозгалужені та розгалужені. Схема рис. 7 є найпростішим, нерозгалуженим колом в якому у всіх її елементах тече той самий струм.

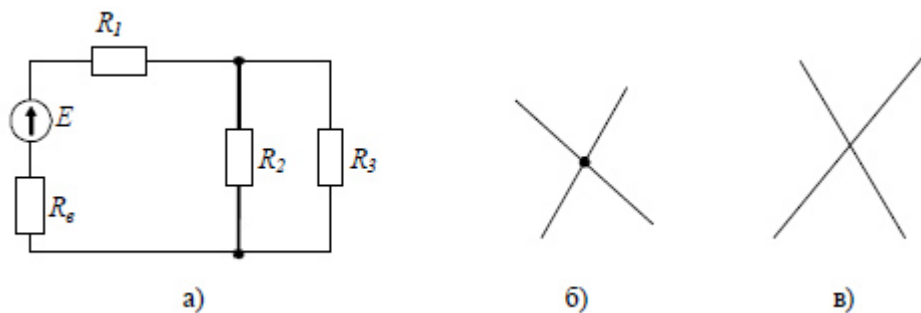


Рис. 7 – Розгалужене електричне коло (а), електричне з'єднання двох ліній (б) та перетинання двох ліній без електричного з'єднання (в)

Найпростіше розгалужене коло зображено на рис. 7, а. Воно має три вітки та два вузли. У кожній вітці тече свій струм. Вітка електричного кола – це ділянка електричного кола, яка утворена послідовно з'єднаними елементами та ув'язнена між двома вузлами. У свою чергу, вузол є точка кола, в якій сходиться не менш трьох віток. Якщо в місці перетинання двох ліній на електричній схемі поставлена «жирна» крапка (рис. 7,б), то в цій точці є електричне з'єднання двох ліній. У протилежному випадку (рис. 7,в) лінії перетинаються без електричного з'єднання.

ЛЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (2)

План

1. Напруга на ділянці кола.
2. Закон Ома для ділянки електричного кола, яка не містить ЕРС.
3. Закон Ома для ділянки електричного кола, що містить ЕРС.
4. Закони Кирхгофа.
5. Заземлення однієї точки схеми. Потенціальна діаграма.
6. Енергетичний баланс в електричних колах.

Література

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
3. Общая электротехника / Под ред. А. Т. Блажжина. – 4-0 изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

3.1. Напруга на ділянці кола

Під *напругою на деякій ділянці електричного кола* розуміють різницю потенціалів між крайніми точками цієї ділянки.

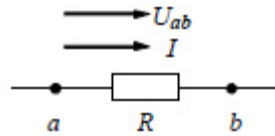


Рис. 8 – Ділянка електричного кола, яка не містить ЕРС

На рис. 8 зображена ділянка електричного кола на якій є опір R і немає ЕРС. Крайні точки цієї ділянки позначені a і b . Нехай струм I тече від точки a до точки b .

На ділянці кола без ЕРС струм тече від більш високого потенціалу до більш низького. Отже, потенціал точки a (φ_a) вище потенціалу точки b (φ_b) на величину, яка дорівнює добутку струму I на опір R :

$$\varphi_a = \varphi_b + IR$$

Відповідно до визначення напруга між точками a і b

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1.1)$$

Отже, $U_{ab} = IR$. Іншими словами, *напруга на опорі дорівнює добутку струму, що протікає по опорі, на величину цього опору.*

В електротехніці різницю потенціалів на кінцях опору прийнято називати «напругою на опорі» або «спаданням напруги».

Надалі різницю потенціалів на кінцях опору, тобто добуток IR , будемо іменувати *спаданням напруги*. Позитивний напрямок спадання напруги збігається з позитивним напрямком струму, що протікає по даному опорі.

Розглянемо питання про напругу на ділянці кола, що містить опір і ЕРС.

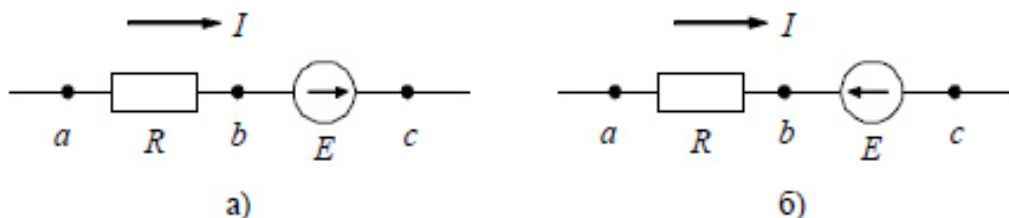


Рис. 9 – Ділянка електричне кола з джерелом ЕРС:
а – напрям струму співпадає з напрямом ЕРС; б – напрям струму протилежний напрямку ЕРС

На рис. 9 (а та б) показані ділянки кіл, по яких протікає струм I . Знайдемо різницю потенціалів (напругу) між точками а та с на цих ділянках.

По визначенню

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c \quad (1.2)$$

Виразимо потенціал точки а через потенціал точки с. При переміщенні від точки с до точки b (рис. 9,а) йдемо зустрічно ЕРС E , тому потенціал точки b виявляється нижче (менше) чим потенціал точки с на величину ЕРС, тобто

$$\varphi_b = \varphi_c - E$$

Для рис. 9,б при переміщенні від точки с до точки b йдемо згідно з ЕРС E і тому потенціал точки b виявляється більше (вище) чим потенціал точки с на величину ЕРС E , тобто

$$\varphi_b = \varphi_c + E$$

Раніше говорилося, що на ділянці кола без ЕРС струм тече від більш високого потенціалу до більш низького. Тому в обох схемах (рис. 9 а та б) потенціал точки а вище, ніж потенціал точки b на величину спадання напруги в опорі R .

$$\varphi_a = \varphi_b + IR$$

У такий спосіб для рис. 9,а маємо

$$\varphi_a = \varphi_c - E + IR, \text{ або}$$

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = R - E, \quad (1.3)$$

і для рис. 9,б

$$\varphi_a = \varphi_b + E + IR, \text{ або}$$

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = IR + E \quad (1.4)$$

Позитивний напрямок напруги вказують стрілкою. Стрілка повинна бути спрямована від першого індексу до другого. Так, позитивний напрямок U_{ac} зображується стрілкою, спрямованою від а до с.

Із самого визначення напруги випливає, що

$$U_{ca} = \varphi_c - \varphi_a$$

Тому $U_{ca} = - U_{ac}$.

Іншими словами, зміна чергування індексів рівносильна зміні знака цієї напруги. Тобто напруга може бути і позитивною, і негативною величиною.

3.2. Закон Ома для ділянки електричного кола, яка не містить ЕРС

Закон Ома (за прізвищем німецького фізика Генрі Ома (1787 – 1854 рр.) установлює зв'язок між струмом і напругою на деякій ділянці електричного кола. Так, стосовно до ділянки кола зображеного на рис. 7, запишемо

$$I = U_{ab}/R = (\varphi_a - \varphi_b)/R \quad (1.5)$$

3.3. Закон Ома для ділянки електричного кола, що містить ЕРС

Закон Ома для ділянки електричного кола, що містить ЕРС дозволяє знайти струм цієї ділянки по відомій різниці потенціалів $(\varphi_a - \varphi_b)$ на кінцях ділянки кола і діючої на цій ділянці ЕРС E .

Так, з рівняння (1.3) для схеми рис. 8,а маємо

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E}{R} = \frac{U_{ab} + E}{R}$$

Аналогічно з рівняння (1.4) для схеми рис. 8, б, випливає, що

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b - E}{R} = \frac{U_{ab} - E}{R}$$

У загальному випадку:

$$I = \frac{U_{ab} \pm E}{R} = \frac{(\varphi_a - \varphi_b) \pm E}{R} \quad (1.6)$$

Рівняння (1.6) представляє закон Ома для ділянки електричного кола, що містить ЕРС. Знак «+» ставиться перед E , якщо ЕРС спрямована відповідно до струму, а знак «-» ставиться перед ЕРС у випадку зустрічного напрямку. В окремому випадку, при $E = 0$, рівняння (1.6) перетвориться в рівняння (1.5).

3.4. Закони Кирхгофа

Усі електричні кола підкоряються першому та другому законам Кирхгофа (за прізвищем німецького фізика Густава Кирхгофа (1824 – 1887 рр.).

Перший закон Кирхгофа може бути сформульований подвійно.

Перше формулювання: *алгебраїчна сума струмів, що підтікають до будь-якого вузла схеми, дорівнює нулю.*

Друге формулювання: *сума струмів, що підтікають до будь-якого вузла, дорівнює сумі струмів, що витікають від нього.*

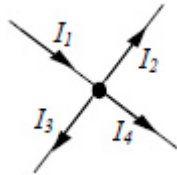


Рис. 10 – Схема, що пояснює перший закон Кирхгофа

Так, стосовно до рис. 10, якщо *струми, що підтікають до вузла вважати позитивними, а струми, що витікають – негативними, то відповідно до першого формулювання*

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

відповідно до другого формулювання

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

Фізично перший закон Кирхгофа означає, що *рух зарядів у колі, відбувається таким чином, що в жодному з вузлі кола не накопичуються заряди.*

Другий закон Кирхгофа. Він так само, як і перший може бути сформульований подвійно.

Перше формулювання: *алгебраїчна сума падінь напруг у будь-якому замкнутому контурі дорівнюють алгебраїчній сумі ЕРС, що діють уздовж того ж контуру.* Записується він у такий спосіб:

$$\sum IR = \sum E$$

У кожному із сум відповідні доданки входять зі знаком «плюс», якщо вони збігаються з напрямком обходу контуру, і зі знаком «мінус», якщо вони не збігаються з ним.

Друге формулювання: *алгебраїчна сума напруг (але не спадань напруг!) уздовж будь-якого замкнутого контуру дорівнює нулю.*

$$\sum U_k = 0$$

3.5. Заземлення однієї точки схеми

При заземленні однієї будь-якої точки схеми розподіл струму в схемі не міняється, тому що *ніяких нових віток, по яких могли б протікати струми, при цьому не утворюється.* Інакше буде, якщо заземлити дві або більшу кількість точок схеми, що мають різні потенціали. У цьому випадку через землю утворюються додаткові вітки, а сама схема стає відмінною від вихідної і розподіл струму в ній міняється.

3.6. Потенціальна діаграма

Електричний стан кожного елементу ділянки електричного кола наглядно представляють у вигляді потенціальної діаграми. На такій діаграмі вздовж осі абсцис відкладаються послідовно значення опорів, між кожною парою сусідніх точок схеми ділянки кола, що аналізується, по осі ординат – потенціали цих точок.

В якості прикладу розглянемо потенціальну діаграму нерозгалуженої ділянки схеми електричного кола по рис. 11, а, між точками a та e . Для побудови потенціальної діаграми необхідно вибрати початок відліку значень потенціалів. За початок відліку значень потенціалів вибирають нульовий рівень потенціалу, довільно прийнявши рівним нулю потенціал однієї (будь-якої) точки кола. Якщо одна з точок кола заземлена, то вважають рівним нулю потенціал цієї заземленої точки.

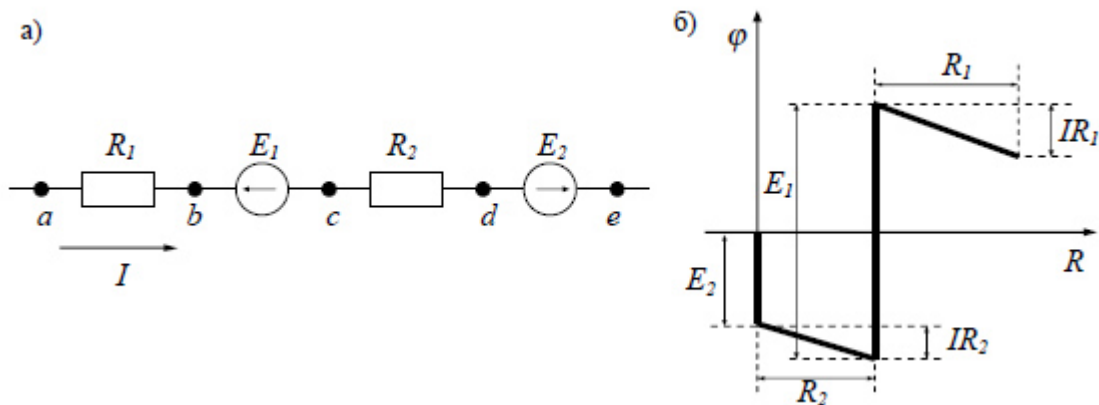


Рис. 11 – Ділянка електричного кола (а) та потенціальна діаграма для цієї ділянки

Прийmemo при побудові діаграми рівним нулю потенціал точки e (рис. 11, б). При переміщенні вздовж ділянки схеми електричного кола, що розглядується, від точки e до точки a будемо мати діаграму розподілу потенціалів. Якщо за початок відліку значень потенціалів вибрати нульовий потенціал будь-якої іншої точки електричного кола, то потенціальна діаграма тільки зміститься вздовж осі потенціалів так, щоб на осі абсцис знаходився потенціал обраної точки. Потенціальну діаграму можна побудувати не тільки для нерозгалуженої ділянки електричного кола, але для будь-якої ділянки електричного кола, якщо відомі значення струмів у резистивних елементах та, звісно, EPC та опори джерел.

3.7. Енергетичний баланс в електричних колах

При протіканні струмів по опорах у них виділяється тепло. На підставі закону збереження енергії кількість тепла, що виділяється в одиницю часу в опорах схеми повинне дорівнювати енергії, що доставляється за той саме час джерелом живлення.

Якщо через джерело EPC E тече струм I так, що напрямком струму збігається з напрямком EPC , то джерело EPC доставляє в коло, в одиницю часу, енергію (чи потужність), рівну EI (добуток EI входить з позитивним знаком у рівняння енергетичного балансу). Якщо ж струм I спрямований зустрічно EPC E , то джерело EPC не поставляє енергію, а споживає її (наприклад, заряджається акумулятор). Відповідно в цьому випадку добуток EI входить у рівняння енергетичного балансу з негативним знаком.

Рівняння енергетичного балансу при живленні тільки від джерел EPC записуються в такий спосіб:

$$\sum I^2 R = \sum EI \quad (1.7)$$

Якщо схема живиться не тільки від джерел EPC , але і від джерел струму, тобто до окремих вузлів схеми підтікають і витікають струми від джерел струму, то при складанні енергетичного балансу необхідно ще врахувати енергію, що доставляється джерелами струму. Припустимо, що до вузла a схеми підтікає струм I_k від джерела струму, а від вузла b цей струм витікає. Потужність, що доставляється джерелом струму дорівнює $U_{ab}I_k$. Напруга U_{ab} і струми в вітках схеми повинні бути розраховані з врахуванням струму, що підтікає від джерела струму. Це простіше зробити за *методом вузлових потенціалів*.

З врахуванням цього в загальному виді рівняння енергетичного балансу запишеться в такий спосіб:

$$\sum I^2 R = \sum EI = \sum U_{ab}I_k \quad (1.8)$$

ЛЕКЦІЯ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (3)

План

1. Активний і пасивний двополосники.
2. Передача енергії по лінії передачі.
3. Розрахунок простих кіл постійного струму.
4. Послідовне з'єднання приймачів.

Література

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
3. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.

4. Общая электротехника / Под ред. А. Т. Блажкина. – 4-0 изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.

5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

4.1. Активний і пасивний двополюсники

У будь-якій електричній схемі завжди можна умовно виділити якусь одну вітку, а всю іншу частину схеми, поза залежністю від її структури і складності, зобразити деяким прямокутником (рис. 12, а). Стосовно виділеної вітки вся схема, позначена прямокутником, являє собою так званий двополюсник. Таким чином, двополюсник – це узагальнене подання схеми, що своїми двома вихідними затискачами (полюсами) приєднується до виділеної вітки.

Якщо в двополюснику є EPC або (і) джерело струму, то такий двополюсник називають активним. У цьому випадку на прямокутнику ставиться буква «А» (перша буква слова активний, рис. 12, а і б).

Якщо в двополюснику немає ні EPC , ні джерела струму, то його називають пасивним. У цьому випадку на прямокутнику або не ставиться ніякої букви, або ставиться буква Π (перша буква слова пасивний, див. рис. 12, в).

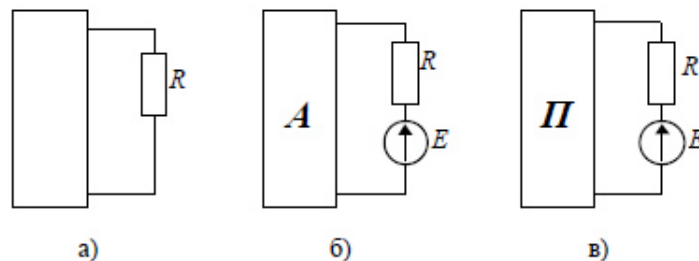


Рис. 12 – Двополюсник (а) загальне зображення його на електричних схемах, (б) – активний двополюсник, (в) – пасивний

4.2. Передача енергії по лінії передачі

Спрощена схема лінії передачі електричної енергії зображена на рис. 1.12. На ній U_1 – напруга генератора на початку лінії, U_2 – напруга на навантаженні R_1, R_2 – опір проводів лінії, R_2 – опір навантаження наприкінці лінії. При передачі великих потужностей (наприклад, декількох десятків мегават), у реальних лініях передач ККД складає 0,94 – 0,97, а U_2 лише на кілька відсотків менше U_1 .

Якщо по лінії передачі з опором R_1 навантаженню повинна бути передана потужність P_2 , то коефіцієнт корисної дії передачі буде тим вище, чим більше напруга U_1 , на початку лінії. У цьому можна переконатися в такий спосіб: зниження U_1 викликає зниження U_2 , а зменшення U_2 при

незмінному P_2 приведе до зменшення R_2 $R_2 = U_2^2 / P_2$. Зниження R_2 при $P_2 = \text{const}$ приведе до зменшення ККД

$$\eta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

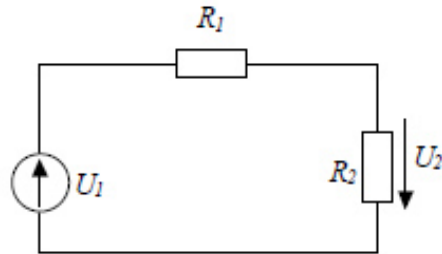


Рис. 1.12. Спрощена схема лінії передачі електричної енергії

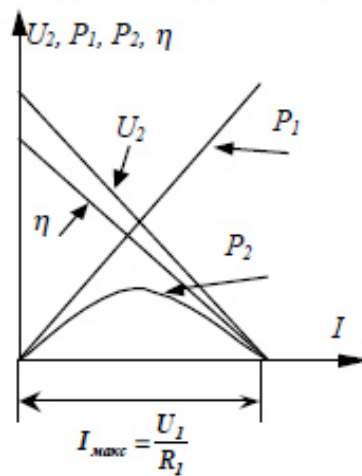


Рис. 13 – Зміна напруги на навантаженні U_2 , потужності на початку лінії P_1 , потужності в навантаженні P_2 коефіцієнти корисної дії η у функції від струму по лінії при незмінній напрузі на вході лінії U_1

Характер зміни потужності на початку лінії P_1 , потужності в навантаженні P_2 коефіцієнти корисної дії η і напруги на навантаженні U_2 , в функції від струму по лінії при незмінній напрузі на вході лінії U_1 , і незмінному опорі проводів лінії R_1 ілюструється кривими рис. 13. По осі абсцис на цьому рисунку відкладений струм I , по осі ординат P_1 , P_2 , U_2 та η .

Максимальне значення струму

$$I_{max} = \frac{U_1}{R_1}$$

має місце при короткому замиканні навантаження. Криві побудовані по рівняннях:

$$R_1 = U_1 I;$$

$$P_2 = U_1 I;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1};$$

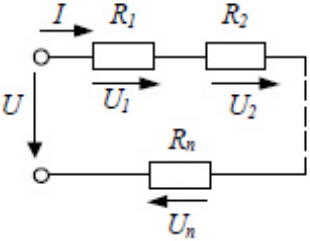
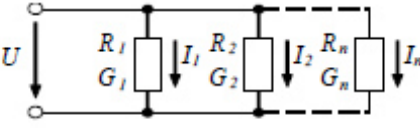
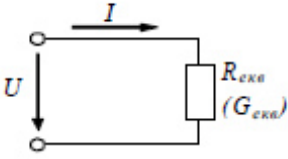
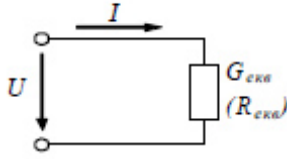
$$U_2 = U_1 - R_1 I.$$

4.3. Розрахунок простих кіл постійного струму

Лінійні електричні кола визначаються принципом суперпозиції і розраховуються аналітично. Простими лінійними колами постійного струму є такі кола, що розраховуються із застосуванням тільки закону Ома. Прості лінійні кола постійного струму містять один або декілька джерел енергії розміщених тільки в одній вітці схеми. Розрізняють три типи з'єднання приймачів у простих колах постійного струму: послідовне, паралельне і змішане з'єднання.

4.4. Послідовне з'єднання приймачів

Таблиця 1.1.

З'єднання	Послідовне	Паралельне
Схеми заміщення		
Еквівалентні схеми заміщення		
Загальна властивість кіл	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum I$
Еквівалентні опір і провідність	$R_{екв} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum R$	$G_{екв} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum G$
Еквівалентний перехід	$R_{екв} = \frac{1}{G_{екв}}$	
Баланс потужності	$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum P$	

При послідовному з'єднанні струм

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} = \frac{U}{\sum R} \quad (1.9)$$

Послідовне з'єднання застосовують, коли треба зменшити струм або коли живляча напруга більше, чим номінальна напруга окремих приймачів:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (1.10)$$

Його недоліки:

- для забезпечення номінального режиму роботи кожного приймача всі вони повинні мати номінальний струм;
- обрив кола в одному з приймачів приводить до відключення всіх приймачів. Останній недолік дуже широко використовується для захисту приймачів від струму, що перевищує номінальний і може привести до виходу приймачів з ладу. Для такого захисту використовуються пристрої, які називають запобіжниками.

4.5. Паралельне з'єднання приймачів

Паралельно з'єднані приймачі (табл. 1.) мають загальну напругу і кожен свій струм. При такому з'єднанні приймачів струми кожного з приймачів визначаються співвідношеннями:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = UG_1;$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = UG_2;$$

$$I_n = \frac{U}{R_n} = UG_n.$$

де G_n – провідність кожного приймача.

Загальний струм кола розраховують використовуючи формулу

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (1.11)$$

Перевага паралельного з'єднання приймачів – незалежність кожного приймача від іншого.

При розрахунку кіл послідовно і паралельно з'єднані приймачі можна замінити еквівалентним приймачем, параметри якого визначаються в такий спосіб:

для послідовно з'єднаних приймачів:

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum R \quad (1.12)$$

$$G_{\text{екв}} = \frac{1}{R_{\text{екв}}} \quad (1.13)$$

для паралельно з'єднаних приймачів:

$$G_{\text{екв}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1.14)$$

$$R_{\text{екв}} = \frac{1}{G_{\text{екв}}} \quad (1.15)$$

Найчастіше зустрічається два або три паралельно з'єднаних приймачі (рис.14).

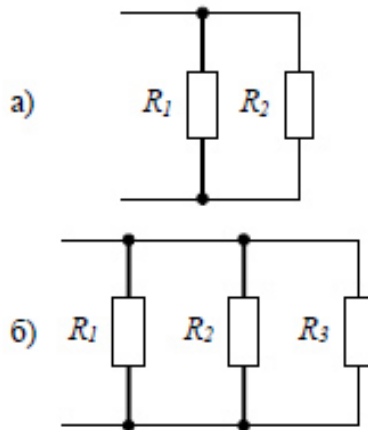


Рис. 14 – Два (а) та три (б) паралельно з'єднані приймачі

Запишемо вираження для таких схем з'єднання приймачів.

Для двох паралельно з'єднаних приймачів (рис. 14,а) еквівалентний опір визначається з вираження

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Для трьох паралельно з'єднаних приймачів (рис. 14,б) еквівалентний опір визначається з вираження

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Потужність, спожита з мережі, при будь-якій схемі з'єднання приймачів, дорівнює арифметичній сумі потужностей, спожитих окремими приймачами

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum P \quad (1.16)$$

4.6. Змішане з'єднання приймачів

Змішаним з'єднанням приймачів називають сполучення послідовного і паралельного з'єднань приймачів (рис. 15, а).

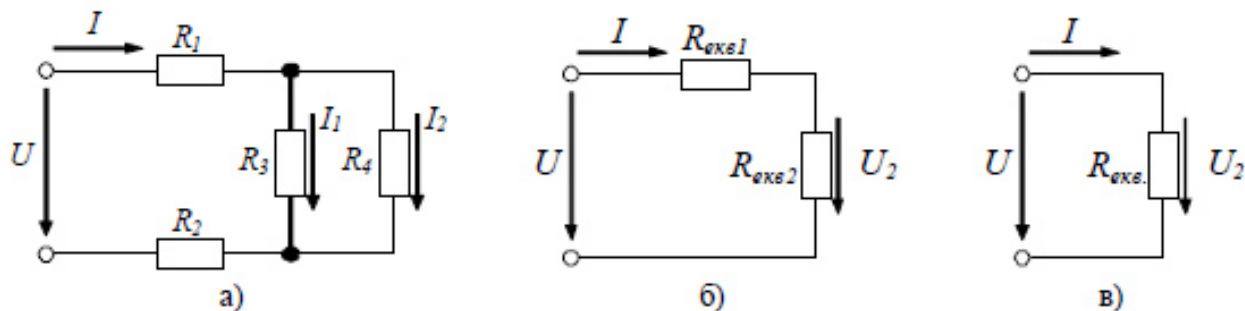


Рис. 15 – Змішане з'єднання приймачів (а), спрощена (б) та гранично згорнута (в) вихідна схема

Звичайно задається напруга U_1 і значення всіх опорів R_i . Для розрахунку струмів використовують метод еквівалентних перетворень:

1. Усі послідовно увімкнені елементи замінюють одним еквівалентним $R_{\text{екв}1}$, а паралельно з'єднані елементи – еквівалентним $R_{\text{екв}2}$.
2. Величини еквівалентних опорів визначають, використовуючи вирази (1.12, 1.13, 1.14, 1.15).
3. Розраховують загальний опір кола (рис. 15,б) $R_{\text{екв}}$ як суму послідовно з'єднаних двох елементів. $R_{\text{екв}1}$ і $R_{\text{екв}2}$.
4. Схема гранично згорнута (рис. 15, в). Використовуючи закон Ома знаходимо величину струму I у колі.
5. Розвертаємо схему у зворотному напрямку. По рис. 15,б знаходимо спадання напруги на $R_{\text{екв}2}$: $U_2 = R_{\text{екв}2}I$.
6. По рис. 15,а знаходимо струми у вітках схеми I_1 і I_2 :

$$I_1 = \frac{U_2}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2}.$$

7. Потужність кола визначають по (1.16), де R_1 , R_2 , P_i , P_n – потужності, що виділяються на кожному із приймачів:

$$P_i = R_1 I_1^2.$$

У ряді випадків розрахунок складного електричного кола спрощується, якщо в цьому колі замінити групу резистивних елементів другою еквівалентною групою, в якій елементи з'єднані інакше, ніж у заданому колі. Взаємна еквівалентність двох груп резистивних елементів визначається тим, що після заміни режим роботи той частини схеми, що залишилась, не зміниться.

У загальному випадку електричне коло з резистивних елементів з'єднаних за схемою n -променевої зірки може бути замінена еквівалентним

колом за схемою n -кутовий багатокутник. У зворотному напрямку перетворення можливо в обмеженій кількості випадків. Зокрема, перетворення в обох напрямках можливі для кіл резистивних елементів, з'єднаних за схемами трикутник та трипроменева зірка (рис. 3).

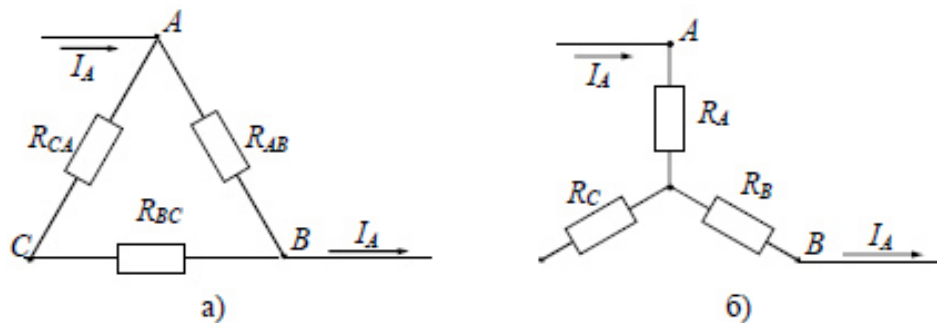


Рис. 16 – З'єднання резистивних опорів за схемами трикутник (а) та трипроменева зірка (б).

Таке перетворення часто застосовується для складних кіл постійного струму, а також при розрахунку складних кіл трифазного струму.

Ураховуючи все вищесказане, (см. п. 1.2.1. – 1.2.4.) можливі ділянки з'єднань опорів кіл постійного струму можуть бути поєднані в одну таблицю (табл. 1.2.) де наведені вихідна ділянка поєднання опорів, еквівалентна ділянка та формули визначення еквівалентних опорів.

Характерним прикладом спрощення розрахунків з використанням методу перетворення кіл може слугувати перетворення мостової схеми з'єднання резистивних елементів (рис. 17).

Після заміни одного з кіл з'єданого за схемою трикутник ($R_3 - R_4 - R_5$) еквівалентним електричним колом, з'єднаним за схемою зірка все коло можна розглядати як змішане з'єднання елементів.

Таблиця 1.2.

Тип з'єднання	Схема ділянки кола	Еквівалентна схема ділянки	Формула визначення еквівалентного опору
Послідовне			$R_{екв} = \sum_{i=1}^n R_i$
Паралельне			$R_{екв} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}$

Тип з'єднання	Схема ділянки кола	Еквівалентна схема ділянки	Формула визначення еквівалентного опору
Трикутник			$R_A = \frac{R_{AB}R_{CA}}{\sum R_{\Delta}}$ $R_B = \frac{R_{BC}R_{AB}}{\sum R_{\Delta}}$ $R_C = \frac{R_{CA}R_{BC}}{\sum R_{\Delta}}$
Зірка			$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C}$ $R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A}$ $R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}$

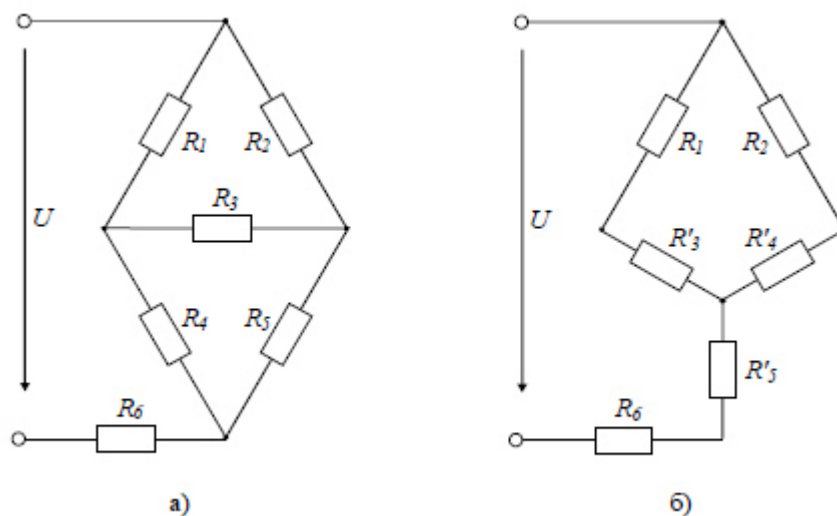


Рис. 17 – Приклад застосування методу перетворення кіл: а – вихідна схема; б – еквівалентна схема

ЛЕКЦІЯ 5. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (4)

План

1. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму.
2. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму із застосуванням законів Кирхгофа.
3. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму із застосуванням методу контурних струмів.
4. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму з застосуванням методу вузлової напруги.
5. Нелінійні електричні кола постійного струму.

Література

5. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
6. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
7. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
8. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
9. Общая электротехника / Под ред. А. Т. Блажкина. – 4-0 изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
10. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

5.1. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму

Складними електричними колами постійного струму називають розгалужені електричні кола з декількома джерелами ЕРС або струму, розміщеними в різних вітках. Розрахунок таких кіл заснований на застосуванні законів Кирхгофа або на застосуванні інших методів, що використовуються для розрахунку електричних кіл постійного струму.

5.1.1. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму із застосуванням законів Кирхгофа

Рівняння, складені на підставі законів Кирхгофа використовуються для знаходження струмів у вітках схеми. Так як в кожній вітці схеми тече свій струм, то число невідомих струмів дорівнює числу віток схеми. Перед тим як скласти рівняння, необхідно:

- а) довільно вибрати позитивні напрямки струмів у вітках і позначити їх на схемі;

б) вибрати позитивні напрямки обходу контурів для складання рівнянь по другому закону Кирхгофа.

Позитивні напрямки обходу контурів рекомендується вибирати однаковими для всіх контурів, наприклад, усі по годинній стрілці.

Позначимо число віток схеми через b , а число вузлів через c . Для того, щоб одержати лінійно незалежні рівняння, за першим законом Кирхгофа складається число рівнянь, рівне числу вузлів без одиниці, тобто $(c - 1)$. За другим законом Кирхгофа складається число рівнянь, кількість яких дорівнює числу віток, за винятком числа рівнянь, складених за першим законом Кирхгофа, тобто:

$$b - (c - 1)$$

При складанні рівнянь за другим законом Кирхгофа необхідно стежити за тим, щоб у кожен новий контур, для якого складається рівняння, входила хоча б одна нова вітка, що не увійшла в попередні контури, для яких уже складені рівняння за другим законом Кирхгофа. Такі контури називаються *незалежними*.

5.1.2. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму із застосуванням методу контурних струмів

Для практичних розрахунків електричних кіл розроблено ряд методів, більш ошадливих у змісті витрат часу і праці, чим метод розрахунку електричних кіл за законами Кирхгофа. Найбільше розповсюдженим з них є *метод контурних струмів та метод вузлових потенціалів*. Крім вище означених методів розрахунку складних лінійних електричних кіл постійного струму використовується також ще ряд методів.

Метод контурних струмів є похідним від методу, побудованого на безпосередньому застосуванні законів Кирхгофа.

Контурний струм – це фіктивний струм, що приписується будь-якому контуру та проходить по всім віткам цього контуру.

Число контурних струмів визначається структурою конкретного електричного кола. При цьому контури вибираються довільно, але вони повинні бути незалежними, тобто кожен черговий контур повинен містити хоча б одну вітку, що не входить у інші контури, а в підсумку не повинно залишитися віток, по яким не пройшов хоча б один контурний струм. Позначається контурний струм подвійним індексом, по номеру контуру, наприклад I_{kk} . Напрямок струму кожного контуру вибирається довільно (бажано однаковий для всіх контурів), а напрямок обходу контуру – по напрямку його струму.

Для кожного контуру складається рівняння за другим законом Кирхгофа.

При цьому для суміжних віток, що входять до складу двох (або більше) контурів, спадання напруги записується від усіх контурних струмів зі своїми знаками.

Для кола, зображеного на рис. 18, із заданими ЕРС E_1, E_2, E_3 , внутрішніми опорами R_{01}, R_{02}, R_{03} і параметрами споживачів R_1, R_2, R_3 , запишемо наступну систему рівнянь для контурних струмів I_{11} та I_{22} :

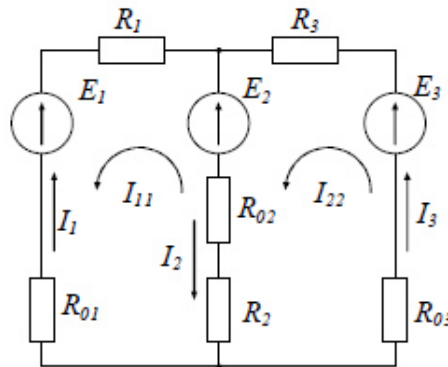


Рис. 18 – До пояснення методу контурних струмів

$$\begin{cases} (R_2 + R_{02} + R_1 + R_{01})I_{11} - (R_2 - R_{02})I_{22} = E_2 - E_1 \\ (R_3 + R_{03} + R_2 + R_{02})I_{22} - (R_2 - R_{02})I_{11} = E_3 - E_2 \end{cases}$$

Результатом розв'язання цієї системи є контурні струми I_{11} та I_{22} .

Дійсні струми у вітках визначаються як алгебраїчна сума контурних струмів, що проходять по конкретній вітці, що розглядається (позитивні напрямки задають дійсні струми, а контурні струми одного напрямку з дійсними струмами беруться зі знаком «+», струми протилежного напрямку – зі знаком «-»). У даному випадку по рис. 18 маємо дійсні струми

$$I_1 = -I_{11}, \quad I_2 = I_{22} - I_{11}, \quad I_3 = I_{22}$$

У загальному випадку, для будь-якого складного кола, що має n контурних струмів, можна скласти формалізовану систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + \dots + R_{1k}I_{kk} + \dots + R_{1n}I_{nn} = E_{n1} \\ R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + \dots + R_{2k}I_{kk} + \dots + R_{2n}I_{nn} = E_{n2} \\ \dots \\ R_{n1}I_{11} + R_{n2}I_{22} + \dots + R_{nk}I_{kk} + \dots + R_{nn}I_{nn} = E_{nn} \end{cases}$$

Тут n – поточний номер контуру; $R_{11}, R_{22}, \dots, R_{nn}$ – власні опори контурів, що дорівнюють сумі опорів усіх елементів, що входять у даний контур; $R_{12} = R_{21}, R_{nk}$ – взаємні опори – сумарні опори у відповідних суміжних вітках, тобто, наприклад, у вітці, що входить і в 1-й, і в 2-й контури. Взаємні опори записуються зі знаком «-». E_{11}, E_{22}, E_{nn} – контурні

EPC , кожна з котрих дорівнює алгебраїчній сумі EPC відповідного контуру. При цьому знак кожної EPC , що входить до контуру, визначається напрямком обходу контуру: EPC позитивна при співпадінні напрямку обходу та напрямком дії EPC , та негативна – якщо вони не співпадають.

5.1.3. Розрахунок складних лінійних електричних кіл постійного струму з застосуванням методу вузлової напруги

Часто електричне коло містить два вузли або легко може бути перетворене в подібне електричне коло. У цьому випадку метод вузлової напруги (метод вузлових потенціалів, метод двох вузлів) надає можливість дуже просто виконати аналіз та розрахунок електричного кола. Наприклад, коло, схема якого зображена на рис. 19, а містить декілька паралельно з'єднаних віток.

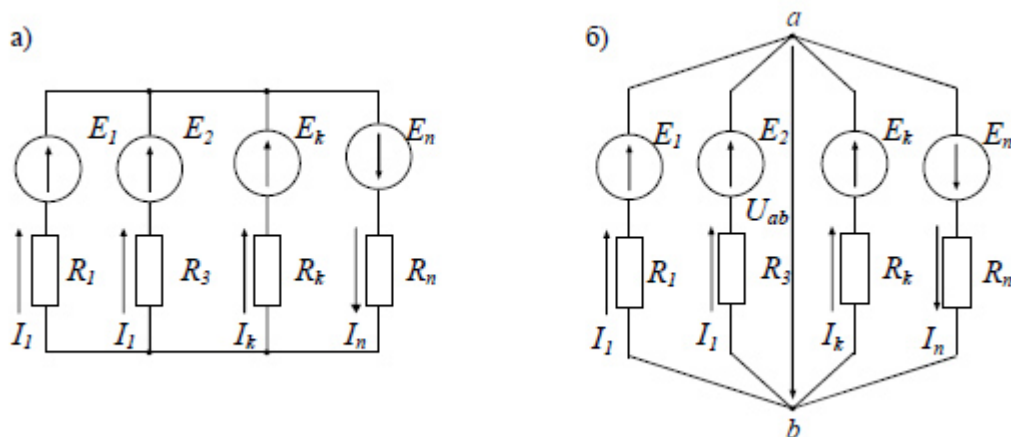


Рис. 19 – Схеми до пояснення методу вузлових напруг: а – початкова схема; б – перетворена схема

У залежності від значень та напрямків EPC та напруг, а також значень опорів між вузловими точками a та b встановлюється певна вузлова напруга U_{ab} . Формула вузлової напруги в загальному випадку має вигляд:

$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k G_k + \sum_{k=1}^n U_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k} \quad (1.18)$$

де E_k – EPC джерела, що діє на k – й вітці; G_k – провідність k – ої вітці; U_k – напруга, що діє на k – й вітці.

Зневажаючи опором проводів, з'єднуючих вітки кола, схему рис. 19,а, можна замінити більш зручною для розглядання (рис. 19,б).

У відповідності до закону Ома для ділянки кола, що містить джерело EPC струм визначається як:

$$I_k = \frac{U_{ba} + E_k}{R_k} = (E_k - U_{ab})G_k$$

Перед визначенням напруги за формулою (1.18) треба задатися його позитивним напрямком. Зі знаком «+» у (1.18) повинні входити *ЕРС*, що мають напрямок між точками *a* та *b* зустрічно напрузі, та напруги віток, що мають напрямок згідно з U_{ab} . Знаки у формулі (1.18) не залежать від напрямку струмів віток.

При аналізі та розрахунку електричних кіл методом вузлової напруги доцільно вибирати позитивні напрямки струмів після визначення вузлової напруги. У цьому випадку позитивні напрямки струмів неважко вибрати таким чином, щоб усі вони співпадали з їхніми дійсними напрямками.

5.1.4. Нелінійні електричні кола постійного струму

У загальному випадку у всіх електротехнічних пристроях постійного струму залежність струму від напруги $I = f(U)$ між виводами пристрою нелінійна. Якщо ця нелінійність у широкому діапазоні зміни значень струму і напруги невелика, то при розрахунках можна такий електротехнічний пристрій представити лінійною схемою заміщення і вважати його лінійним. Проте зустрічається значна кількість електротехнічних пристроїв, в яких залежність $I=f(U)$ істотно нелінійна.

Під *нелінійними електричними колами* розуміють електричні кола, які містять нелінійні елементи.

Нелінійні елементи підрозділяються на:

- нелінійні опори;
- нелінійні індуктивності;
- нелінійні ємності.

Нелінійні опори, на відміну від лінійних, мають нелінійні вольт-амперні характеристики. Нелінійні опори можуть бути підрозділені на дві великі групи: групу некерованих нелінійних опорів і групу керованих нелінійних опорів.

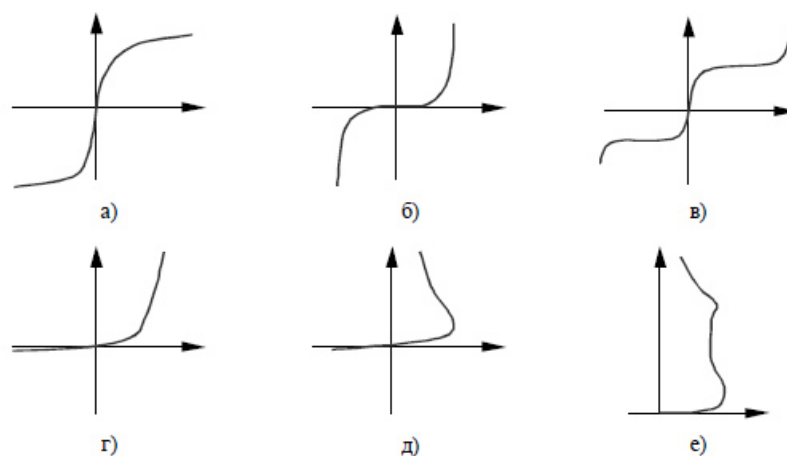


Рис. 20 – Вольт-амперні характеристики нелінійних елементів: лампи накаливання (а), тиритові та вилитові опори (б), баретери (в), двоелектродні напівпровідникові прилади(г), електрична дуга, газотрони (д), неонові лампи (е)

У групу некерованих нелінійних опорів входять: лампи накалювання (рис. 20,а), тиритові та вилитові опори (рис. 20,б), баретери (рис. 20,в), двоелектродні напівпровідникові прилади, наприклад, діоди, варикапи, стабілітрони та інші (рис.20,г), електрична дуга, газотрони (рис.20,д), неонові лампи (рис. 20,е), а також деякі інші типи нелінійних опорів. Порівняння зовнішніх характеристик нелінійних опорів показує, що існує велика їхня розмаїтість.

У групу керованих нелінійних опорів входять три- (і більш) електродні лампи і напівпровідникові прилади.

Для розрахунку електричних кіл з нелійними електротехнічними пристроями останні необхідно представити у виді нелінійних схем заміщення. У найпростішому випадку елементами нелінійної схеми заміщення є нелінійні резистивні елементи. Вольт-амперна характеристика $I = f(U)$, що визначає властивості нелінійного резистивного елемента, може бути задана аналітично, або графічно у виді таблиці.

У загальному випадку нелінійні схеми заміщення електротехнічних пристроїв постійного струму містять крім нелінійних резистивних елементів ще й нелінійні джерела напруги та струму, нелінійні властивості яких також задаються їхніми зовнішніми (вольт-амперними) характеристиками.

Внаслідок нелінійності вольт-амперних характеристик $I=f(U)$ нелінійних резистивних елементів для розрахунку нелінійних електричних кіл не можна застосовувати метод накладення. Тому не застосовуються зовсім або застосовуються з додатковими обмеженнями всі методи розрахунку електричних кіл, що засновані на методі накладення. У загальному випадку для аналізу нелінійних електричних кіл не застосовуються методи контурних струмів, метод вузлових потенціалів, метод перетворення. Метод еквівалентного генератора можна застосувати для розрахунку нелінійного електричного кола за умови, що активний двополюсник не містить нелінійних резистивних елементів.

Для розрахунку та аналізу нелінійних електричних кіл постійного струму застосовуються два основних методи – графічний і аналітичний.

Графічний метод. При графічному методі розрахунку послідовність операцій зберігається приблизно тією ж самою, що і при розрахунках лінійних кіл, тільки замість додавання або вирахування значень напруг, або струмів здійснюється додавання, або вирахування абсцис і ординат відповідних вольт-амперних характеристик. Графічний метод розрахунку нелінійних електричних кіл дуже наочний, але досить трудомісткий.

Аналітичний метод. З різних аналітичних методів розрахунку нелінійних електричних кіл найбільше часто застосовується метод лінеаризації вольт-амперних характеристик. Цей метод, полягає в тім, що вольт-амперна характеристика кожного нелінійного резистивного елемента поділяється на кілька ділянок, кожний з яких потім апроксимується відрізком прямої лінії. Сукупність усіх лінеаризованих ділянок дає апроксимацію вольт-

амперної характеристики у виді ламаної лінії. У межах кожної лінеарізованої ділянки залежність між струмом і напругою задається лінійним рівнянням (з постійними коефіцієнтами). У результаті нелінійний резистивний елемент представляється схемою, що містить елементи з постійними параметрами, тобто лінійною схемою заміщення.

Представивши всі нелінійні резистивні елементи в межах робочих ділянок вольт-амперних характеристик відповідними лінійними схемами заміщення одержимо повну лінійну схему заміщення нелінійного кола. Для розрахунку режиму повної лінійної схеми заміщення можна користатися всіма методами аналізу лінійних кіл за умови, що режим кожного нелінійного елемента визначається робочою точкою, що знаходиться в межах лінеарізованої робочої ділянки його вольт-амперної характеристики.

ЛЕКЦІЯ 6. НАПІВПРОВІДНИКИ ТА ЇХ ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

План

Вступ

1. Електропровідність напівпровідників.
2. Електричні властивості напівпровідників.
3. Процеси в електронно-дірочному переході (1).

Література

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
3. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
4. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

Вступ

У сучасних електронних приладах використовується можливість управління потоком електронів, які утворюють електричний струм.

Основою напівпровідниковою техніки є елементи, які виробляють на базі природних напівпровідників: германію, кремнію, селену, арсеніду галію тощо.

Для правильного конструювання схем із застосуванням напівпровідникових приладів необхідно знати основні фізичні процеси, які в них відбуваються.

6.1. Електропровідність напівпровідників

Хімічним елементом називається з'єднання атомів з однаковим зарядом ядра. У природі з усіх хімічних елементів тільки гази: гелій, неон та інші знаходяться в одноатомному стані. Всі інші елементи тяжіють з'єднатися один з одним у певному порядку, утворюючи молекули. З'єднання в певному порядку атомів і молекул називається речовиною. Тверда речовина має свою структуру і складається з атомів, що мають у своєму складі ядра й електрони, які знаходяться на визначених енергетичних рівнях (заповнена зона, заборонена зона, валентна зона, зона провідності).

Властивість атомів одного хімічного елемента приєднувати певну кількість атомів інших хімічних елементів називається валентністю.

З'єднання атомів хімічних елементів у молекулу називається хімічним зв'язком. Він може виникнути, наприклад, при утворенні електронних пар: двох електронів, які належать одночасно двом атомам (тобто обертаються навколо ядер двох атомів); такий хімічний зв'язок називається ковалентним зв'язком. Якщо ковалентний зв'язок утворюється в результаті переходу електронної пари від одного хімічного елемента – донора (постачальника електронів) до іншого хімічному елементу – акцептору (користувачу електронів), то такий хімічний зв'язок називається донорно-акцепторним зв'язком.

Напівпровідник з домішкою утворюється у такий спосіб. Якщо в хімічний елемент IV групи внести домішку (хімічний елемент V групи), то при кімнатній температурі атоми домішки віддають 5-й електрон, який не бере участі у створенні хімічного зв'язку. В результаті атоми домішки, які розташовані у вузлах кристалічних решіток, стають позитивними іонами, а в отриманій речовині з'являються вільні електрони. Такі речовини, у яких носіями зарядів є електрони, називають напівпровідниками n-типу (n – «negative» – негативний), а домішки, завдяки яким виникають вільні електрони, називають донорними.

Якщо в хімічний елемент IV групи внести як домішку хімічний елемент III групи, то при кімнатній температурі атоми домішки захоплюють електрони у деяких атомів хімічного елемента IV групи для утворення хімічного зв'язку. В результаті ці атоми, розташовані у вузлах кристалічних решіток, стають позитивними іонами, навколо яких знаходяться нейтральні атоми. Нейтральні атоми, які знаходяться біля іона, віддають свої електрони позитивному іону, роблячи його нейтральним; при цьому вони самі стають позитивними іонами.

Отже, місце позитивного іона увесь час змінюється, начебто переміщується позитивний заряд, який дорівнює за модулем заряду електрона. Відсутність електрона в атомі напівпровідника називають діркою, яка має позитивний заряд, рівний за модулем заряду електрона. Такі речовини, у яких носіями зарядів є дірки, називають напівпровідниками p-типу (p – «positive» – позитивний), а домішки, завдяки яким виникають дірки, називають акцепторними.

6.2. Електричні властивості напівпровідників

Напівпровідниками називаються речовини, що мають питомий електричний опір у межах $10^3 - 10^4$ Ом·см і, що займають по електропровідності проміжне положення між металами і діелектриками. Зазначене розходження в електропровідності речовин обумовлено розходженням в енергетичних спектрах цих матеріалів, тобто розходженням у дозволених значеннях рівнів енергії електронів, які є в атомах, що складають структуру даної речовини.

При утворенні кристала енергетичні рівні атомів розщеплюються, що приводить до утворення зон, які складаються з близько розташованих друг до друга енергетичних рівнів. На енергетичній діаграмі чистого напівпровідника (рис.21.) показані В – валентна зона, усі рівні якої при температурі абсолютного нуля заповнені електронами, П – зона вільних електронів (зона провідності), на рівні якої можуть переходити електрони при порушенні атомів, і З – заборонена зона, енергетичні рівні в якій відсутні. Наявність забороненої зони означає, що для переходу в зону провідності електрону необхідно надати енергію, більшу, ніж ΔW .

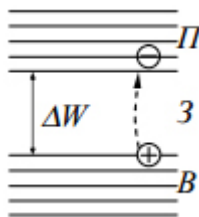


Рис. 21 – Енергетична діаграма чистого напівпровідника

У металів заборонена зона відсутня і валентна зона безпосередньо стикається з зоною провідності. Тому в металах число вільних електронів значне, що і забезпечує їх високу електро- і теплопровідність. В ізоляторів ширина забороненої зони велика ($\Delta W > 4$ eV) і при звичайних умовах електрони провідності практично відсутні.

Ширина забороненої зони ΔW у найбільш розповсюджених напівпровідників – германія (Ge) і кремнію (Si) – складає відповідно 0,72 і 1,12 eV. Кількість відомих у даний час напівпровідникових матеріалів досить велика. Для виготовлення напівпровідникових приладів застосовуються прості напівпровідникові речовини – германій, кремній, селеній – і складні напівпровідникові матеріали – арсенід галію, фосфід галію та інші. Чисті напівпровідники належать до IV групи елементів таблиці Менделєєва і мають по чотири валентних електрона.

Через відносно вузьку заборонену зону в Ge і Si вже при температурі, близької до кімнатної ($T \approx 300$ K), деякі електрони одержують енергію, достатню, щоб перетнути заборонену зону і перейти в зону провідності. При відході електрона у валентній зоні залишається незаповнений енергетичний рівень – дірка. У кристалічних ґратах при цьому відбувається розрив одного з валентних зв'язків у кристалі напівпровідника і поява вільного електрона, що

може вільно переміщатися по кристалі, і дірки – вузла грати, позбавленої одного з електронів зв'язку. Обірваний зв'язок може бути відновлено, якщо до нього потрапить електрон із сусіднього зв'язку.

Процес утворення в чистому напівпровіднику пари: електрон у зоні провідності – дірка у валентній зоні – одержав назву генерації власних носіїв зарядів.

Одночасно з процесом генерації носіїв зарядів протікає процес їхньої рекомбінації – зустрічі електронів з дірками, що супроводжується поверненням електрона із зони провідності у валентну зону і зникненням вільних зарядів.

Найчастіше рекомбінація відбувається на дефектах кристалічних ґрат (порушення кристалічної структури, випадкові домішки, тріщини, дефекти в поверхневих шарах).

Уведення до чистого напівпровідника невеликих кількостей домішок (наприклад, у пропорції один атом домішки на мільйон атомів напівпровідника) приводить до різкої зміни характеру електропровідності.

Домішки, що володіють додатковим валентним електроном, називаються донорними. Це атоми домішок V групи елементів таблиці Менделєєва – миш'як, фосфор, сурма. Вони мають на зовнішній оболонці по п'ять валентних електронів. Такий напівпровідник називається напівпровідник *n*-типу.

Домішки III групи – алюміній, бор, індій – називаються акцепторними. Вони мають додатковий валентний рівень. Такий напівпровідник називається напівпровідник *p*-типу.

6.3. Процеси в електронно-дірочному переході

У напівпровідникових приладах використовуються специфічні явища, що виникають на границі роздязнула як між напівпровідниками *p*- і *n*-типів, так і між цими напівпровідниками і чи діелектриками металами.

Контактні явища на границі напівпровідників. У більшості напівпровідникових приладів використовуються кристали напівпровідника з двома і більш ділянками (шарами) з різним типом провідності (*n* і *p*).

При одержанні двошарової структури із шарами *n*- і *p*-типу звичайно концентрація домішок у шарах несиметрична. Один із шарів має більш високу концентрацію основних носіїв і більшу електропровідність.

Область напівпровідника, яка розташована біля металургійної границі між *p* і *n* шарами, називається електронно-дірочним переходом або *p-n*-переходом.

1. Розглянемо процеси в *p-n*-переході під час відсутності зовнішнього електричного поля (рис. 22, а).

Через різницю концентрацій основних носіїв у *p*- і *n*-шарах відбувається процес дифузії через перехід носіїв заряду з області з підвищеною концентрацією в область зі зниженою концентрацією носіїв.

При цьому основні носії в p -області – дірки – дифундують у n -шар, а основні носії n -шару – електрони – дифундують у p -шар.

Перейшовши під впливом сил дифузії металургійну границю, носії рекомбінують з основними носіями іншого шару. За рахунок відходу основних носіїв з одного шару і їхньої рекомбінації в іншому біля металургійної границі виникає область, збіднена рухливими основними носіями заряду і яка має високий опір (замикаючий шар). У замикаючому шарі піднімається баланс позитивних і негативних зарядів, тому що при зменшенні концентрації рухливих носіїв виявляється некомпенсованим об'ємний заряд нерухомих іонів домішок: у p -шарі – негативних, у n -шарі – позитивних іонів. Цей подвійний електричний шар (рис. 22,а) створює електричне поле з напруженістю E_0 і приводить до появи на кривій розподілу потенціалу ϕ в напівпровіднику потенційного бар'єра ϕ_0 .

Ширина замикаючого шару в p - і n -шарах залежить від концентрації іонів домішок у шарах і тим менше, чим більше концентрація домішок.

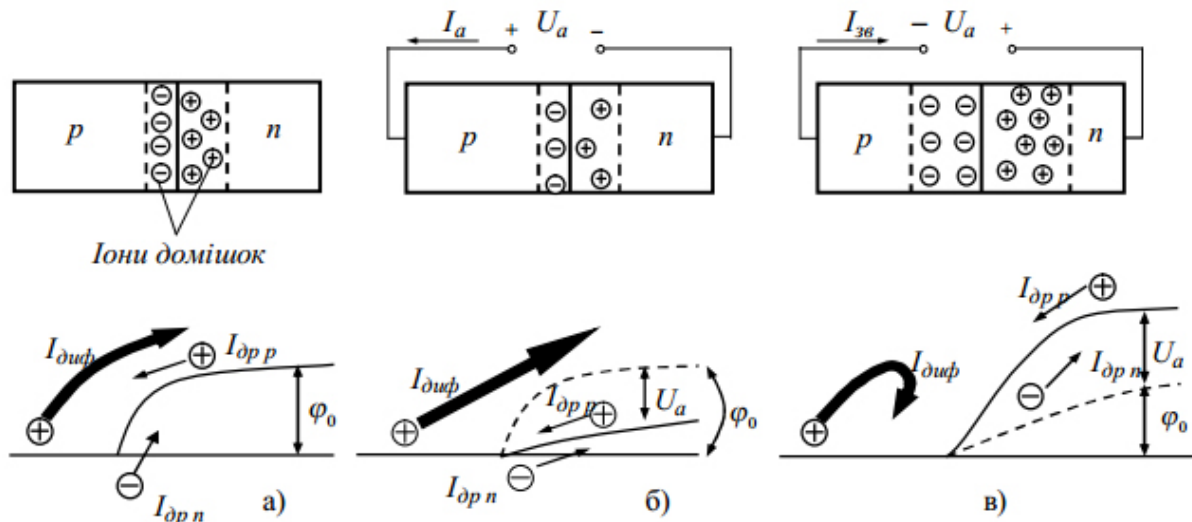


Рис. 22 – Електронно-дірочний перехід при відсутності зовнішнього електричного поля (а) та при прикладенні прямої (б) та зворотної (в) напруги

2. Якщо до виводів прикласти пряму напругу ($+U$), то створюване їм електричне поле E буде компенсувати величину потенційного бар'єра ϕ_0 і в область з меншою концентрацією буде вводиться все більша кількість дірок, що і утворять прямий струм (рис. 22,б). При цьому опір переходу різко знижується, а p - n -перехід називають – відкритим.

3. Якщо до виводів прикласти зворотну напругу ($-U$), то створюване їм електричне поле буде підвищувати потенційний бар'єр і перешкоджати переходу основних носіїв заряду в сусідню область. При цьому опір p - n -переходу великий, струм через нього маленький – він обумовлений рухом неосновних носіїв заряду. У цьому випадку струм називають зворотним, а p - n -перехід – закритим (рис.22,в).

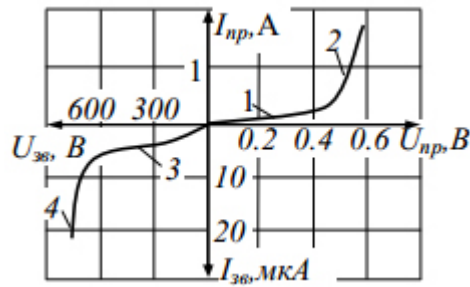


Рис. 23 – Вольт-амперна характеристика $p-n$ -переходу

На рис. 23. показана повна вольт амперна характеристика $p-n$ -переходу. Ця характеристика є істотно нелінійною.

На ділянці 1: $E_{вн} < E_{зат}$ і прямої струм маленький.

На ділянці 2: $E_{вн} < E_{зат}$, струм визначається тільки опором напівпровідника, бо замикаючий шар відсутній

На ділянці 3: замикаючий шар перешкоджає руху основних носіїв, невеликий струм визначається рухом неосновних носіїв заряду.

Зламування вольт-амперної характеристики на початку координат обумовлено різними масштабами струму і напруги, при прямому і зворотному напрямках напруги, прикладеної до переходу. І зрештою, на ділянці 4 відбувається пробій $p-n$ -переходу і зворотний струм швидко зростає. Це пов'язано з тим, що при русі через $p-n$ -перехід під дією електричного поля неосновні носії заряду здобувають енергію, достатню для ударної іонізації атомів напівпровідника. У переході починається лавинообразне розмноження носіїв заряду, що приводить до різкого збільшення зворотного струму при майже незмінній зворотній напрузі. Цей вид електричного пробію називають лавинним.

Для електричного пробію характерна оборотність, що полягає в тому, що первісні властивості $p-n$ -переходу цілком відновлюються, якщо знизити напругу на $p-n$ -переході.

Якщо температура $p-n$ -переходу зростає в результаті його нагрівання зворотним струмом і недостатнього тепловідводу, то підсилюється процес генерації пар носіїв заряду. Це, у свою чергу, приводить до подальшого збільшення зворотного струму та нагріванню $p-n$ -переходу, що може викликати руйнування переходу. Такий процес називають тепловим пробієм. Тепловий пробій руйнує $p-n$ -перехід.

ЛЕКЦІЯ 7. НАПІВПРОВІДНИКИ ТА ЇХ ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ (2)

План

1. Процеси в електронно-дірочному переході (2).
2. Контактні явища на границі діелектрика і напівпровідника.

3. Контактні явища на границі напівпровідника і металу.
Висновки.

Література

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
 2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
 3. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
 4. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
- Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

7.1. Процеси в електронно-дірочному переході

Явища в приграничному шарі напівпровідника під дією електричного поля. Розглянемо процеси в поверхневому шарі напівпровідника n-типу, прийнявши наявність у ньому рухливих основних (електрони) і неосновних (дірки) носіїв зарядів. Для напівпровідника p-типу явища аналогічні. Для аналізу скористаємося ідеалізованою моделлю двошарового плоского конденсатора (шар напівпровідника i-типу має контакт з однією пластиною конденсатора і відділений від іншої пластини вакуумним проміжком), підключеного до джерела електричної енергії (рис. 24,а).

У залежності від значення і полярності прикладеного до конденсатора напруги явища в шарі напівпровідника на границі з вакуумом мають різний характер.

При відсутності напруги ($U=0$) основні і неосновні носії розподілені рівномірно в обсязі напівпровідника (рис.24,а). При зазначеній на рис. 24,б полярності напруги ($U > 0$) у шарі напівпровідника на його границі з вакуумом під дією електричного поля концентрація електронів зростає. Одночасно знижується концентрація дірок за рахунок посилення рекомбінації. Інша частина напівпровідника залишається електрично нейтральною. Прикордонний шар з надлишком основних носіїв називається збагаченим шаром. Його питома провідність велика.

Якщо змінити полярність напруги $U=U_1 < 0$, то концентрація електронів у прикордонному шарі зменшиться, а концентрація дірок незначно збільшиться (рис. 24,в), Прикордонний шар з недоліком основних носіїв називається збідненим шаром. Його питома провідність мала.

При відсутності напруги ($U=0$) основні і неосновні носії розподілені рівномірно в обсязі напівпровідника (рис.24,а). При зазначеній на рис. 24,б полярності напруги ($U > 0$) у шарі напівпровідника на його границі з

вакуумом під дією електричного поля концентрація електронів зростає. Одночасно знижується концентрація дірок за рахунок посилення рекомбінації. Інша частина напівпровідника залишається електрично нейтральною. Прикордонний шар з надлишком основних носіїв називається збагаченим шаром. Його питома провідність велика.

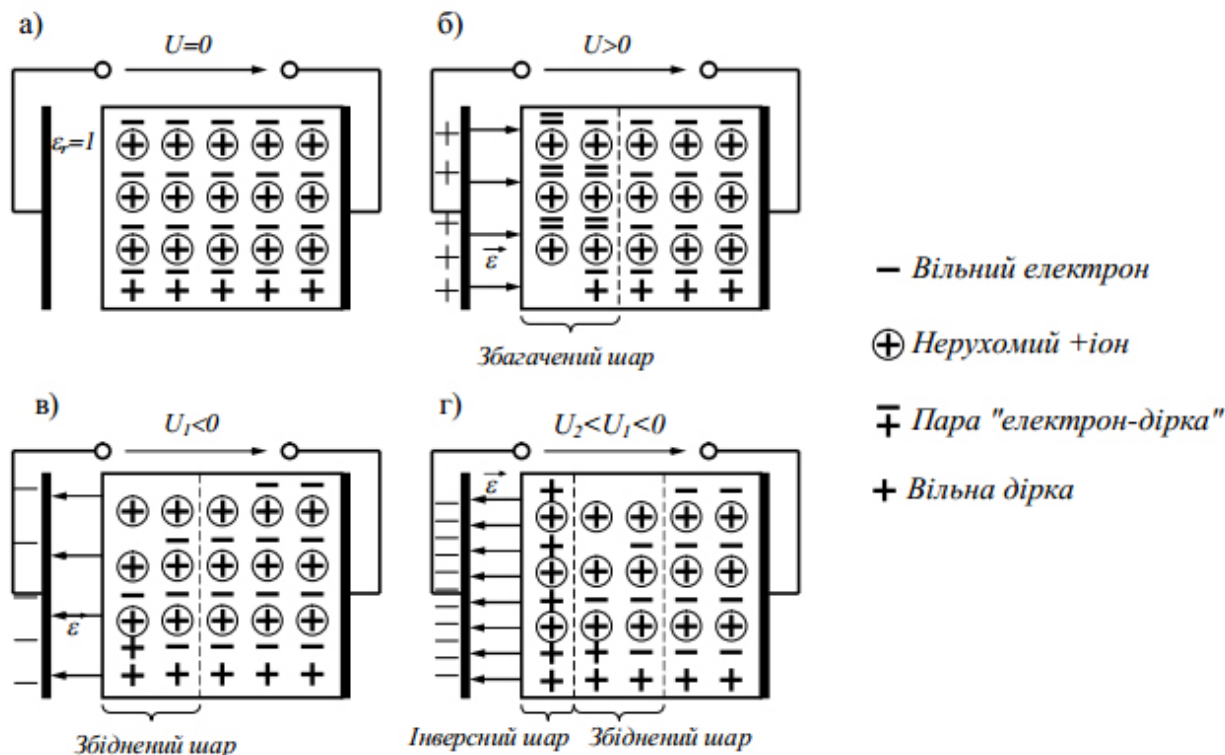


Рис.24 – Явища в приграничному шарі напівпровідника під дією електричного поля:

а – при відсутності напруги; б – при наявності напруги $U > 0$;
в – $U_1 < 0$; г – $U_2 < U_1 < 0$

При відсутності напруги ($U=0$) основні і неосновні носії розподілені рівномірно в обсязі напівпровідника (рис.24,а). При зазначеній на рис. 24,б полярності напруги ($U > 0$) у шарі напівпровідника на його границі з вакуумом під дією електричного поля концентрація електронів зростає. Одночасно знижується концентрація дірок за рахунок посилення рекомбінації. Інша частина напівпровідника залишається електрично нейтральною. Прикордонний шар з надлишком основних носіїв називається збагаченим шаром. Його питома провідність велика.

Якщо змінити полярність напруги $U=U_1 < 0$, то концентрація електронів у прикордонному шарі зменшиться, а концентрація дірок незначно збільшиться (рис. 24,в), Прикордонний шар з надлишком основних носіїв називається збідненим шаром. Його питома провідність мала.

При визначеному значенні напруги $U_2 < U_1 < 0$ у тонкому шарі напівпровідника в його границі роздягнула з вакуумом концентрація дірок

може перевищити концентрацію електронів, що приводить до зміни в ньому типу електропровідності (рис. 24,г). Прикордонний шар, провідність якого визначається неосновними носіями, називається інверсним шаром.

Його питома провідність і товщина зростають зі збільшенням абсолютного значення напруги U_2 .

Із закону збереження енергії випливає, що в стаціонарних умовах кількість носіїв заряду (електронів і дірок), які рекомбінують повинна дорівнювати кількості генерованих. Таким чином, кожен з рухомих носіїв існує («живе») протягом деякого проміжку часу. Середнє значення цього проміжку часу називається *часом життя* носіїв, позначається для дірок τ_F та для електронів τ_n і визначається ймовірністю зустрічі даного носія з носієм протилежного знака, тобто залежить від температури, концентрації рухомих носіїв протилежного знаку і деяких інших факторів.

При відсутності електричного поля в напівпровіднику електричний струм не виникає, оскільки всі напрямки теплового руху рухомих носіїв зарядів однаково ймовірні. Якщо ж в кристалі створити електричне поле, то електрони і дірки, продовжуючи брати участь у хаотичному тепловому русі, будуть зміщуватися під дією електричних сил уздовж поля, що і створить електричний струм.

Рух електронів і дірок під дією поля відбувається в протилежних напрямках. Але оскільки вони мають протилежні за знаками заряди, то загальний струм рівний сумі діркового й електронного:

$$j = j_n + j_F ,$$

де j – густина струму, A/cm^2 ;

j_n – густина електронного струму;

j_F – густина діркового струму.

У напівпровіднику електрони під дією поля рухаються з постійною середньою швидкістю. Це можна пояснити в такий спосіб: вільний електрон у кристалі під дією поля прискорюється до чергового зіткнення з атомом кристалічної решітки. При зіткненні він віддає атому енергію, яку отримав від електричного поля, і починає знову прискорюватися під дією поля до наступного зіткнення з решіткою і т.д. У результаті за досить великий проміжок часу швидкість електрона можна характеризувати деякою середньою величиною v_n , яка пропорційна напруженості електричного поля E , тобто:

$$v_n = \mu_n E , \text{ м/сек,}$$

де μ_n – коефіцієнт пропорційності, який називають рухливістю електронів.

Цей коефіцієнт чисельно дорівнює середній швидкості, яку отримують електрони провідності в кристалі при напруженості електричного поля

$1\text{В}/\text{см}$. Для германію рухливість електронів дорівнює $3900\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$, для кремнію $1350\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ (при кімнатній температурі).

Аналогічні процеси відбуваються і при упорядкованому русі дірок через кристал, тому:

$$v_F = \mu_p E, \text{ м/сек},$$

де μ_p – рухливість дірок.

Рухливість дірок для германію складає $3900\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ для кремнію $500\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ при кімнатній температурі порівняйте з рухливістю електронів).

Як відомо, густина струму чисельно рівна зарядові (у Кулонах), який проходить через одиницю площі поперечного перерізу за 1 сек . Тому:

$$j_n = q_n v_n = en v_n = en \mu_n E,$$

де q_n – загальний заряд електронів провідності в одиниці об'єму, $\text{к}/\text{см}^3$;

e – заряд електрона;

n – концентрація електронів.

Аналогічно для діркового струму:

$$j_p = q_p v_p = en v_p = en \mu_p E,$$

де p – концентрація дірок.

Тоді загальна густина струму:

$$j = j_n + j_p = (\mu_n n + \mu_p p) E$$

Крім цього густина струму за законом Ома записується в наступному виді:

$$j = \sigma E,$$

де σ – питома провідність, $\text{А}/\text{В см}^3$.

З порівняння попередніх двох виразів отримуємо:

$$\sigma = e(\mu_n p + \mu_p n),$$

тобто провідність напівпровідника залежить від концентрації електронів і дірок та їхньої рухливості.

Якщо у формулу для провідності підставити значення концентрації електронів та врахувати, що для власного напівпровідника, то: $n = p$

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) \approx (\mu_n + \mu_p) N_e \exp\left[-\frac{\Delta W}{2kT}\right] = \sigma_0 \exp\left[-\frac{\Delta W}{2kT}\right],$$

де $\sigma_0 = (\mu_n + \mu_p) N_e$

Ця формула описує залежність питомої провідності від температури для власного напівпровідника. З формули видно, що чим більша ширина забороненої зони, тим менша провідність такого матеріалу і тим сильніше залежить його питомий опір від температури.

7.2. Контактні явища на границі діелектрика і напівпровідника

Різні речовини мають різну роботу виходу електронів, тобто найменшу енергію, необхідну для виводу одного електрона з речовини у вакуум. Цей процес кількісно визначається значенням потенціалу виходу j , рівного відношенню роботи виходу до заряду електрона. Розглянемо явища, що при цьому виникають на границі розділу діелектрика і напівпровідника, прийнявши в останньому наявність основних і неосновних носіїв. Для напівпровідників n - і p -типів на основі кремнію потенціал виходу практично однаковий: $\varphi_{Si(n)} = \varphi_{Si} \approx 4,8$ В, а для діелектрика з двоокису кремнію $\varphi_{SiO_2} \approx 4,4$ В. У результаті відбувається перехід частини електронів з діелектрика в напівпровідник, так що прикордонний шар у діелектрика заряджається позитивно, а в напівпровідника – негативно.

Виникаюче між шарами електричне поле напруженістю ϵ перешкоджає цьому процесу, приводячи його в рівноважний стан. Під дією цього електричного поля аналогічно розглянутим вище процесам (рис. 24, б і г) у прикордонному шарі в напівпровіднику n -типу утвориться збагачений шар (рис. 25,а), а в напівпровіднику p -типу – збіднений шар (рис. 25,б).

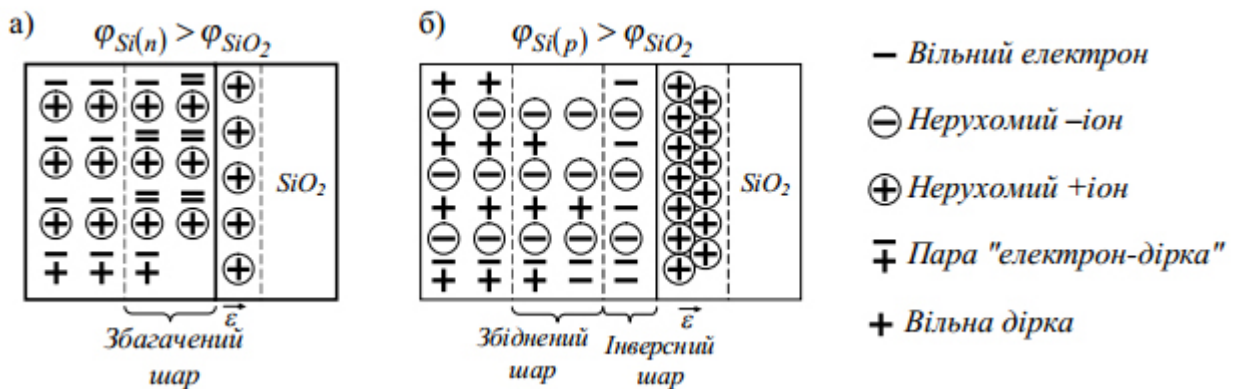


Рис. 25 – Контактні явища на границі діелектрика і напівпровідника: а – n -типу; б – p -типу.

Контактні явища на границі напівпровідника і металу

Якщо потенціал виходу для металу φ_M менше потенціалу виходу для напівпровідника n-типу $\varphi_{Si(n)}$ то відбувається переважний перехід електронів з металу в напівпровідник, у прикордонному шарі якого виникає збагачений шар подібно представленому на рис. 25,а. Такий контакт проводить струм в обох напрямках і використовується для конструювання виводів напівпровідникових приладів.

Якщо потенціал виходу для металу φ_M більше потенціалу виходу для напівпровідника $\varphi_{Si(n)}$, то в границі розділу в металі утвориться шар з негативним зарядом, а в напівпровіднику – збіднений шар з позитивним зарядом, Такий контакт має односторонню провідність. Електричні переходи такого типу називаються бар'єрами Шотки по імені вченого, який досліджував їх.

Висновки

Речовини, електропровідність яких знаходиться між провідниками та діелектриками, називають напівпровідниками, характерними властивостями яких є:

– напівпровідник при прямій напрузі проводить електричний струм в одному напрямку (є провідником), а при зворотній напрузі практично не проводить електричний струм (є діелектриком);

– при збільшенні температури питомий опір напівпровідників знижується (провідників, навпаки, зростає).

Звільнення валентних електронів може відбуватися за рахунок тепла, енергії електричного поля, різних видів випромінювання, чи інших видів енергії.

Основи зонної теорії твердого тіла:

1. Кількість електронів в атомі дорівнює кількості протонів в ядрі.
2. Кожний з електронів має певну енергію (знаходиться на певному енергетичному рівні) – чим далі від ядра, тим енергетичний рівень вищий.
3. Енергія електрона змінюється тільки дискретно, певними порціями – і тому електрони в атомі мають цілком певні орбіти.
4. Енергетичні рівні, на яких знаходяться електрони, називаються *дозволеними*; ті рівні, де електрони знаходяться не можуть – *забороненими*.
5. Електрони, найменш пов'язані з ядром, можуть вступати у взаємодію з ядрами інших атомів – це *валентні* електрони.
6. Існують зони, що містять дозволені рівні (*дозволені зони*), між якими знаходяться *заборонені зони*. Зони, в яких знаходяться рівні валентних електронів – це *валентні зони*.

ЛЕКЦІЯ 8. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

План

Вступ.

1. Класифікація напівпровідникових приладів.

2. Напівпровідникові резистор.

3. Напівпровідникові діоди.

Висновки.

Література

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.

2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.

3. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.

Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

Вступ

Ефективність електронної апаратури зумовлена високою швидкістю, точністю і чутливістю її елементів, найважливішими з яких є електронні прилади. За допомогою цих приладів можна порівняно просто і в багатьох випадках з високим коефіцієнтом корисної дії перетворювати електричну енергію за формою, величиною і частотою струму або напруги. За допомогою електронних приладів удається перетворювати неелектричну енергію в електричну і навпаки (наприклад, в фотоелементах, терморезисторах). Різноманітні електронні датчики і вимірювальні прилади дозволяють з високою точністю вимірювати, реєструвати і регулювати зміни всіляких неелектричних величин – температури, тиску, пружних деформацій, прозорості і т.д.

Процеси перетворення енергії в приладах електроніки відбуваються з великою швидкістю. Це зумовлене малою інерційністю, характерною для більшості електронних приладів, що дозволяє застосовувати їх у широкому діапазоні частот – від нуля до десятків і сотень гігагерц. При цьому досягається така висока чутливість, яка не може бути отримана в приладах іншого типу.

8.1. Класифікація напівпровідникових приладів

Напівпровідниковими називають прилади, дія яких заснований використанні властивостей напівпровідників. Серед напівпровідникових приладів розрізняють:

– напівпровідникові резистори;

- діоди;
- біполярні і польові транзистори;
- тиристоры;
- фотоелектричні прилади;
- комбіновані напівпровідникові прилади;
- напівпровідникові мікросхеми.

У *напівпровідникових резисторах* застосовується ізотропний напівпровідниковий матеріал; їхні електричні характеристики визначаються електричними властивостями однорідного напівпровідника.

У *напівпровідникових діодах* використовуються напівпровідники з різними типами електропровідності, що утворюють один *p-n*-перехід. Електричні характеристики діода визначаються властивостями цього переходу.

У *біполярних транзисторах* використовуються два *p-n*-переходи. Електричні характеристики біполярних транзисторів визначаються взаємодією цих переходів.

У *польових транзисторах* застосовуються напівпровідники з різними типами електропровідності, що утворюють один *p-n*-перехід. Але на відміну від діодів і біполярних транзисторів електричні характеристики польових транзисторів залежать в основному від взаємодії ізотропного напівпровідникового каналу з *p-n*-переходом.

У *тиристорах* застосовуються напівпровідники з різними типами електропровідності, що утворюють три *p-n*-переходи. Основні електричні характеристики тиристорів визначаються взаємодією цих переходів.

У *напівпровідникових фотоелектричних приладах* використовуються ефекти генерації світла і зміни електричних характеристик напівпровідникових структур під впливом оптичного випромінювання.

Комбіновані напівпровідникові прилади являють собою кілька різних напівпровідникових приладів, об'єднаних в одному корпусі.

Напівпровідникові мікросхеми – мікроелектронні вироби, що виконують визначену функцію перетворення й обробки сигналу, а всі елементи і з'єднання між ними виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідника.

8.1.1. Напівпровідникові резистори

Напівпровідниковим резистором називають напівпровідниковий прилад із двома виводами, у якому використовується залежність електричного опору провідника від напруги, температури, освітленості й інших керуючих параметрів.

У напівпровідникових резисторах застосовується напівпровідник, рівномірно легований домішками. У залежності від типу домішок і конструкції резистора вдається одержати різні залежності від керуючих параметрів (рис. 1).

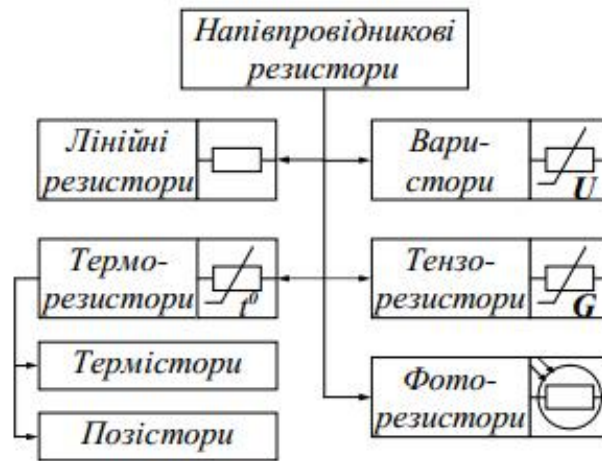


Рис.26 – Умовні позначення типів полі провідникових резисторів

Лінійні резистори і нелінійні резистори (варистори) – мають електричні характеристики, що слабо залежать від таких параметрів, як температура навколишнього середовища, вібрація, вологість, освітленість і т.п.

Лінійний резистор – напівпровідниковий резистор, у якому питомий електричний опір мало залежить від напруженості електричного поля і щільності електричного струму. Його опір залишається практично постійним у широкому діапазоні напруг і струмів. Напівпровідникові лінійні резистори широко застосовують в інтегральних мікросхемах. У лінійних резисторах застосовується слаболегований матеріал типу кремнію чи арсеніду галію.

Варистор – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.

Напівпровідниковим матеріалом для виготовлення варисторів служить карбід кремнію. Порошкоподібний кристалічний карбід кремнію змішують із глиною і з цієї маси пресують заготівлі варисторів у виді стрижнів чи дисків. Після випалу при високій температурі на заготівлю, методом гарячого розпилення, наносять електроди. Для захисту від зовнішніх впливів варистори покривають електроізоляційним лаком.

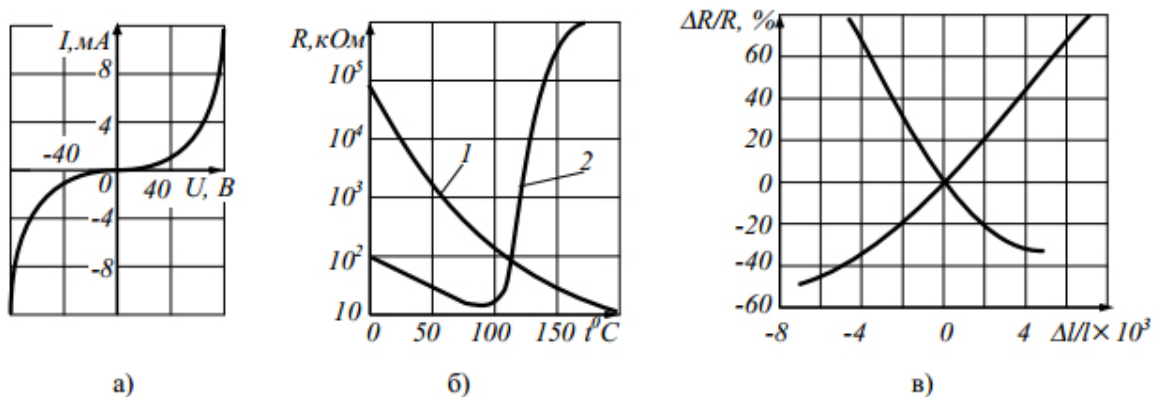


Рис. 27 – Характеристики напівпровідникових резисторів:
 а – вольт-амперна характеристика варистора, б – температурні характеристики термістора (1) та позістора (2); в – деформаційна характеристика тензорезистора

Нелінійність характеристик варисторів обумовлена локальним (місцевим) розігрівом на контактах між численними кристалами карбїду кремнію. Опір контактів при цьому істотно знижується, що приводить до зменшення загального опору варисторів. Вольт-амперна характеристика варистора приведена на рис. 27.

Терморезистор – напівпровідниковий резистор, у якому використовується залежність електричного опору напівпровідника від температури. Розрізняють два типи терморезисторів: термістор – опір, якого з ростом температури падає, і позистор, у якого опір з підвищенням температури зростає.

Температурна характеристика виражає залежність опору терморезистора від температури (рис. 27 крива 1). Матеріалом для виготовлення термісторів служать напівпровідники з електронною електропровідністю, як правило, оксиди металів і суміші оксидів. Конструктивно термістори оформляють у виді бусин, шайб, дисків. У ряді випадків термістори поміщають у скляні балони і підігрівають струмом за допомогою спеціальної обмотки. Такий термістор називають термістором непрямого підігріву.

Термістор не володіє вентиляційною властивістю і має порівняно велику теплову інерцію. Тому в електричних ланцюгах термістори поводять себе як звичайні резистори, опір яких залежить від температури навколишнього середовища і діючого струму, причому до високих частот (100 – 500 МГц) не позначаються паразитна ємність і власна індуктивність термісторів. Цю властивість використовують при вимірі діючих струмів високої частоти.

Матеріалом для виготовлення *позисторів* служить титанат-барієва кераміка з домішкою рідкоземельних елементів. Цей матеріал володіє аномальною температурною залежністю: при підвищенні температури вище точки Кюри його опір зростає на кілька порядків. Конструктивно позистори оформляють аналогічно термісторам. Залежність опору позистора від температури показана нарис. 27 крива 2).

Терморезистори застосовують у системах регулювання температури, теплового захисту, протипожежної сигналізації. Терморезистори можна використовувати при вимірі температури в широкому діапазоні, позистори – в обмежених температурних діапазонах.

Тензорезистор – напівпровідниковий резистор, у якому використовується залежність електричного опору від механічних деформацій. Для виготовлення тензорезисторів найчастіше застосовують кремній з електропровідністю як *p*-типу, так і *n*-типу. Заготівлі такого кремнію ріжуть на дрібні пластинки, шліфують для одержання гладкої поверхні з малою кількістю дефектів. До кінців пластинок приварюють контакти. Важливою характеристикою тензорезистора є його деформаційна характеристика (рис. 2), що представляє собою залежність відносної зміни опору $\Delta R/R$ від відносної деформації $\Delta l/l$, де l – довжина робочого тіла тензорезистора. Основними параметрами тензорезистора є номінальний опір

$R_{ном.} = 100 \div 150 \text{ Ом}$ і коефіцієнт тензочутливості $K = \Delta R/R / \Delta l/l$, значення якого для різних тензорезисторів лежить у межах від -150 до $+150$.

Фоторезистор – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від освітленості. Конструкція і характеристики фото резисторів докладно розглянемо докладніше далі.

8.2. Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковим діодом називається прилад з одним електронно-дірковим переходом і двома виводами, у якому використовуються властивості $p-n$ - переходу, а також інших електричних переходів добре проводити електричний струм в одному напрямку і погано – у протилежному. Ці струми і відповідні їм напруги між виводами діода називаються прямим і зворотним струмами, прямою і зворотною напругами. Усі діоди підрозділяють на два класи: точкові і площинні.

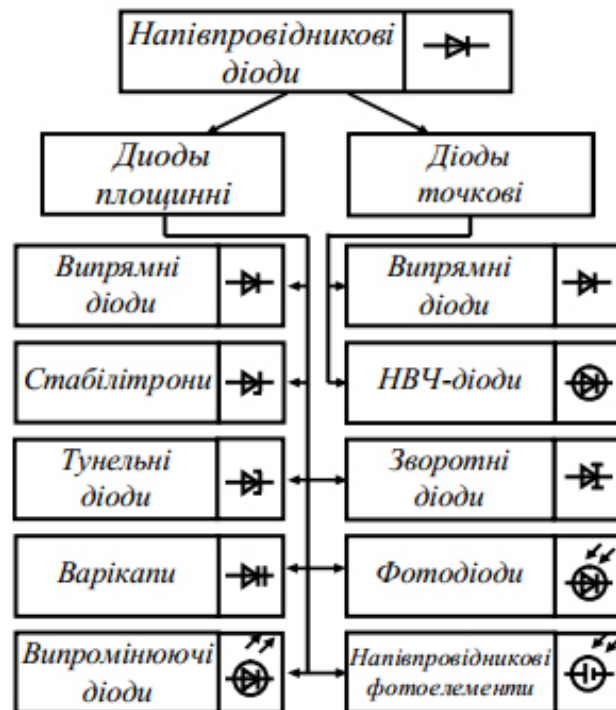


Рис. 28 – Класифікація та умовні позначення типів напівпровідникових діодів

Найбільше застосування отримали германієві і кремнієві напівпровідникові діоди, а також діоди, виконані на основі арсеніду галію.

Випрямний діод – напівпровідниковий діод, призначений для випрямлення змінного струму. Виконуються по сплавній або дифузійній технологіям.

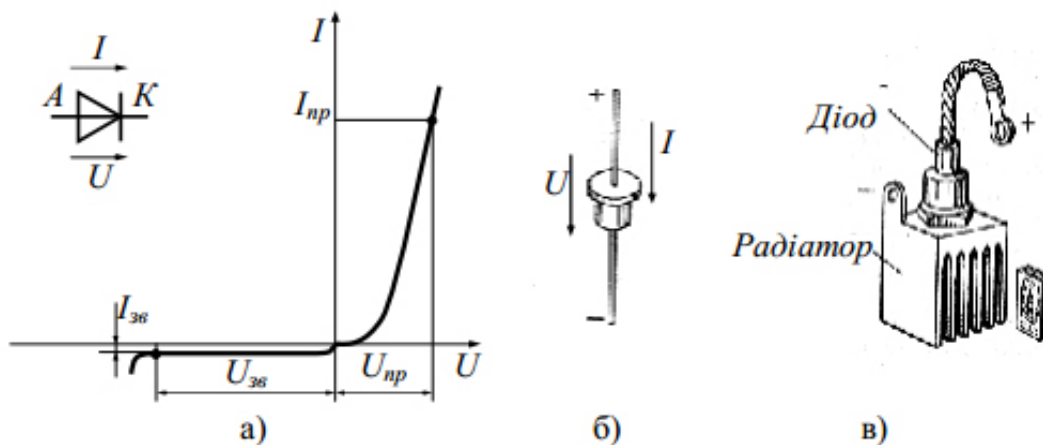


Рис. 28. Випрямний діод: а – вольтамперна характеристика; б, в – загальний вигляд діоду (б – без радіатора, в – з радіатором)

На рис. 27,а, наведені умовне зображення випрямного діода і його типова вольтамперна характеристика. Прямий струм діода спрямований від анодного виводу А до катодного К. Навантажувальну здатність випрямного діода визначають: припустимий прямий струм $I_{\text{пр}}$ і відповідна йому пряма напруга $U_{\text{пр}}$ припустима зворотна напруга $U_{\text{зв}}$ і відповідний йому зворотний струм $I_{\text{зв}}$, припустима потужність розсіювання $P_{\text{роз}}$ і припустима температура навколишнього середовища (до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для германієвих і до $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ для кремнієвих діодів).

За рахунок великої площі p - n -переходу припустима потужність розсіювання випрямних діодів малої потужності з природним охолодженням (рис.27,в) досягає 1 Вт при значеннях прямого струму до 1 А. Такі діоди часто застосовуються в ланцюгах автоматики та в приладобудуванні. У випрямних діодів великої потужності (рис. 27,в) з радіаторами і штучним охолодженням (повітряним чи водяним) припустима потужність розсіювання досягає 10 кВт при значеннях припустимих прямих струмах до 1000 А и зворотній напрузі до 1500 В. Якщо до діода в плинні тривалого часу прикласти високу пряму напругу виникне неприпустимо великий струм, це викликає інтенсивний нагрів напівпровідника і приведе до руйнування приладу. Напівпровідникові діоди допускають 10-кратне перевантаження по струму протягом 0,1 с.

У випадку прикладення до діода великої зворотної напруги може відбутися лавинний пробій переходу, зворотний струм при цьому різко збільшується, що викликає розігрів діода, подальше зростання струму і, як наслідок, пробій і руйнування переходу. Більшість діодів може надійно працювати при зворотних напругах, що не перевищують 0,7–0,8 пробивної напруги. Короткочасне підвищення напруги понад пробивне значення приводить до пробію p - n -переходу і виходу з ладу діода.

За аналогією з радіоламповими діодами (попередниками напівпровідникових діодів), область приладу, з p -провідністю називають

анодом, область, що має *n*-провідність – катодом. Позначається напівпровідниковий діод в електричних схемах – *VD*.

Основними параметрами випрямних діодів є:

- пряма напруга $U_{пр}$;
- прямий струм $I_{пр}$;
- максимально припустимий прямий струм діода $I_{пр.мах}$;
- максимально припустима зворотна напруга діода $U_{зв.мах}$;
- зворотний струм діода $I_{зв}$,
- зворотна напруга $U_{зв}$.

Для одержання більш високої зворотної напруги діоди можна включати послідовно. Для цього придатними є діоди з ідентичними характеристиками. В даний час випускаються так названі діодні стовпи, у яких з'єднані послідовно від 5 до 50 діодів. Зворотна напруга таких стовпів лежить у межах 2–40 кВ. Більш складні з'єднання діодів є в силових діодних зборках. У них для збільшення прямого струму діоди з'єднують паралельно, для збільшення зворотної напруги – послідовно і часто здійснюють з'єднання, що полегшують застосування діодів у конкретних випрямляючих пристроях. Так, випрямляючі мости на кремнієвих діодах спеціально призначені для використання в однофазних мостових випрямлячах.

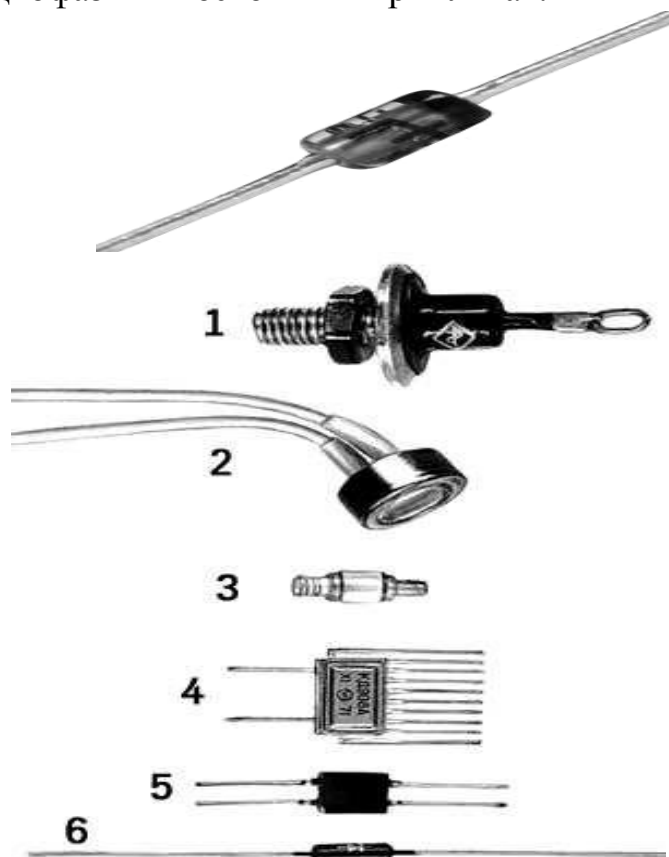


Рис. 29 – Типи напівпровідникових діодів

Групи ідентичних малопотужних діодів часто випускаються у виді діодних матриць і діодних зборок. У діодних матрицях діоди приєднані до одного спільного виводу, що полегшує їхнє використання в логічних пристроях і дешифраторах, у діодних зборках застосовуються паралельне, послідовне, мостове й інше з'єднання.

Напівпровідниковий стабілітрон – напівпровідниковий діод, напруга на якому в області електричного пробую слабо залежить від струму і який служить для стабілізації напруги. ВАХ стабілітрона приведена на рис. 30,а. В області пробую напруга на стабілітроні $U_{ст}$ незначно змінюється при великих змінах $I_{ст}$. Таку характеристику стабілітрона використовують для одержання стабільної напруги, наприклад, у стабілізаторах напруги (рис. 30,б). При зміні напруги на вході $U_{вх} > U_{проб} (R + R_H) / R_H$ напруга між вихідними виводами $U_{вих} \approx U_{проб}$ змінюється незначно.

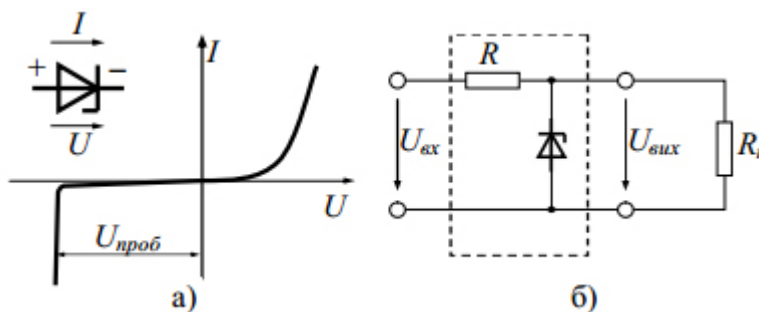


Рис. 30 – ВАХ стабілітрона (а), та простіша схема його ввімкнення

Прямий струм у залежності від напруги змінюється за експоненціальним законом, як у будь-якого діода. Вітка зворотного струму характеризує зворотний режим стабілітрону.

Робочою ділянкою стабілізації є діапазон зміни зворотного струму від $I_{ст.мін}$ до $I_{ст.мах}$.

Зміна струму виникає при нарузі $U_{ст}$, що мало залежить від струму пробую.

У схемі стабілізації стабілітрон включається у зворотному напрямку паралельно навантаженню.

Основними параметрами стабілітрона є:

- напруга стабілізації $U_{ст}$;
- динамічний опір на ділянці стабілізації $R \cong dU_{ст} / dI_{ст}$;
- мінімальний струм стабілізації $I_{ст.мін}$;
- максимальний струм стабілізації $I_{ст.мах}$

Стабілізацію постійної напруги можна також одержати за допомогою діода, ввімкненого в прямому напрямку. Кремнієві діоди, призначені для цієї мети, називають *стабісторами*. Відмінною рисою стабісторів у порівнянні зі стабілітронами менша напруга стабілізації ($\sim 0,7$ В).

Стабілітрони допускають послідовне ввімкнення, при цьому загальна напруга стабілізації дорівнює сумі напруг стабілітронів:

$$U_{ст} = U_{ст1} + U_{ст2} + U_{ст3} + \dots + U_{стn}$$

Паралельне з'єднання стабілітронів неприпустимо, тому що з усіх паралельно з'єднаних стабілітронів струм буде тільки в одному стабілітроні, який має найменшу напругу стабілізації.

Сучасні стабілітрони випускають на напругу стабілізації (1÷1000) В при максимальному струмі 20 А.

Тунельний діод – напівпровідниковий діод на основі виродженого напівпровідника, у якому тунельний ефект приводить до появи на ВАХ при прямій напрузі ділянки з негативною диференціальною електричною провідністю. Тунельні діоди є швидкодіючими напівпровідниковими приладами і застосовуються в генераторах високочастотних коливань і імпульсних перемикачів.

Зворотній діод – діод на основі напівпровідника з критичною концентрацією домішок, у якому електрична провідність при зворотній напрузі внаслідок тунельного ефекту значно більше, ніж при прямій напрузі.

Варикап – напівпровідниковий діод, у якому використовується залежність ємності *p-n* – переходу від зворотної напруги і який призначений для застосування як елемент з електрично керованою ємністю. Їх застосовують у системах дистанційного керування й автоматичного підстроювання частоти.

Фотодіоди, напівпровідникові фотоелементи і випромінюючі діоди. У цих трьох типах діодів використовується ефект взаємодії оптичного випромінювання (видимого, інфрачервоного, ультрафіолетового) з носіями заряду (електронами і дірками) у замикаючому шарі *p-n*-переходу. У фотодіоді в результаті висвітлення *p-n*-переходу підвищується зворотний струм. У напівпровідниковому фотоелементі при висвітленні *p-n* – переходу виникає зворотна напруга.

У випромінюючому діоді в режимі струму в зоні *p-n* – переходу виникає видиме або інфрачервоне випромінювання.

Магнітодіод – напівпровідниковий діод, у якому використовується зміна ВАХ під дією магнітного поля.

Тензодіод – напівпровідниковий діод, у якому використовується зміна ВАХ під впливом механічних деформацій.

Висновки

Найважливішими перевагами напівпровідникових діодів є:

- малі габаритні розміри і маса;
- високий коефіцієнт корисної дії (понад 99 %);
- відсутність джерела електронів, яке треба розжарювати;
- практично необмежений термін служби (при виконанні відповідних правил експлуатації);
- висока надійність.

ЛЕКЦІЯ 9. БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

План

1. Біполярні транзистори.
2. Режим роботи.

Література

4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
5. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
6. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

9.1. Біполярні транзистори

Біполярний транзистор – напівпровідниковий прилад із двома взаємодіючими електричними переходами, що випрямляють, і трьома (чи більше) виводами, підсилювальні властивості якого обумовлені явищами інжекції та екстракції неосновних носіїв заряду. Роль електричного переходу, що випрямляє, (як і в діоді) виконує *p-n*-перехід. Виводи біполярного транзистора позначаються буквами К – колектор, Б – база, Е – емітер (рис.31,а).

У біполярному транзисторі використовуються одночасно два типи носіїв зарядів – електрони і дірки (звідси і назва – біполярний). Переходи транзистора утворені трьома областями з типами провідності, що чергуються. У залежності від порядку чергування цих областей розрізняють транзистори *p-n-p*- і *n-p-n*-типу (рис.31,б і в).

Транзистори поділяються на:

- низькочастотні $f < 3$ МГц; середньочастотні – $f < 30$ МГц;
- високочастотні – $f < 300$ МГц;
- надвисокочастотні – $f > 300$ МГц.

По потужності:

- малої потужності – до 0.3 Вт;
- середньої потужності – до 1.5 Вт;
- великої потужності більш 1.5 Вт.

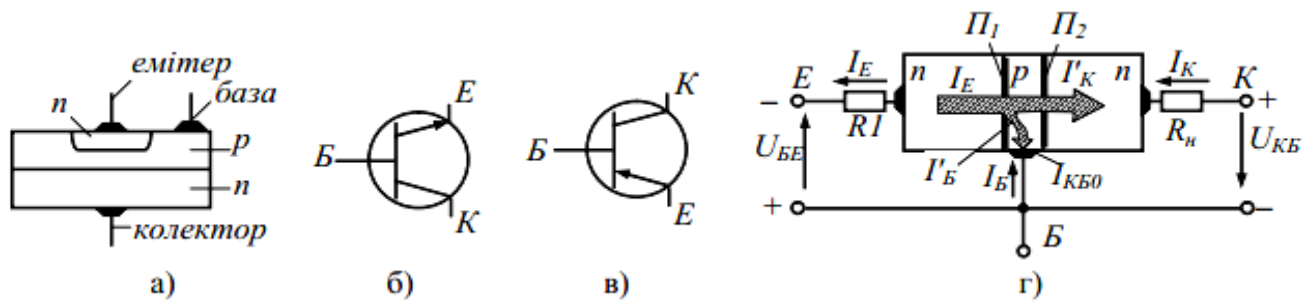


Рис.31. Біполярний транзистор: а – позначення виводів, б, в – умовне позначення транзисторів $p-n-p$ - та $n-p-n$ -типу; г – процеси в транзисторі

Робота біполярного транзистора заснована на взаємодії двох $p-n$ -переходів. Це забезпечується тим, що товщина середньої області транзистора (бази) вибирається значно менше довжини вільного пробігу (дифузійної довжини) носіїв заряду в цій області.

Принцип роботи біполярного транзистора розглянемо на прикладі транзистора $n-p-n$ -типу, для якого концентрація основних носіїв у n -області істотно вище, ніж у p -області. (Транзистор $p-n-p$ -типу працює аналогічно, але на нього подається напруга протилежної полярності). Для даної структури (рис.1,г) ліву n -область, що у нашому прикладі буде інжектувати електрони в сусідню p -область, називають *емітером*, праву n -область, що надалі повинна екстрактивувати електрони, які знаходяться в сусідній p -області, називають *колектором*, а середню область – базою. Відповідно $p-n$ -перехід (Π_1), що примикає до емітера, називають *емітерним*, а $p-n$ -перехід (Π_2), що примикає до колектора – *колекторним*. Металеві виводи, що приварюються чи припаюються до напівпровідникових областей, називають відповідно емітерним, колекторним і базовим виводами.

Прикладемо до емітерного переходу пряму (U_{BE}), а до колекторного переходу – зворотну (U_{BK}) напруги. У результаті через емітерний перехід Π_1 в область бази будуть інжектувати електрони (інжекцією дірок з області бази в емітерну область зневажаємо), утворюючи емітерний струм транзистора I_E . Потік електронів, що забезпечує струм I_E через перехід Π_1 , показаний на рис.1,г широкою заштрихованою стрілкою.

Частина інжектованих в область бази електронів рекомбінують з основними для цієї області носіями заряду – дірками, утворюючи струм бази I'_B . Інша частина інжектованих електронів, що досягає колекторного переходу (Π_2), за допомогою електричного поля, створеного напругою I_{KB} , піддається екстракції (екстракується) у другу n -область транзистора – колектор, утворюючи через перехід Π_2 , колекторний струм I'_K .

Зменшення потоку електронів через колекторний перехід (а, отже, і колекторного струму) у порівнянні з потоком дірок через емітерний перехід можна врахувати наступним співвідношенням:

$$I'_K = \alpha I_E \quad (13.1)$$

де $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ – коефіцієнт передачі струму емітера.

Через замкнений колекторний перехід буде створюватися зворотний струм $I_{КБ0}$, утворений потоком з n - у p -область неосновних, для колекторної області, носіїв заряду – дірок, що разом зі струмом I'_K утворить вихідний струм транзистора I_K :

$$I_K = I'_K + I_{КБ0} \quad (13.2)$$

і струм у базовому виводу I_B :

$$I_B = I'_B - I_{КБ0}$$

З врахуванням (13.1) (1.1) рівність (13.2) прийме вид

$$I_K = \alpha I_E + I_{КБ0} \quad (13.3)$$

З огляду на, що $I_E \gg I_{КБ0}$ на практиці можна використовувати співвідношення:

$$I_K \approx \alpha I_E \quad (13.4)$$

Різниця між емітерним і колекторним струмами відповідно до першого закону Кирхгофа (і як видно з рис.31,г) є базовим струмом

$$I_B = I_E - I_K \quad (13.5)$$

Замінивши I_E у (13.5) його значенням (13.4), одержимо:

$$I_B = I_K / \alpha - I_K \quad \text{або} \quad I_B = [(1 - \alpha) / \alpha] I_K$$

Звідки $I_K / I_B = (1 - \alpha) / \alpha = \beta$ або

$$I_K = \beta I_B \quad (13.6)$$

де β – динамічний коефіцієнт передачі струму бази. $\beta \gg 1$.

З формул (13.4) і (13.6) випливає, що *транзистор являє собою керований елемент, оскільки значення його колекторного струму I_K залежить від значень струмів емітера I_E і бази I_B . При цьому значення струму I_K істотно залежить від ефективності взаємодії двох p - n -переходів. Підвищенню ефективності взаємодії двох p - n -переходів сприяє значно менша концентрація основних носіїв заряду в області бази в порівнянні з концентрацією їх у емітерній області.*

Основні властивості транзистора визначаються процесами в базі. Якщо концентрація домішок по всьому обсязі базового шару однакова, тобто

база однорідна, то рух носіїв заряду в ній (при відсутності прикладеної до транзистора зовнішньої напруги) носить чисто дифузійний характер. Якщо ж база неоднорідна, то за рахунок внутрішнього електричного поля, що утворилося в ній, рух носіїв буде комбінованим: дифузія сполучається з дрейфом носіїв заряду в цьому полі. *Транзистори з однорідною базою називаються дифузійними, з неоднорідної – дрейфовими.* Останні володіють кращими властивостями й одержали найбільше поширення.

Опір зворотно зміщеного колекторного переходу, при подачі на нього зворотної напруги, дуже великий (близько 1 МОм). Тому в ланцюг колектора можна включати навантажувальні резистори з дуже великими опорами, не змінюючи значення колекторного струму. Відповідно в ланцюзі навантаження буде виділятися значна потужність. Опір прямо зміщеного емітерного переходу, навпроти, дуже малий і складає десятки Ом . Тому при майже однакових значеннях емітерного і колекторного струмів потужність, споживана в ланцюзі емітера, виявляється істотно менше потужності, що виділяється в ланцюзі навантаження. Це вказує на те, що транзистор є напівпровідниковим пристроєм, що підсилює потужність.

Малі значення вхідної напруги і великі значення вихідної напруги вказують на те, що цей керований нелінійний елемент може застосовуватися для посилення напруги.

1. Режим роботи. Кожен перехід біполярного транзистора можна включити або в прямому, або в зворотному напрямку. У залежності від цього розрізняють наступні чотири режими роботи транзистора.

Нормальний чи активний режим – на емітерний перехід подано *пряму* напругу, а на колекторний – *зворотну*. Саме цей режим роботи транзистора відповідає максимальному значенню коефіцієнта передачі струму емітера. До того ж він забезпечує мінімальні перекручування посилюваного сигналу.

Інверсний режим – до колекторного переходу підведена пряма напруга, до емітерного – зворотна. Інверсний режим роботи приводить до значного зменшення коефіцієнта передачі струму емітера в порівнянні з роботою транзистора в нормальному режимі і тому на практиці застосовується вкрай рідко.

Подвійної інжекції чи насичення – обидва переходи (емітерний і колекторний) знаходяться під прямою напругою. Вихідний струм у цьому випадку не залежить від вхідного і визначається тільки параметрами навантаження. Через малу напругу між виводами колектора і емітера режим насичення використовується для замикання ланцюгів передачі сигналу.

Режим відсічення – до обох переходів підведені зворотні напруги. Так як вихідний струм транзистора в режимі відсічення практично дорівнює нулю, цей режим використовується для розмикання ланцюгів передачі сигналів.

Основним режимом роботи біполярного транзистора в аналогових електронних пристроях є нормальний режим. Режими насичення і відсічення

застосовуються спільно для здійснення комутації як силових, так і інформаційних ланцюгів.

ЛЕКЦІЯ 10. БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ (2)

План

1. Схеми ввімкнення біполярного транзистора.

Література

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
3. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

10.1. Схеми ввімкнення біполярного транзистора

Біполярний транзистор, як підсилювальний пристрій, може бути представлений у виді чотириполіусника. У залежності від того, який із трьох виводів транзистора є спільним для входу і виходу чотириполіусника, розрізняють схему ввімкнення транзистора з спільною базою (*СБ*), спільним емітером (*СЕ*) і спільним колектором (*СК*).

Схеми, приведені на рис. 32,а і б, являють собою схему ввімкнення транзистора з *СЕ* і використовуються найбільше часто.

Полярність зовнішнього джерела, що підключається, залежить від типу транзистора (для *p-n-p*-типу – рис. , а; для *n-p-n*-типу – рис. 32,б).

У випадку ввімкнення транзистора в схему з *СЕ* вхідним струмом є струм бази, а вихідним – струм колектора. У схемі з *СБ* вхідний струм (як і в схемі з *СЕ*) є струм колектора, (вихідним – струм емітера (рис. 32,г).

Особливе місце з усіх схем ввімкнення транзистора займає схема з *СК*, де вхідним струмом є струм бази, а вихідним – струм емітера. За аналогією з попередніми схемами ввімкнення *n-p-n*-транзистора схема з *СК* має вид (рис. 32,в). Однак таке підключення джерел E_1 і E_2 до виводів транзистора створює інверсний режим його роботи, що приводить, як уже відзначалося раніше, до значного зменшення значення коефіцієнта передачі струму емітера. Тому на практиці застосовують схему з *СК* (рис. 32,г), яка забезпечує нормальний режим роботи *n-p-n*-транзистора і збереження струму бази – вхідним, а струму емітера – вихідним. Так як навантаження в схемі з

СК ввімкнено в емітерний ланцюг, ця схема частіше називається схемою емітерного повторювача.

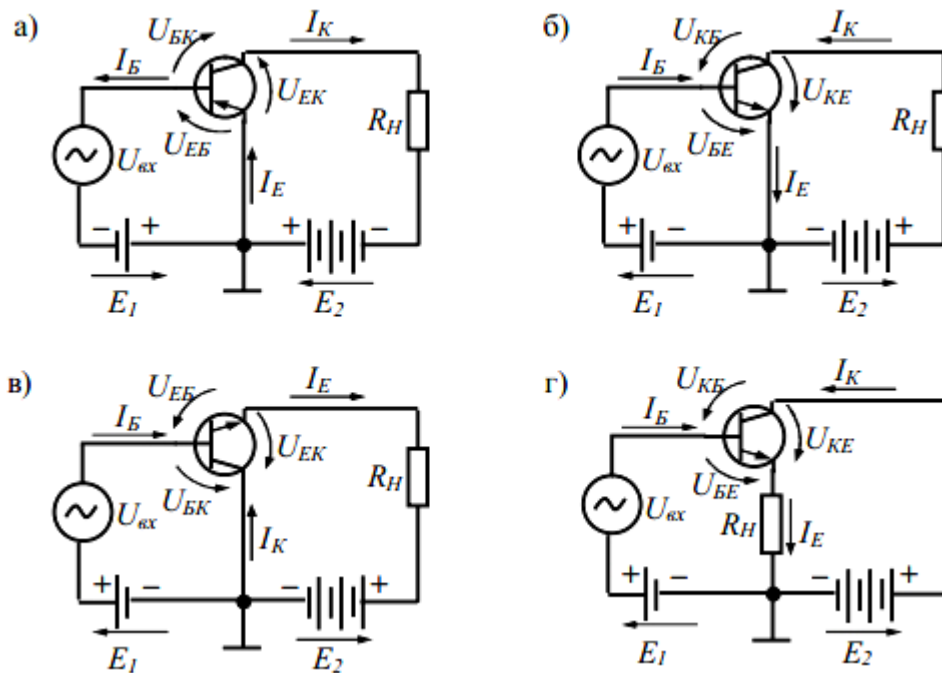


Рис. 32 – Схеми ввімкнення транзисторів:

а, б – по схемі з спільним емітером (СЕ): а – $p-n-p$ -типу; б – $n-p-n$ -типу;
в, г – по схемі з спільним колектором (СК) – $n-p-n$ -типу

Характеристики та параметри біполярних транзисторів. Транзистор за схемою з ОЕ описується сімействами вихідних і вхідних характеристик: залежність струму колектора від напруги між колектором і емітером при фіксованих значеннях струму бази $I_B = \text{const} - I_K = f(U_{KE})$ називають сімейством вихідних (колекторних) характеристик транзистора (рис., 33а); залежність між струмом і напругою у вхідному ланцюзі транзистора називають вхідною чи базовою характеристикою $I_B = f(U_{BE})$ (рис. 33,б).

Залежність $I_K = f(U_{KE})$ як видно з рис. 33,а, є нелінійною і може бути розбита на ряд ділянок. На більшій частині характеристик при $U_{KE} > U_{KEH}$ струм колектора майже не залежить від напруги U_{KE} (положительна ділянка характеристик). На цій ділянці транзистор працює в режимі, коли на емітерному переході діє пряма напруга, а на колекторному – зворотна. На позитивній ділянці вихідних характеристик транзистор може характеризуватися як прилад із властивостями керованого джерела струму, тобто джерела струму I_K значення якого можна змінювати шляхом зміни струму I_B .

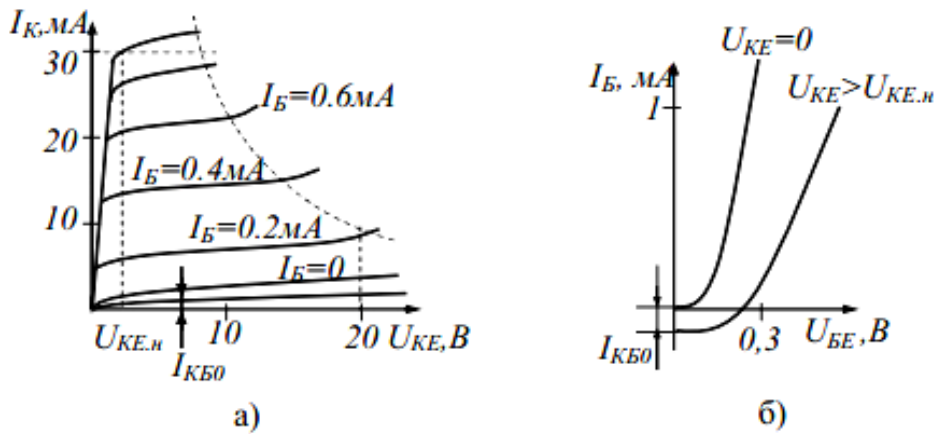


Рис. 33 – Вихідна (а) та вхідна (б) вольт-амперні характеристики транзистора

Для зміни вхідного струму бази, наприклад, для його збільшення, збільшують напругу джерела E_B , при цьому ростуть пряма напруга на емітерному переході й інжекція носіїв з емітера в базу і струм емітера I_E збільшується.

Невеликий нахил положистої ділянки вихідної характеристики обумовлений тим, що при збільшенні напруги U_{KE} збільшується напруга на колекторному переході.

Перейдемо до розгляду крутої ділянки вихідних характеристик транзистора. При зменшенні U_{KE} зменшується напруга на колекторному переході U_{KB} , і при $U_{KE} = U_{KEH} = U_{BE}$ напруга $U_{KB} = U_{KE} - U_{BE}$ змінює свій знак. При подальшому зменшенні U_{KE} до нуля до колекторного переходу прикладена пряма напруга. Назустріч потоку дірок з емітера в колектор починається протилежний рух основних носіїв (дірок) з колектора в базу. У результаті колекторний струм при такому зменшенні різко падає. Крута ділянка вихідних характеристик транзистора характеризується втратою транзистором властивостей підсилювального елемента, ця частина характеристик використовується в імпульсній техніці при реалізації ключового режиму транзистора. Напруга, що відтинає круту ділянку на вихідних характеристиках транзистора, $U_{KEH} = 0,2 \dots 1$ В.

Різке збільшення струму I_K у транзисторах при значних напругах U_{KE} викликано, як і в діодах, лавинним розмноженням носіїв у колекторному переході, тобто явищем електричного пробоя цього переходу. Для запобігання необоротного пробоя транзистора обмежуються напруга на колекторі і потужність, що розсіюється на колекторному переході (на рис. 3,а, показані обмеження робочої ділянки характеристик). Граничні значення струму колектора, при перевищенні яких зменшується коефіцієнт β , приводяться в довідниках.

Звернемося до розгляду вхідних характеристик транзистора – залежностей струму бази від напруги між базою і емітером: $I_B = I_B = f(U_{BE})$ при постійній напрузі U_{KE} . При $U_{KE} = 0$ обидва переходи в транзисторі

працюють при прямій напрузі, струми колектора і емітера сумуються в базі. Вхідна характеристика в цьому режимі являє собою ВАХ двох $p-n$ -переходів, ввімкнених паралельно (рис. 33,б).

При $U_{KE} > U_{KEH}$ на колекторному переході з'являється зворотна напруга, на емітерному – зберігається пряма. Цей режим докладно розглянутий вище.

Струм бази в цьому режимі, обумовлений процесом рекомбінації неосновних носіїв у базі, дорівнює різниці емітерного і колекторного струмів, він описується формулою (13.5). Вхідна характеристика транзистора в цьому режимі будується по прямій візці ВАХ емітерного переходу, але значення струму зменшуються на коефіцієнт $(1 - \alpha)$, який показує, що струм бази – це лише рекомбінаційна складова емітерного струму.

Струми в транзисторі сильно залежать від температури навколишнього середовища, що є загальним недоліком напівпровідникових приладів. При нагріванні на $20 - 30^\circ\text{C}$ I_K може змінюватися на десятки відсотків.

Роботу біполярного транзистора, ввімкненого за схемою з CE можна охарактеризувати в режимі малого сигналу системою лінійних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} U_{BE} &= h_{11}i_B + h_{12}u_{KE} \\ i_K &= h_{21}i_B + h_{22}u_{KE} \end{aligned} \right\} \quad (13.7)$$

$$\begin{aligned} \text{де } h_{11} &= \Delta U_{BE} / \Delta I_B | U_{KE} = \text{const}; & h_{12} &= \Delta U_{BE} / \Delta U_{KE} | I_B = \text{const}; \\ h_{21} &= \Delta I_K / \Delta I_B | U_{KE} = \text{const}; & h_{22} &= \Delta I_K / \Delta U_{KE} | I_B = \text{const}. \end{aligned} \quad (13.8)$$

– h – параметри біполярного транзистора, які можна розрахувати по вольтамперним характеристикам.

ЛЕКЦІЯ 11. ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

План

Вступ.

1. Польовий МДН-транзистор.

2. МДН-транзистори з технологічно вбудованим каналом мають канал n - чи p -типу.

Висновки.

Література

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.

2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
3. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

Вступ

Біполярні транзистори, знайшли надзвичайно широке застосування в різних областях електронної техніки. Однак у ряді випадків їхнє використання утруднене, тому що ці прилади керуються струмом, тобто споживають помітну потужність від вхідного ланцюга.

1. Польові транзистори

Польовий транзистор – напівпровідниковий прилад, підсилювальні властивості якого, обумовлені потоком основних носіїв, що протікає через провідний канал, і керується електричним полем.

Польовий транзистор, на відміну від біполярного, іноді називають уніполярним, тому що його робота заснована на використанні тільки основних носіїв заряду – або електронів, або дірок. Тому в польових транзисторах відсутні процеси зміни (нагромадження і розсасування) об'ємного заряду неосновних носіїв, що здійснює помітний вплив на швидкодію біполярних транзисторів. Основним способом руху носіїв заряду, що утворюють струм польового транзистора, є їхній дрейф у електричному полі. Провідний шар, у якому створюється робочий струм польового транзистора, називають каналом.

Польовий транзистор – напівпровідниковий підсилювальний прилад, яким керує не струм (як біполярним транзистором), а напруга (електричне поле, звідси і назва – польовий), яке здійснює зміну площі поперечного перерізу провідного каналу, в результаті чого змінюється вихідний струм транзистора. Керування електричним полем припускає відсутність статичного вхідного струму, що дозволяє зменшити потужність, необхідну для керування транзистором. Струмopровідні канали можуть бути приповерхніми (транзистори з ізольованим затвором) і об'ємними (транзистори з керуючим *p-n*-переходом). Приповерхній канал являє собою або збагачений шар, що утворюється за рахунок донорних домішок у напівпровіднику, або інверсний шар, що виникає під дією зовнішнього поля.

*Польовий транзистори з керуючим *p-n*-переходом.* Розглянемо принцип роботи польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом (рис. 34.).

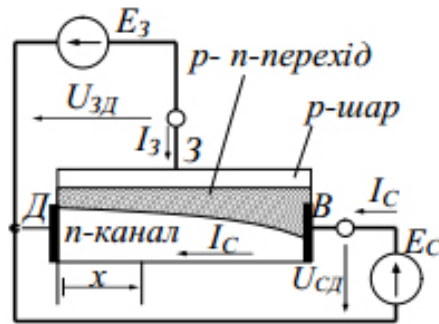


Рис.34 – Полевой транзистор з керуючим $p-n$ переходом

Між двома електродами, які називаються джерелом D и стоком C , розташований n -канал з напівпровідника n -типу. Якщо між джерелом і стоком ввімкнене джерело з ЕРС E_c , позитивним полюсом до стоку, то в n -каналі є струм провідності, значення якого залежить від опору каналу. У свою чергу опір n -каналу залежить від його ширини, яку у польових транзисторах можна змінювати. Для цього між третім електродом, що називається затвором Z , і джерелом ввімкнене джерело ЕРС E_z негативним полюсом до затвора, так що p -перехід, який знаходиться між n -каналом і напівпровідником p -типу (він знаходиться біля затвора), ввімкнений у зворотному напрямку. Ширина збідненого рухливими носіями $p-n$ -переходу впливає на ширину n -каналу і тим самим на його провідність. Замість n -каналу може бути p -канал з напівпровідника p -типу, а затвор – з напівпровідника n -типу.

Напруга $p-n$ -переходу уздовж каналу непостійна

$$U(x) = -E_z - R_K(x)I_B$$

і має негативне значення, тобто перехід на всьому протязі ввімкнений у зворотному напрямку. Найбільшого абсолютного значення напруга досягає в стоку, де перекриття каналу буде максимальним (показано заштрихованою областю на рис.34).

Роботу польового транзистора з керуючим $p-n$ - переходом визначають статичні стокові $I_C = (f U_{C1})$ при $U_{зд} = const$ (рис. 35,а) і стоко-затворні $I_C = (f U_{зд})$ при $U_{сд} = const$ (рис. 35,б) характеристики. Надмірне збільшення напруги $U_{вд}$ викликає лавинний пробій між затвором і стоком.

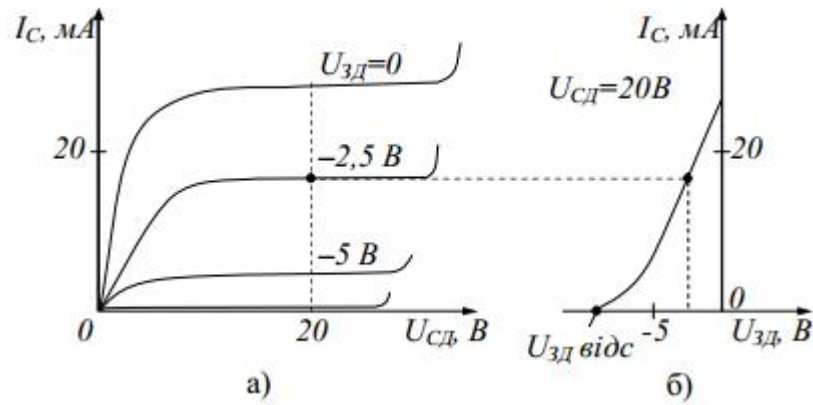


Рис. 35 – Вольт-амперні характеристики польових транзисторів:
 а – статичні стокові та б – стоково-затворна

При напрузі $U_{зд}$ менше напруги відсічення $U_{зд} відс$ канал закритий ($I_C = -I_3$). Зміна полярності U_{CD} чи напруг порушує роботу затвора.

У розглянутому випадку (рис. 2) польовий транзистор ввімкнений за схемою з спільним джерелом (СД). Можливе ввімкнення польового транзистора також за схемою з спільним стоком (ЗС) і спільним затвором (ЗЗ). Однак два останні різновиди схем ввімкнення застосовуються рідко і не будуть розглядатися.

Опишемо роботу в режимі малого сигналу польового транзистор ввімкненого за схемою СД аналогічно (13.7) системою лінійних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} i_3 &= y_{11}u_{зд} + y_{12}u_{CD} \\ i_B &= y_{21}u_{зд} + y_{22}u_{CD} \end{aligned} \right\} \quad (13.7)$$

де $y_{11} = \Delta I_3 / \Delta U_{зд} | U_{CD} = const$; $y_{12} = \Delta I_3 / \Delta U_{CD} | U_{зд} = const$;

$$(13.10)$$

$y_{21} = \Delta I_C / u_{зд} | U_{CD} = const$; $y_{22} = \Delta I_C / \Delta U_{CD} | U_{зд} = const$.

– параметри польового транзистора. Вони визначаються або з досліду або по статичних характеристиках (рис. 2) і мають типові значення:

$$\begin{aligned} y_{11} &= 10^{-7} \div 10^{-9} \text{ см}; & y_{12} &= 10^{-9} \div 10^{-11} \text{ см}; \\ y_{21} &= 10^{-3} \div 10^{-4} \text{ см}; & y_{22} &= 10^{-5} \div 10^{-6} \text{ см}. \end{aligned}$$

11.2. Польовий МДН-транзистор

Польові МДН-транзистори відрізняються від польових транзисторів з керуючим p -переходом тим, що в них електродзатвора ізольований від каналу шаром діелектрика. В якості діелектрика звичайно використовується

окисел кремнію. Тому польові транзистори з такою структурою часто називають МДН- або МОН-транзистором (металоокис напівпровідник).

Розрізняють МДН-транзистори з індукованим каналом і з вбудованим каналом.

МДН-транзистор з індукованим каналом *p*-типу являє собою пластину кремнію *n*-типу (її називають підкладкою (*П*)), у якій створюються дві області *p*-типу (рис. 3).

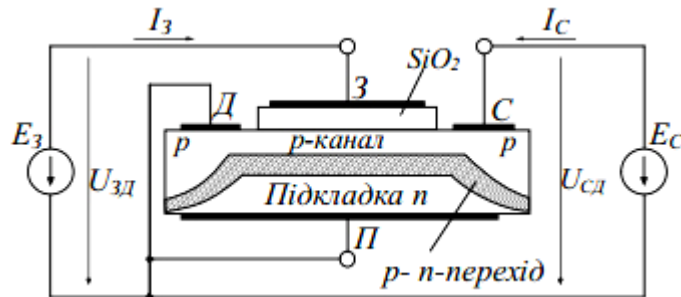


Рис. 36 – МДН-транзистор з індукованим каналом *p*-типу

Одна з цих областей використовується як джерело *Д*, інша – як стік *С*. Електрод затвора *З* ізолюваний від підкладки тонким шаром діелектрика SiO_2 .

Розглянемо механізм роботи індукованого каналу, поклавши, що електроди підкладки *П* і джерела з'єднані між собою.

Припустимо спочатку, що ланцюг стоку розімкнутий.

При напрузі $U_{зд} = 0$, тобто короткому замиканні між виводами затвора і джерела, у прикордонному шарі підкладки з діелектриком, унаслідок контактних явищ утвориться збагачений шар (рис. 32,а). Однак при цьому струмопровідний каналу між стоком і джерелом немає. Це порозумівається тим, що між напівпровідником підкладки *n*-типу і напівпровідниками областей стоку і джерела *p*-типу утворюються два *p-n* переходи, ввімкнених назустріч один одному.

При збільшенні негативного значення напруги $U_{зд} < 0$ спочатку замість збагаченого шару утвориться збіднений шар (рис. 32,в), а потім при напрузі менше граничної $U_{зд}$ пор – інверсний шар (рис. 32,г), тобто індукований канал *p*-типу між стоком і джерелом. Якщо тепер у ланцюг стоку включити джерело ЕРС E_c негативним полюсом до стоку, то в *p*-каналі з'явиться струм.

При цьому в силу нерівності

$$U_{зс} = -E_з + E_c > U_{зд} = -E_з < 0$$

ширина індукованого каналу зменшується по напрямку від джерела до стоку, де її можна регулювати аж до повного перекриття.

Підключення джерела ЕРС E_C позитивним полюсом до стоку неприпустимо. У цьому випадку

$$U_{зс} = -E_з - E_C < U_{зд} = -E_з < 0$$

і керування індукованим каналом неможливо.

У МДН-транзисторах з індукованим каналом n -типу використовується підкладка з напівпровідника p -типу, у якій створюються дві області напівпровідника n -типу для стоку і джерела. Унаслідок контактних явищ на границі розділу діелектрика і підкладки в прикордонному шарі останньої індукується інверсний шар (рис. 32,б), тобто канал n -типу. Цей канал з'єднує між собою області стоку і джерела при відсутності напруги $U_{зд} = 0$. При збільшенні напруги $U_{зд} > 0$ індукований канал збагачується електронами, при зменшенні напруги $U_{зд} < 0$ – збіднюється. Інші процеси в індукованих каналах n - і p -типів аналогічні.

3.3. МДН-транзистори з технологічно вбудованим каналом мають канал n - чи p -типу

Вбудований у процесі технологічного виготовлення транзистора канал самоізолюється від підкладки збідненим шаром p - n -переходу. Основна особливість МДН-транзисторів з вбудованим каналом полягає в можливості їхньої роботи в режимі об'єднання і збагачення вбудованого каналу подібно розглянутій вище роботі МДН-транзистора з індукованим каналом n -типу.

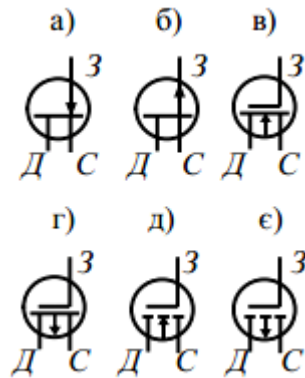


Рис. 37 – Умовні позначення польових транзисторів:

- а – польовий транзистор з керуючим p - n -переходом та n -каналом;
- б – польовий транзистор з керуючим p - n -переходом та p -каналом;
- в – МДН-транзистор з вбудованим n -каналом;
- г – МДН-транзистор з вбудованим p -каналом;
- д – МДН-транзистор з індукованим n -каналом;
- є – МДН-транзистор з індукованим p -каналом.

У всіх типів МДН-транзисторів електрод підкладки або з'єднується з електродом джерела, або служить як другий затвор.

Умовні позначки польових транзисторів з керуючим *p-n*-переходом, МДН-транзисторів з індукованим каналом і МДН-транзисторів з вбудованим каналом приведені на рис. 37.

Висновки

Основні достоїнства польових транзисторів – великий опір вхідного ланцюга (1–10 МОм) і технологічність при виробництві інтегральних мікросхем з великою щільністю розміщення елементів. Основний недолік – відносно невисока швидкодія.

ЛЕКЦІЯ 12. ТИРИСТОРИ

План

Вступ.

1. Параметри і різновиди тиристорів.
2. Випромінюючий діод.
3. Фотоелектричні прилади.
4. Поняття про оптоелектронні прилади.
5. Фотоелектричні прилади.
6. Оптоелектронні прилади.

Висновки.

Література

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
3. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

Вступ

Напівпровідниковим матеріалом для виготовлення тиристорів слугує кремній.

12.1. Тиристиори

Тиристорами називають керовані напівпровідникові прилади на основі багатощарових (чотири або більше) *p-n*-структур, які здатні під дією сигналу

керування переходити з закритого (непровідного) стану у відкритий (провідний).

Напівпровідниковим матеріалом для виготовлення тиристорів слугує кремній. Класифікація та умовні позначення тиристорів наведені на рис. 38.

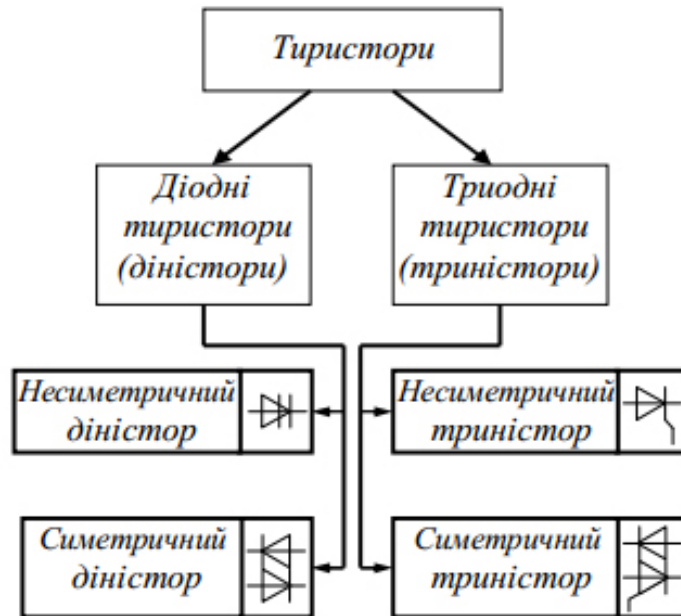


Рис. 38 – Класифікація та умовні позначення тиристорів

Найбільш розповсюджений різновид тиристора заснований на чотирьохшаровій $p-n-p-n$ структурі (рис. 39,а) ВАХ якої приведена на рис. 39,б.

Триністор являє собою чотирьохшарову (рис. 39,г) напівпровідникову структуру, в якій одна з базових областей зроблена керуючою. Базовий вивід дає можливість керувати струмом прилеглого емітера. Для цього на керуючий електрод (KE) необхідно подати напругу такої полярності, яка забезпечить відмикання відповідного емітерного переходу. У цьому випадку процеси відмикання і запирання тиристора, тобто керування його струмом I_H здійснюються за рахунок зміни напруги на керуючому електроді, що є вхідним електродом ввімкненого в електричний ланцюг триністора.

Зі зростанням U_K , а отже, і I_K зменшується напруга вмикання триністора, і при досить великому значенні I_K від прямої вітки ВАХ триністора (рис. 39,б) аналогічний прямої вітки ВАХ діода.

Якщо включити тиристор в електричний ланцюг, то при нульовому сигналі на керуючому електроді струм у ланцюзі буде відсутній. Це пов'язано з тим, що при прямому закритому стані (ділянка I на характеристиці) опір тиристора дуже великий. Якщо тепер на керуючий електрод подати відмикаючий імпульс позитивної полярності, то тиристор включається і через навантаження R_H починає протікати струм. Через мале спадання напруги на ввімкненому тиристорі

$$I_a = \frac{E_a}{R_H}$$

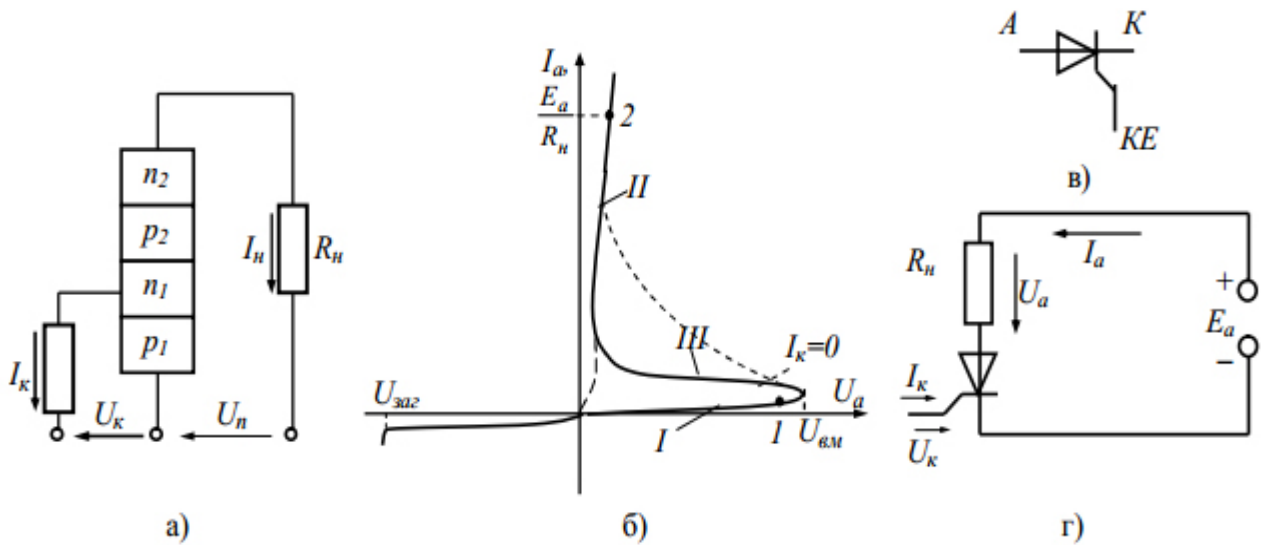


Рис. 39 – Тиристор: а – структура; б – ВАХ; в – схема вмикання; г – умовне позначення (точка 2 на ділянці II характеристики) анодний струм після ввімкнення визначається співвідношенням

Ввімкнення тиристора може відбутися і без сигналу керування, якщо збільшити ЕРС джерела живлення E_a до значення, більшого за напругу. У цьому випадку робоча точка з ділянки I ВАХ переходить на ділянку II минаючи ділянку III (по пунктирній лінії). На практиці таке ввімкнення «по аноду» для більшості типів тиристорів небажано через можливе ушкодження приладу.

Найважливішою особливістю тиристора є те, що після його ввімкнення відкритий стан зберігається поза залежністю від наявності сигналу на керуючому електроді. Виключити тиристор можна тільки в результаті зниження анодної напруги до нуля чи від'ємного значення або при перериванні анодного струму.

Керуючий ланцюг такого приладу виконує тільки одну операцію – ввімкнення тиристора. Такий тип тиристорів є найбільш розповсюдженим, ці тиристори одержали найменування одноопераційних.

12.2. Параметри і різновиди тиристорів

Система параметрів тиристора дозволяє вибирати прилади при проектуванні різних пристроїв. До числа параметрів тиристора відносяться:

– напруга вмикання і напруга загину (пробою) на зворотній вітці ВАХ. Якщо амплітуда напруги живлення будь-якої полярності не перевищує названих напруг, то при $I_k = 0$ тиристор буде завжди замкнений. Для надійного виконання цієї умови пряма або зворотна напруга на тиристорі не

повинна перевищувати повторювану імпульсну напругу, що складає приблизно 0,7 найменшого з напруг і приводиться в довідниках. Для різних типів тиристорів вона складає від 100 до 4000 В.

– *максимально припустимий середній прямий струм, імпульсна пряма напруга, максимальний зворотний струм*. Вони мають той саме зміст, що і для діодів. У сучасних потужних тиристорах припустимий середній прямий струм досягає 1000 – 5000 А.

При зменшенні анодного струму до значення струму утримання тиристор може мимовільно перейти в замкнений стан. Струм утримання, що приводиться в довіднику, визначається при $I_K=0$.

Керуючий струм відмикання $I_{K\text{відм.}}$ і керуюча напруга відмикання $U_{K\text{відм.}}$.

Час вимикання – часовий інтервал, після якого при припиненні протікання анодного струму до приладу можна прикласти пряму напругу і при цьому не відбудеться його повторного вмикання. Час вимикання в низькочастотних тиристорах складає 100 – 500 мкс, у швидкодіючих – 10 – 100 мкс.

Головна область застосування одноопераційних тиристорів – енергетична електроніка, в області високих потужностей тиристор є основним силовим керованим приладом. Малопотужні тиристиори використовуються в імпульсних схемах інформаційної електроніки.

Промисловість випускає ряд різновидів тиристорів:

1. *Діністор* – це тиристор без керуючого електрода (рис. 38). Він аналогічний звичайному тиристорі, у якого немає керуючого електроду. Для ввімкнення діністора до нього необхідно прикласти напруга $U_a > U_{xx}$. При поданні зворотної напруги діністор завжди замкнений.

2. *Симистор* (симетричний діністор або тринистор) – багатошаровий перемикаючий прилад із симетричної ВАХ для прямої і зворотної напруг. Симистор може комутувати струм будь-якого напрямку і замінює собою ланцюг із двох звичайних тиристорів, ввімкнених зустрічно-паралельно (рис. 38).

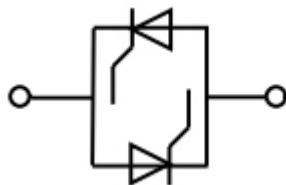


Рис. 40 – Тиристиори, увімкнених зустрічно-паралельно

3. *Двоопераційні тиристиори* з'явилися наприкінці 60-х років. У цих приладах при подачі негативного імпульсу на керуючий електрод можливо здійснити запирання анодного струму. Необхідна потужність замикаючого керуючого імпульсу значно вище потужності імпульсу, що відмикає.

Розроблені двоопераційні тиристори на струми до 200–500 А и напруги до 1000– 2000 В.

Основна область застосування тиристорів – перетворююча техніка. Номінальні значення струмів у деяких типів тиристорів в відкритому стані досягають 5000 А, а номінальні значення напруг у закритому стані – до 5000 В.

Типова конструкція тріодного тиристора великої потужності приведена рис. 41, де:

- 1 – підстава з міді;
- 2 – трубка зі сталі з склоізолятором;
- 3,4 – чотиришарова структура $p-n-p-n$ із припаяними до неї вольфрамowymi дисками 5 і 6;
- 7,8 – стержневі виводи відповідно катода і керуючого електрода, які через перехідні втулки 9 з'єднуються з гнучкими зовнішніми виводами.

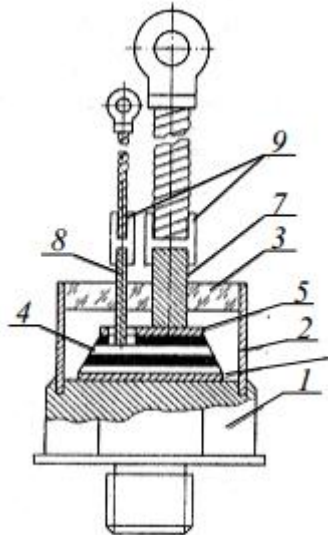


Рис. 41 – Будова тріодного тиристора великої потужності

12.3. Випромінюючий діод

Випромінюючий діод – напівпровідниковий діод, що випромінює з області $p-n$ -переходу кванти енергії. Випромінювання випускається через прозору скляну пластину, розміщену в корпусі.

По характеристиці випромінювання випромінюючі діоди поділяються на дві групи:

- діоди з випромінюванням у видимій області спектра, що одержали назву світлодіоди;

- діоди з випромінюванням в інфрачервоній області спектра, що одержали назву ІЧ-діоди.

Принцип дії обох груп діодів однаковий і базується на мимовільній рекомбінації носіїв заряду при прямому струмі через електричний

випрямляючий перехід. Рекомбінація носіїв супроводжується звільненням кванта енергії.

Спектр частот кванта енергії визначається типом напівпровідникового матеріалу. Основними матеріалами для виготовлення світлодіодів служать фосфід галію, арсенід-фосфід галію, карбід кремнію. Велику частину енергії, що виділяється в цих матеріалах, при рекомбінації носіїв заряду, складає теплова енергія. На частку енергії видимого випромінювання в кращому випадку приходиться 10...20%. Тому *ККД* світлодіодів невеликий.

Матеріалами для виготовлення ІЧ-діодів є арсенід і фосфід галію. Повна потужність випромінювання цієї групи діодів лежить у межах від одиниць до сотень міліватів при напрузі на діоді 1,2 ...3 В і прямому струмі від десятків до сотень міліамперів.

Світлодіоди застосовують як світлові індикатори, ІЧ-діоди – як джерела випромінювання в оптоелектронних пристроях, пульсах.

12.3.1. Загальнотехнічні й економічні характеристики і система позначень напівпровідникових приладів

До загальнотехнічних і економічних характеристик напівпровідникових приладів відносяться маса, механічна міцність, термостійкість, надійність, тобто параметри, що визначають економічність і можливі області експлуатації електронних пристроїв.

Маса напівпровідникових приладів невелика, визначається в основному масою корпусу і виводів. Тому маса малопотужних безкорпусних приладів складає 0,01–0,1 гр., маса приладів, укладених у металевий корпус – 1–10 гр. Тільки потужні діоди, транзисторні зборки і тиристори мають масу 0,1–0,5 кг.

Механічна міцність напівпровідникових приладів досить висока. Більшість з них витримує вібраційні прискорення (10 – 100) g, удари з прискоренням (50 – 500) g.

Робочі температури для германієвих приладів, як правило, коливаються від –40...– 60°C до +60...+80°C. Для кремнієвих приладів верхня межа робочих температур може досягати +100...+150°C.

Надійність напівпровідникових приладів зручно характеризувати середнім часом безвідмовної роботи, що при правильній експлуатації складає 10⁶ – 10⁷ годин.

Тиск навколишнього повітря при роботі напівпровідникових приладів може колитися в широких межах. Більшість приладів надійно працює при тисках від $7 \cdot 10^2$ до $3 \cdot 10^5$ Па.

Вартість напівпровідникових приладів при їхньому масовому виготовленні дуже низька (від декількох копійок до декількох гривень) і має стійку тенденцію до зниження.

Усі напівпровідникові прилади, що існують, розроблюються або модернізуються позначають буквено-цифровим кодом (букви, що застосовуються у позначеннях – російські).

Перший елемент позначення визначає вихідний напівпровідниковий матеріал:

- германій – Г або 1;
- кремній – К або 2;
- з'єднання галію – А або 3.

Другий елемент позначення – буквенний – визначає клас приладу:

- транзистори біполярні – Т;
- транзистори польові – П;
- діоди випрямні – Д;
- випрямні стовпи і блоки – Ц;
- діоди надвисокочастотні – А;
- варикапи – У;
- діоди тунельні і звернені – И;
- стабілітрони і стабістори – С;
- тиристори діодні до 10 А – Н;
- тиристори тріодні до 10 А – У.

Третій елемент позначення – цифри від 1 до 99 – визначають діапазон основних параметрів приладу (потужність, частота, основне призначення і т.п.).

Четвертий елемент позначення – двозначне число від 01 до 99 – визначає номер розробки.

П'ятий елемент позначення – букви російського алфавіту від А до Я – визначає розподіл технологічного типу на параметричні групи, наприклад по зворотних напругах, коефіцієнту передачі струму і т.п.

Відповідно до зазначеної системи маркірування позначення ГТ308В належить германієвому (Г) транзисторові (Т), високочастотному, малої потужності № розробки 08, з коефіцієнтом передачі струму бази 50 – 120 (У); позначення КД202Р відповідає кремнієвому (К) випрямного діода (Д) середньої потужності (2), номер розробки 02, з максимально припустимою зворотною напругою 600В (Р).

12.4. Фотоелектричні прилади. Поняття про оптоелектронні прилади

Фотоелектричними називають електронні прилади, що перетворюють енергію випромінювання в електричну енергію. Такі прилади можуть будуватися на фотоэффекті як у вакуумі, газі, так і в напівпровіднику. У даний час найбільше поширення одержали фотоелектричні прилади, принцип дії яких заснований на внутрішньому фотоэффекті в напівпровіднику. Суть його полягає в збільшенні концентрації вільних носіїв заряду під дією зовнішнього світла, а отже, і провідності напівпровідникових матеріалів.

Одержувана в такий спосіб провідність називається фотопровідністю. Вона сполучається з власною провідністю напівпровідникового фотоматеріалу. Фотопровідність залежить від інтенсивності і спектрального складу зовнішнього світлового потоку.

Внутрішній фотоефект може бути реалізований у різних напівпровідникових приладах. Розглянемо основні з них.

Фоторезистор – напівпровідниковий прилад, електричний опір якого змінюється в залежності від інтенсивності і спектрального складу зовнішнього випромінювання.

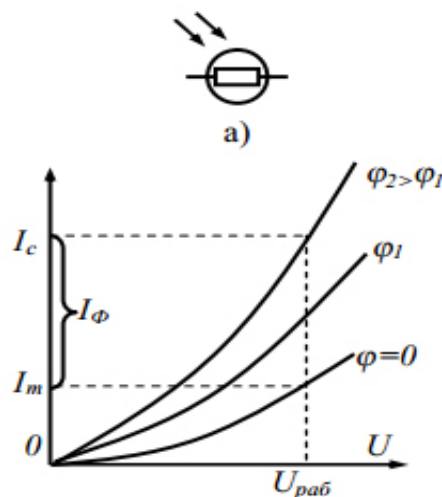


Рис.42 – Умовне позначення (а) та вольт-амперні характеристики (б) фоторезистора

На рис. 42 показані умовна позначка і типові ВАХ фоторезистора для декількох значень світлового потоку Φ . При відсутності зовнішнього світлового потоку ($\Phi = 0$) опір фоторезистора великий і визначається власною провідністю напівпровідникового матеріалу.

Струм, обумовлений власною провідністю, називається *темновим* I_m .

Під дією світлового потоку опір фоторезистора зменшується. У цьому випадку струм називається *світловим* I_c . Різниця між світловим і темновим струмами складає фотострум I_Φ . Конструктивно фоторезистори виконують у металевому чи пластмасовому корпусі з прозорим вікном, під яким розташований напівпровідниковий матеріал.

Фотодіод за структурою аналогічний звичайному напівпровідниковому діоду. Відмінність полягає в тому, що його корпус постачаний додатковою лінзою, що створює зовнішній світловий потік, спрямований, як правило, перпендикулярно площини *p-n*-переходу. Прилад може працювати в режимах фотоперетворювача і фото генератора.

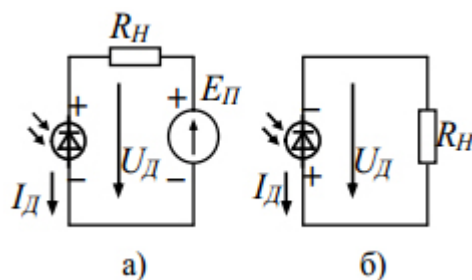


Рис. 43 – Увімкнення фотодіоду за схемою фотоперетворювача (а) та за схемою фотогенератора (б)

У режимі фотоперетворювача в ланцюг фотодіода включають зовнішнє джерело живлення (рис. 43,а), що забезпечує зворотний зсув р-п-переходу. Якщо перехід не освітлений, то створюється зворотний темновий струм. При висвітленні переходу до темновому току додається фотострум, значення якого не залежить від прикладеної напруги і пропорційно інтенсивності світлового потоку Φ .

У режимі фотогенератора фотодіод сам є джерелом ЕРС (рис. 42,б), значення якого пропорційно інтенсивності світлового потоку. Типове значення фото-ЕРС $E = U_{xx}$ кремнієвого фотодіода при середнім сонячному висвітленні складає 0,5...0,55 В.

Фототранзистор має структуру аналогічну структурі біполярного транзистора.

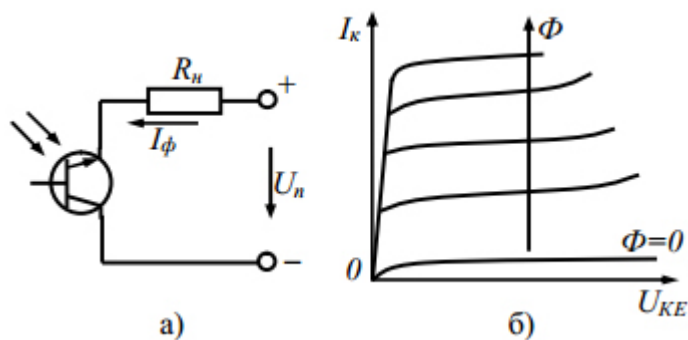


Рис. 43 – Фототранзистор: а – схема увімкнення; б – сімейство вихідних характеристик

Схема увімкнення фото транзистора наведена на рис. 43,а. Він має більш високу чутливість, ніж фотодіод. Світловий потік впливає перпендикулярно площині емітерного р-п-переходу, генеруючи в базі пари носіїв заряду. Неосновні для бази носії заряду притягаються колекторним переходом, збільшуючи колекторний струм. Однак цей струм є тільки частиною струму колектора, тому що відхід з бази неосновних носіїв створює в ній незкомпенсований об'ємний заряд основних носіїв. Цей заряд знижує потенційний бар'єр емітерного переходу. У результаті відбувається збільшення кількості носіїв заряду інжектуюємих емітером в область бази, а

отже, і збільшення колекторного струму. Таким чином, у фототранзисторі відбувається посилення фотоструму, що і пояснює велику чутливість його в порівнянні з фотодіодом.

Вольт-амперні характеристики фототранзистора, виконаного без виводу бази, аналогічні характеристикам біполярного транзистора, ввімкненого за схемою з спільним емітером. Відмінність полягає в тому, що керуючим параметром є не струм бази, а світловий потік Φ (рис. 43,б).

Внутрішній фотоефект у напівпровіднику може бути використаний для побудови й інших напівпровідникових приладів: фототиристора, одноперехідного фототранзистора та ін. Широкого самостійного застосування прилади з внутрішнім фотоефектом не одержали, тому що значення фотоструму залежить не тільки від інтенсивності світлового потоку, але і від його спектрального складу. Зміна останнього приводить до неоднозначних результатів у роботі пристроїв, що містять зазначені прилади. Цього недоліку позбавлені оптоелектронні прилади (штопари).

12.5. Оптоелектронні прилади

Оптоелектронний прилад (оптопара) містить одночасно джерело і приймач світлової енергії.

Для оптопари як вхідним, так і вихідним параметром є електричний сигнал, причому гальванічного зв'язку між вхідними і вихідними ланцюгами немає. Як випромінювач у оптопарі можуть бути використані інфрачервоний випромінюючий діод, світло випромінюючий діод, люмінесцентний випромінювач чи напівпровідниковий лазер. Найбільше поширення в даний час одержав інфрачервоний випромінюючий діод, що пояснюється простотою його структури, керування і високим ККД. В якості приймача оптопари знаходять застосування розглянуті вище фотоелектричні прилади: фоторезистор, фотодіод, фототранзистор та ін. Слід зазначити, що оптопара дозволила створити аналог розділового трансформатора, що є особливо актуальним в інтегральній мікроелектроніці. Умовні позначки оптопар, що включає різні приймачі, приведені на рис. 44.

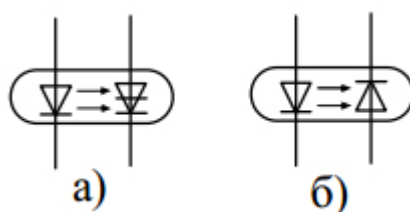


Рис. 44 – Умовне позначення оптопари: а – тиристорної; б – діодної

Для посилення й узгодження вихідного сигналу оптопари з її стандартним рівнем напруги, які використовуються для передачі і перетворення цифрових сигналів, служать оптоелектронні інтегральні схеми.

У них застосовуються, як правило, діодна оптопара (яка має найвищу швидкодію) та імпульсний підсилювач. На рис. 45 зображено принципіальна електрична схема одного з таких пристроїв.

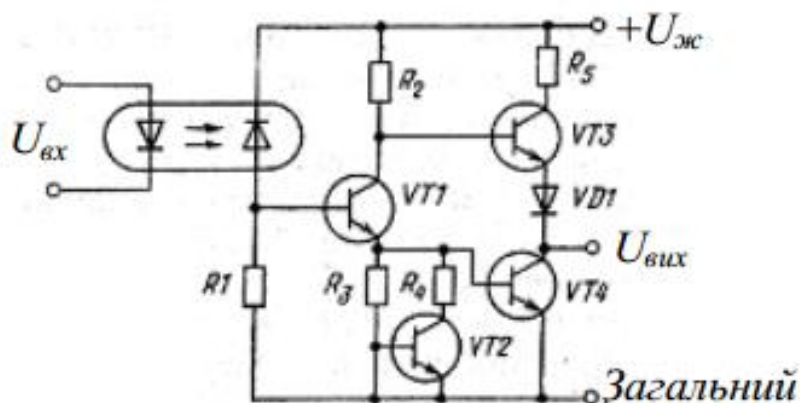


Рис. 45 – Схема оптоелектронного перемикача-інвертора

У даний час застосовується два види маркірування фоторезисторів: старий і новий.

Старий містить три символи. Перший символ – букви ΦC (фотоопір (російською)). Другий символ-буква, що вказує тип світлочутливого матеріалу:

А – сірчистий свинець;

К – сірчистий кадмій;

Д – селенід кадмію.

Третій символ – цифра, що позначає тип конструктивного виконання. У новому маркіруванні букви ΦC замінені на $C\Phi$ – опір фоточуттєве, а тип світлочутливого матеріалу позначається цифрою, наприклад $C\Phi 2-4$.

Маркірування фотодіода містить букви $\Phi Д$ (фотодіод) і цифру (порядковий номер розробки, наприклад $\Phi Д-3$).

Маркірування оптопар включає сімох символів:

перший позначає вихідний матеріал (звичайно це буква А – з'єднання галію – чи цифра 3 – для приладів спеціального призначення);

другий символ – буква О – оптопара;

третій – вказує тип приймача оптопари: Д – діод, Т – транзистор, У – тиристор, Р – з відкритим оптичним каналом;

четвертий, п'ятий і шостий вказують номер приладу;

сьомий символ – буква, що позначає класифікацію по групах параметрів.

Приклад маркування:

АОТ 130А – оптопара діод-діод на основі з'єднання галію, номер приладу 130, група параметрів А.

ЛЕКЦІЯ 13. ПІДСИЛЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ

План

Вступ.

1. Підсилювальні пристрої.
2. Класифікація, основні характеристики підсилювача.
3. Підсилювальний каскад зі спільним емітером.

Література

8. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.

9. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.

10. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.

Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

Вступ

У даний час важко визначити область техніки, де б не знаходили застосування підсилювачі електричних сигналів. Це пояснюється, як правило, невідповідністю параметрів електричних сигналів, одержуваних параметри, які необхідні для нормальної роботи більшості виконавчих (навантажувальних) пристроїв. Так, потужність електричного сигналу на виході типового датчика температури складає десятки міліватів. У той же час стабілізація температурного режиму, наприклад, ядерного реактора вимагає електричного сигналу потужністю в десятки і навіть сотню кіловат. Для рішення цієї задачі електричний сигнал датчика повинний бути відповідно посилений.

13.1. Класифікація, основні характеристики підсилювача

Підсилювачем називають пристрій, призначений для посилення вхідного електричного сигналу по напрузі, струму чи потужності за рахунок перетворення енергії джерела живлення в енергію вихідного сигналу.

Як впливає з даного визначення, суть процесу посилення електричних сигналів складається в перетворенні енергії джерела живлення підсилювача в енергію вихідного сигналу за законом, який обумовлений вхідним керуючим впливом. Іншими словами, будь-який підсилювач модулює енергію джерела живлення вхідним керуючим сигналом. Цей процес здійснюється за допомогою керованого нелінійного елемента.

Таким чином, для забезпечення посилення сигналу підсилювач (Π), послідовно з яким з'єднане джерело живлення E_p повинен містити в собі

нелінійний елемент, керований вхідним електричним сигналом \dot{U}_1 . До вхідного (керуючого) ланцюга підсилювача підключено джерело \dot{E}_c посилюваного сигналу (при цьому Z_c – комплексне значення внутрішнього опору джерела), а до вихідного – навантажувальний пристрій з опором Z_n (рис. 46).

Як видно, дія підсилювача полягає в забезпеченні умов, при яких малопотужний сигнал \dot{U}_1 керує зміною істотно більшої вихідної напруги \dot{U}_2 , обумовленої наявністю у вихідному ланцюзі джерела живлення E_n .

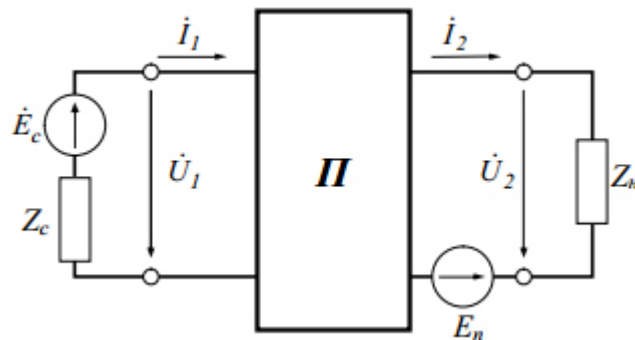


Рис. 46 – Узагальнена структурна схема підсилювального пристрою

Керовані нелінійні елементи сучасних підсилювачів виконуються, як правило, з використанням біполярних і польових транзисторів. Тому їх часто називають *транзисторними підсилювачами*.

По виду посилюваного сигналу підсилювачі поділяються на підсилювачі гармонійних і імпульсних сигналів.

Підсилювачі гармонічних (безупинних) чи квазігармонічних (майже гармонічних) сигналів призначені для посилення сигналів, зміна яких відбувається багато повільніше тривалості перехідних процесів у самих підсилювачах.

Підсилювачі імпульсних сигналів призначені для посилення імпульсних періодичних або неперіодичних сигналів. При цьому тривалість власних перехідних процесів у підсилювачі не повинна викликати перекручування вихідної форми посилюваних сигналів.

По фазі підсилювачі підрозділяють відповідно на неінвертуючі і інвертуючі, в залежності від того, чи збігається фаза вихідного сигналу підсилювача з фазою його вхідного сигналу чи вона зсунута на 180° .

По типу посилюваної величини їх поділяють на підсилювачі напруги, струму і потужності. Однак посилення сигналу по потужності спостерігається в будь-якому підсилювачі на відміну від інших типів перетворювачів електричного сигналу. Наприклад, в трансформаторі, потужність на виході завжди залишається незмінною стосовно його вхідної потужності. Тому зазначена класифікація для підсилювачів має трохи

умовний характер, виражаючи лише основне цільове призначення підсилювача.

По виду сполучних ланцюгів підсилювальних каскадів. Так як підсилювальні пристрої будуються, як правило, на основі послідовного ввімкнення декількох типових каскадів, то розрізняють:

– підсилювачі з гальванічним (безпосереднім) зв'язком, що передбачають передачу між каскадами сигналу як змінного, так і постійного струмів;

– підсилювачі із *RC*-зв'язками, у яких між виходом попереднього і входом наступного каскадів включають резистивно-ємнісне коло, що виключає передачу сигналів постійного струму;

– підсилювачі з індуктивним (трансформаторним) зв'язком, у яких між каскадами включається трансформатор.

Найважливішими характеристиками підсилювача є: коефіцієнт підсилення, смуга пропускання (діапазон робочих частот підсилювача), вхідний і вихідний опори, вихідна потужність.

Коефіцієнт підсилення – відношення сталих значень вихідного і вхідного сигналів підсилювача. У залежності від типу посилюваної величини розрізняють коефіцієнти підсилення:

– по напрузі $K_u = \Delta U_2 / \Delta U_1$;

– по струму $K_i = \Delta I_2 / \Delta I_1$;

– по потужності $K_p = \Delta P_2 / \Delta P_1$;

де U_1, U_2, I_1, I_2 – діючі значення напруги і струму.

Так як $\Delta P_1 = \Delta U_1 \Delta I_1$ і $\Delta P_2 = \Delta U_2 \Delta I_2$, то коефіцієнт підсилення по потужності $K_p = K_u K_i$.

При каскадному з'єднанні декількох підсилювальних пристроїв добуток їхніх коефіцієнтів підсилення визначає загальний коефіцієнт підсилення системи, тобто

$$K_{\text{заг}} = K_1 K_2 \dots K_n \quad (14.1)$$

У загальному випадку коефіцієнти підсилення є комплексними величинами, що відбиває наявність фазових перекручувань посилюваного сигналу.

В електроніці широко використовують логарифмічні одиниці оцінки коефіцієнта посилення, що виражається в децибелах. Тоді коефіцієнт підсилення по потужності:

$$K_p [\text{дБ}] = 10 \lg P_2 / P_1 = 10 \lg K_p \quad (14.2)$$

Оскільки потужність пропорційна квадрату струму, для коефіцієнтів підсилення по струму і напрузі можна записати відповідно:

$$K_i [\text{дБ}] = 20 \lg I_2 / I_1 = 20 \lg K_i$$

$$K_u[\text{дБ}] = 20 \lg U_2 / U_1 = 20 \lg K_u$$

Логарифмічна міра оцінки зручна при аналізі багатокаскадних підсилювачів. Дійсно, загальний коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача при переході до логарифмічних одиниць виміру визначається, на відміну від (14.2), сумою коефіцієнтів підсилення окремих каскадів, тобто

$$K_{\text{заг}}[\text{дБ}] = K_1[\text{дБ}] + K_2[\text{дБ}] + \dots + K_n[\text{дБ}] \quad (14.3)$$

Смуга пропускання підсилювача – діапазон робочих частот $\Delta\omega$ у межах якого коефіцієнт підсилення не знижується нижче значення $1/\sqrt{2} \gg 0,707$ від свого максимального значення K_{max} . Залежність коефіцієнта підсилення від частоти посилюваного сигналу називається амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) підсилювача. Приклад АЧХ показано на рис. 47. Якщо відновити перпендикуляр із точки на вісь абсцис, що відповідає значенню $K_{\text{max}}/\sqrt{2}$, до перетинання з АЧХ, то легко графічним шляхом визначити смугу пропускання підсилювача. Проекція на вісь абсцис першої точки перетинання відповідає нижній (ω_H), а другий – верхній (ω_B) частотам пропускання підсилювача.

Тоді смуга пропускання $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$

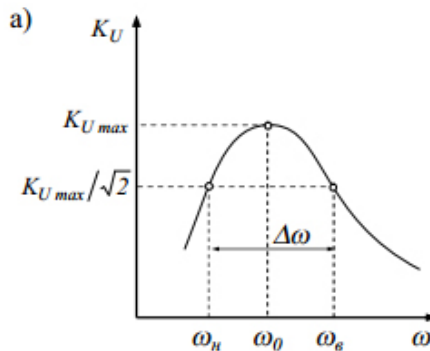


Рис. 47 – Амплітудно-частотна характеристики підсилювального пристрою

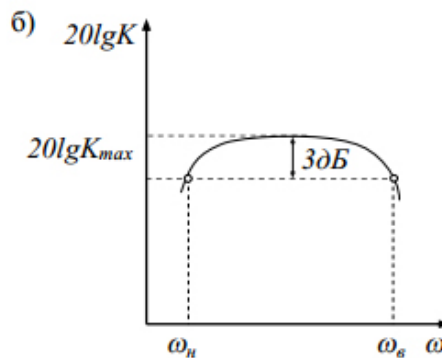


Рис.48 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристики підсилювального пристрою

Якщо коефіцієнт підсилення виміряється в децибелах, то значенням граничних частот посилення ω_H і ω_B відповідає зменшення коефіцієнта підсилення на 3 дБ (рис. 48).

По діапазону посилюваних частот (по виду АЧХ) розрізняють підсилювачі постійного струму і підсилювачі змінного струму.

Підсилювач постійного струму підсилює вхідний сигнал у діапазоні від нульової до деякої верхньої частоти $0 \leq f < f_B$ (рис. 49, а).

Підсилювач змінного струму підсилює вхідний сигнал, що лежить у діапазоні від деякої нижньої (f_H) до деякої верхньої (f_B) частоти $f_H \leq f \leq f_B$. Сигнали постійного струму даним типом підсилювача не підсилюються.

Серед підсилювачів змінного струму можуть бути виділені наступні підгрупи пристроїв:

- підсилювачі низької частоти (ПНЧ) – пристрої з діапазоном посилюваних частот від одиниць герців до сотень кілогерців (рис. 49,б);
- підсилювачі високої частоти (ПВЧ) – пристрої з діапазоном посилюваних частот від сотень кілогерців до сотень мегагерц (рис. 49,в);
- широкосмужні підсилювачі – пристрої з діапазоном посилюваних частот від десятків – сотень герц до сотень мегагерц (рис. 49,г);
- вибіркові (резонансні) підсилювачі, що забезпечують посилення в дуже вузькому діапазоні частот (рис. 49,д).

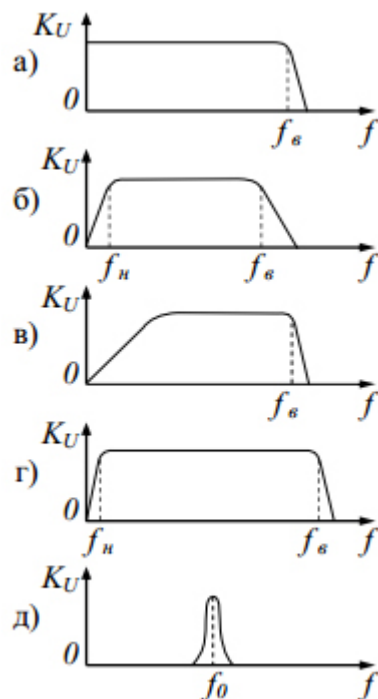


Рис. 49 – АЧХ підсилювачів: а – постійного струму; б – підсилювача низької частоти; в – підсилювача високої частоти; г – широкосмужного підсилювача; д – вибіркового

Вхідний і вихідний опори – найважливіші параметри підсилювальних пристроїв. Їхні значення повинні враховуватися при узгодженні підсилювального пристрою як із джерелом вхідного сигналу (датчиком), так і з навантаженням. Вони визначаються як:

$$R_{\text{вх}} = (U_1/I_1)_{R_{\text{н}}=\text{const}};$$

$$R_{\text{вих}} = U_{2x}/I_{2x}.$$

де U_{2x} – напруга холостого ходу на виході підсилювача $R_{\text{н}} = \infty$; I_{2x} – струм короткого замикання $R_{\text{н}} = 0$.

Вихідна потужність підсилювача – це та частина потужності, що може бути виділена в навантажувальному пристрої:

$$P_{\text{вих}} = P_2 = I_2^2 R_{\text{н}}$$

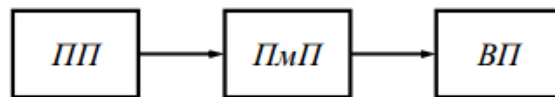


Рис. 50 – Каскадна схема підсилювача

Для одержання високих коефіцієнтів підсилення необхідно каскадне ввімкнення декількох підсилювачів, що забезпечує послідовне посилення сигналу до необхідного значення.

Каскадну схему підсилювача можна представити у виді трьох функціонально відмінних каскадів посилення (рис. 50):

- попереднього підсилювача (ПП);
- проміжного підсилювача (ПМП);
- вихідного підсилювача (ВП).

Попередній підсилювач забезпечує безпосередній зв'язок джерела сигналу і підсилювального пристрою. Тому найважливіша вимога, яку він повинний задовольняти – мінімальне послаблення вхідного сигналу. Для цього ПП повинний володіти великим вхідним опором $R_{\text{вх}}$. Цей опір повинний бути істотно більше опору джерела сигналу R_c . У цьому випадку зміна вхідної напруги підсилювача буде прагнути до зміни ЕРС джерела в його вхідному ланцюзі. Основна вимога, що висувається до ПП – забезпечення найбільшого посилення вхідного сигналу при мінімальних його перекручуваннях.

Проміжний підсилювач виконує роль буферного каскаду між попереднім і вихідним підсилювачами. Основна його задача – узгодження виходу ПП із входом ВП.

Вихідний підсилювач призначений для одержання на виході підсилювального пристрою потужності, що забезпечує працездатність

навантажувального пристрою, що виконує визначені функції. Тому на відміну від ПП і ПМП, вихідна потужність яких порівняно невелика, основним параметром ВП є ККД.

Наявність трьох різнотипних функціональних каскадів – попереднього, проміжного і вихідного – не є обов'язковим. Відомі електронні підсилювачі, у яких попередній і проміжний підсилювачі не мають явно виражених розмежувальних ознак і сполучені в одному підсилювальному каскаді. Те ж саме відноситься до проміжного і вихідного підсилювачів, які також можна поєднувати.

Нарешті, можлива схема підсилювальних пристроїв з декількома підсилювачами одного типу і т.п.

ЛЕКЦІЯ 14. ПІДСИЛЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ (2)

План

1. Підсилювальний каскад зі спільним емітером.

Література

1. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
2. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

14.1. Підсилювальний каскад зі спільним емітером

Розглянемо принцип дії найпростішого підсилювального каскаду, ввімкненого за схемою з спільним емітером (СЕ), (рис. 6). Для транзистору з *p-n-p* – структурою полярність ввімкнення джерела живлення – протилежна.

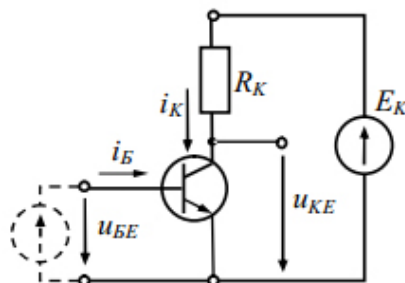


Рис. 51 – Найпростіша схема ввімкнення транзистора за схемою з спільним емітером

Тоді смуга пропускання:

$$\partial w = w_B - w_H$$

Джерело напруги $E_K \gg U_{КЕН.}$ ($U_{КЕН.}$ позначено на вихідній характеристиці транзистора) зв'язано з колекторним електродом транзистора через опір навантаження R_K . Вхідний сигнал подається на базу транзистора (напруга U_{BE} і струм I_B).

Побудуємо залежність $U_{КЕН.} = f_B u_{BE}$, яка називається *передатною характеристикою каскаду*.

При збільшенні напруги u_{BE} зростає струм бази i_B (вхідна характеристика транзистора при $u_K \gg U_{КЕН.}$, рис. 3,б; Лекц.6), і струм колектора:

$$i_K = \beta i_B$$

У результаті збільшується спадання напруги на резисторі R_K , зменшується напруга $u_{KE} = E_K - i_K R_K$ (рис. 14.6).

При досягненні напруги $u_{KE} = U_{КЕН.}$, подальше збільшення u_{BE} не викликає змін напруги u_{KE} і струму i_K , що протікає через резистор R_K . У цьому режимі до R_K прикладена напруга $E_K - U_{КЕН.}$, і тому струм колектора

$$i_K = I_{КН} = (E_K - U_{КЕН.}) / R_K$$

При зміні напруги u_{BE} або струму i_B у колі малопотужного джерела сигналу можна змінити струм i_K і напругу в колі більш потужного джерела E_K . Однак колекторну напругу можна змінювати лише в межах;

$$E_K > u_{KE} > u_{КЕН.},$$

а струм – у межах:

$$I_{КБО} \leq i_K \leq (E_K - U_{КЕН.}) / R_K$$

(ділянка II на передатній характеристиці – рис. 7).

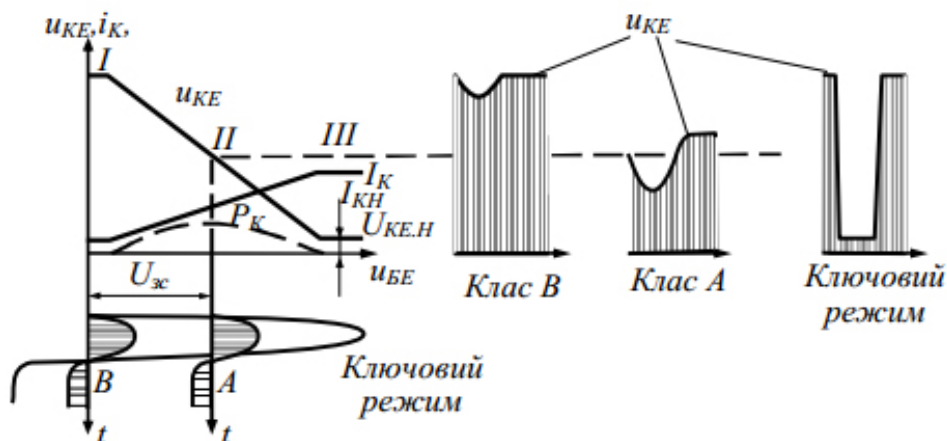


Рис. 51 – Передатна характеристика транзисторного каскада с СЕ

При від'ємних значеннях u_{BE} на ділянці I через транзистор протікає тільки малий некерований струм колекторного переходу, а на ділянці III:

$$u_{KE} = U_{KEH}.$$

і транзистор втрачає властивості підсилювального елемента.

При збільшенні u_{BE} (ділянка II) u_{KE} – зменшується. Підсилювач, у якому збільшення вихідного сигналу протилежно за знаком збільшенню вхідного сигналу, називається *інвертуючим*.

Передатна характеристика каскаду дозволяє розглянути способи роботи каскаду, які називаються *класами посилення*.

На рис. 51 показано довільний двополярний вхідний сигнал $u_{BX}(t)$ і форма кривої напруги на колекторі u_{KE} в різних класах посилення.

При роботі в класі посилення A на вхід підсилювача одночасно з вхідним сигналом u_{BX} подається також постійна напруга зсуву, так що $u_{BE} = u_{BX} + U_{ЗС}$.

Завдяки зсуву в кривій напруги u_{KE} вхідний сигнал відтворюється цілком, практично без перекручувань форми, тому що значення u_{BE} постійно відповідають ділянці II передатної характеристики. Режим роботи підсилювача, коли ввімкнені джерела живлення і подано напругу зсув, але $u_{BX}=0$ називається режимом спокою. У цьому режимі $u_{BE} = u_{BE.П}$ і $i_B = i_{B.П}$, а $u_{KE} = u_{KE.П}$. При додаванні негативної (чи позитивної) напруги u_{BX} зменшаться (чи відповідно збільшаться) струми i_B і i_K та спадання напруги на R_K , в результаті збільшиться (чи зменшиться) напруга u_{KE} :

$$u_{KE} = U_{KE.П} + \Delta U_{KE},$$

де $\Delta U_{KE} = u_{ВИХ}$ – корисний ефект посилення.

При роботі в класі посилення B $u_{BE} = u_{BX}$. Нелінійність передатної характеристики каскаду приводить до того, що в класі B на вихід передається сигнал тільки однієї полярності: $u_{ВИХ} > 0$. Клас B можна використовувати тільки для передачі однополярних сигналів. При передачі двополярної напруги форма його спотворюється, частина інформації безповоротно губиться.

При роботі в ключовому режимі (режим великого сигналу) зміна вхідної напруги охоплює ділянки I–III передатної характеристики. Форма переданого сигналу спотворюється (обмежується його амплітуда). Подібний режим роботи каскаду знаходить широке застосування в імпульсній техніці при передачі імпульсів прямокутної форми, де обмеження амплітуди імпульсів несуттєво.

Вибір класу посилення і вибір режиму спокою визначає не тільки форму переданого сигналу, але і потужність втрат, що викликає нагрівання транзистора:

$$P_K = \frac{1}{T} \int_0^T u_{KE} i_K dt$$

На діаграмах рис. 51 пунктиром зображена залежність потужності P_K у режимі спокою від напруги зсуву $u_{BE.П}$. Ця залежність показує, що вибір $u_{BE.П}$ у середині ділянки II передатної характеристики каскаду відповідає максимальним втратам потужності в транзисторі.

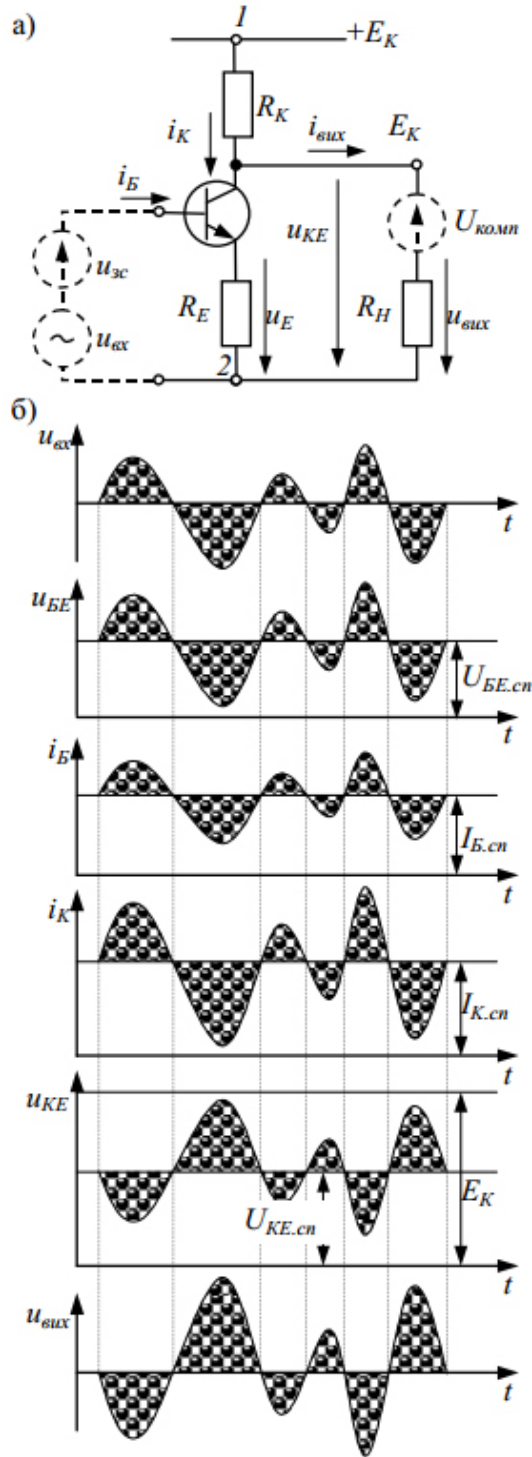


Рис. 52 – Каскад з СЕ (а) та часові діаграми струмів і напруг в цьому каскаді

Режим спокою в каскаді з спільним емітером. Розглянемо роботу каскаду з CE (рис. 52,а). Спочатку розглянемо спрощений варіант каскаду при $R_E = 0$. Схема містить підсилювальний елемент – транзистор, джерело живлення E_K , опір колекторного навантаження R_K . На схемі (в порівнянні з рис. 6) з'явився опір навантаження R_H , до якого прикладена напруга $u_{ВИХ}$, а вхідний ланцюг умовно представлений у виді послідовного ввімкнення двох джерел напруги $u_{ВХ}$ і $u_{ЗС}$.

На рис. 52,б представлені часові діаграми напруг і струмів у каскаді з CE . При $u_{ВХ} = 0$ у режимі спокою через транзистор протікають постійні токи $I_{Бсп}$, $I_{Ксп}$, $I_{Есп}$ і до бази і колектора транзистора прикладено постійні напруги $U_{БЕсп} \neq 0$ та $U_{КЕсп} \neq 0$. Для того щоб у режимі спокою $u_{ВИХ} = 0$, у ланцюг навантаження R_H необхідно ввести джерело постійної компенсуючої напруги, $U_{комп} = U_{КЕсп}$. При поданні вхідної напруги струми і напруги в транзисторі починають змінюватися.

У схемі рис. 52,а є лише один нелінійний елемент – транзистор; зв'язок струмів і напруг у транзисторі представлено його ВАХ.

$$i_K = f(u_{КЕ}) \text{ при } I_B = \text{const} \quad (14.4)$$

Режим спокою. Припустимо, що в ланцюг навантаження ввімкнено джерело компенсуючої напруги $U_{комп} = U_{КЕсп}$. Тоді в режимі спокою струм у навантажувальному колі ($R_H, U_{комп}$) не відгалужується і рівняння лінійної частини схеми записується у виді

$$i_K = (E_K - u_{КЕ.П})/R_K \quad (14.5)$$

Вирішимо систему рівнянь (14.4) і (14.5) графічно. Для цього через сімейство вихідних характеристик транзистора (рис.9) проводимо лінію навантаження по постійному струму, що описується рівнянням (14.5). З (14.5) знаходимо, що при

$$i_K = 0 ; \\ u_{КЕ} = E_K ;$$

і

$$u_{КЕ} = 0 ; \\ i_K = E_K/R_K .$$

Через дві знайдені точки проводимо пряму лінію. Задамо струм бази в режимі спокою $I_{Бсп}$, тоді перетинання лінії навантаження по постійному струму з вихідною характеристикою транзистора при $I_B = I_{Бсп}$ буде відповідати рішенню системи рівнянь (14.4) і (14.5) – точці спокою 0 ($U_{КЕсп}$, $I_{Ксп}$).

Графічний аналіз каскаду при наявності вхідного сигналу здійснюється аналогічно. Розглянемо контур проходження струму $I_{Ксп}$ через лінійну частину схеми.

Він проходить через R_K , E_K , $U_{\text{комп}}$ і R_H .

Так як опір джерел постійної напруги для змінної складової струму дорівнює нулю, рівняння лінійної частини схеми має вид

$$\Delta I_K = \Delta U_{KE} (R_K + R_H) / (R_K R_H) = \Delta U_{KE} / R_K \parallel R_H, \quad (14.6)$$

де $R_K \parallel R_H$ – позначення паралельного з'єднання резисторів.

Вирішимо спільно (14.4) і (14.6). Для цього через сімейство вихідних характеристик транзистора (рис. 9.) проводимо через точку спокою лінію навантаження по змінному струму $A0B$ відповідно до рівняння (14.6). Оскільки $R_H > (R_K \parallel R_H)$, пряма $A0B$ йде крутіше лінії навантаження по постійному струму.

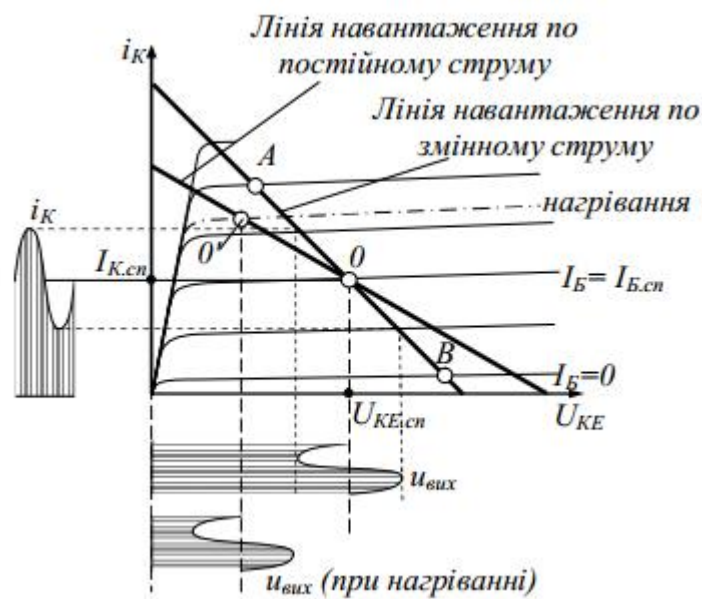


Рис. 53 – Графічний розрахунок каскаду з СЕ

При збільшенні I_B робоча точка каскаду зміщується вгору по прямій OA , струм i_K зростає, u_{KE} падає. При зменшенні струму бази робоча точка переміщається по прямій OB униз, струм i_K падає, u_{KE} зростає. Пряма $A0B$ – траєкторія робочої точки каскаду.

Струм $I_{K,сп}$ сильно залежить від температури. При нагріванні зростає $I_{K,сп}$, вихідна характеристика при збереженні рівності $I_B = I_{B,сп}$ зміщується угору, як показано штрих-пунктирною лінією на рис. 14.8. Точка спокою переміщається нагору по лінії навантаження по постійному струмі з O у O' , у результаті цього збільшення сигнали можуть вийти за ділянку II передатної характеристики (рис. 51) і форма кривої сигналу буде перевернута (крива $u_{вих}$ при нагріванні на рис. 53). Через це в транзисторних підсилювачах необхідно здійснювати стабілізацію точки спокою і каскади без стабілізації практично не застосовуються. Стабілізація режиму спокою дозволяє не

тільки виключити переключування форми сигналу при нагріванні, але і стабілізувати режим при заміні транзистора, оскільки параметри транзисторів мають від екземпляра до екземпляра велике розкидання параметрів, зазначених у паспортних даних приладу.

13.2. Основні показники каскаду із СЕ

Підсилювальний каскад із СЕ є, по суті, багатополосником і тому до нього застосовні ті ж методи аналізу, що і для інших багатополосників. Будь-який багатополосник можна замінити схемою заміщення. Представимо підсилювальний каскад із СЕ узагальненою схемою заміщення, що наведена на рис. 54.

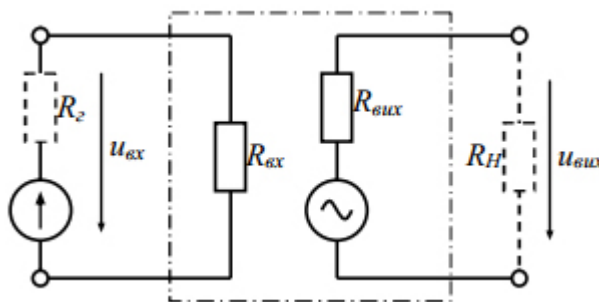


Рис. 54 – Узагальнена схема заміщення підсилювача

Користаючись схемою заміщення каскаду знайдемо параметри, що характеризують його підсилювальні властивості.

1. Вхідний опір

$$R_{\text{ВХ}} = u_{\text{ВХ}} / i_{\text{ВХ}} = r_{\text{вх.Е}} + (1 + \beta) R_{\text{Е}}, \quad (14.7)$$

де $r_{\text{вх.Е}} = h_{11}$; $b = |h_{21}|$.

При $R_{\text{Е}} = 0$ (каскад без стабілізації точки спокою) $R_{\text{ВХ}} = r_{\text{вх.Е}}$. Величина $R_{\text{ВХ}}$ в каскадах із СЕ малої потужності порядку 10^3 Ом.

2. Коефіцієнт посилення по напрузі в режимі холостого ходу:

$$K_{U_{\text{ХХ}}} = u_{\text{ВИХ}} / i_{\text{ВИХ}} \text{ при } R_{\text{Н}} = \infty.$$

Користуючись законом Ома, виразимо напругу через струми:

$$K_{U_{\text{ХХ}}} = \Delta I_{\text{К}} R_{\text{К}} / \Delta I_{\text{Б}} R_{\text{ВХ}} \quad (14.8)$$

При $R_{\text{Е}} = 0$: $K_{U_{\text{ХХ}}} = h_{21} R_{\text{К}} / h_{11} + (h_{21} + 1) R_{\text{Е}}$.

Значення $K_{U_{\text{ХХ}}}$ при $R_{\text{К}} \gg R_{\text{Е}}$ досягає 100. Залежність (14.8) показує дуже сильне зменшення $K_{U_{\text{ХХ}}}$ при збільшенні $R_{\text{Е}}$ (тобто при підвищенні стабільності точки спокою).

3. Вихідний опір

$$R_{\text{вих}} = R_{\text{к}} \quad (14.9)$$

У малопотужних підсилювачах $R_{\text{вих}} = 10^3 \text{ Ом}$.

4. Коефіцієнт посилення каскаду по напрузі при навантаженні:

$$K_U = \frac{u_{\text{вих}}}{e_{\text{г}}} = K_{U_{\text{хх}}} \frac{R_{\text{вк}}}{R_{\text{вк}} + R_2} \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{вих}}}$$

Значення K_U завжди менше $K_{U_{\text{хх}}}$.

5. Коефіцієнт посилення каскаду по струму

$$K_I = i_{\text{вих}} / I_{\text{вк}} = K_{U_{\text{хх}}} (R_{\text{вк}} / R_{\text{вих}} + R_2)$$

Так як в каскаді з СЕ $K_{U_{\text{хх}}} > 1$ то $K_I > 1$.

6. Коефіцієнт посилення по потужності

$$K_P = P_{\text{вих}} / P_{\text{вк}} = K_U K_I \gg 1$$

Як правило, малопотужні підсилювачі створюються для посилення напруги. Для одержання максимального посилення по напрузі, треба забезпечити

$$R_{\text{вк}} \gg R_{\text{г}}, \quad R_{\text{вих}} \ll R_{\text{н}}$$

ЛЕКЦІЯ 15. ПІДСИЛЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ (3)

План

1. Каскад з спільним колектором.

Література

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М. : Высшая школа, 1982. – 353 с.
2. Руденко В.С. и др. Промислова електроніка. – Либідь, 1993 – 430 с.
3. Колотаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка; теорія і практикум. Навч. Посібник за редакцією А.Г. 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

15.1. Каскад з спільним колектором

У каскаді з спільним колектором (*СК*) досягаються високі значення $R_{\text{вх}}$ при низьких $R_{\text{вих}}$.

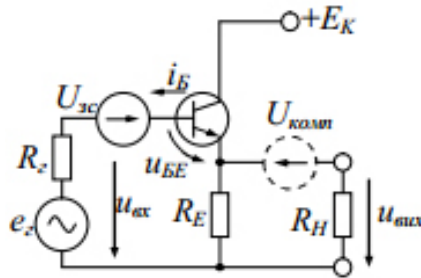


Рис. 55 – Каскад з спільним колектором

Але за цю перевагу в жертву приноситься інший параметр: у схемі з *СК* $K_U < 1$. Каскад з *СК* не підсилює сигналу по напрузі, а використовується лише як допоміжний каскад, що зв'язує схему з *СЕ* з малопотужним джерелом сигналу, або з низькоомним навантаженням. Незважаючи на допоміжну роль, виконувану схемою з *СК* у підсилювачах, цей каскад застосовується досить часто.

Схема каскаду з *СК* приведена на рис. 55. Колектор транзистора підключений до джерела живлення E_K . В емітерний ланцюг введено резистор R_E , який створює НЗЗ, що стабілізує точку спокою. Навантаження R_H підключається до емітерного ланцюга. У класі посилення *A* на вхід подаються вхідна напруга $u_{\text{вх}}$ і напруга зсуву $U_{\text{зс}}$.

Джерело сигналу $u_{\text{вх}}$ приєднане між базою і спільним проводом, навантаження – між емітером і спільним проводом. Спільний провід через джерело живлення E_K зв'язаний з колектором. Тому схема й одержала назву – *каскад з СК*. Інша її назва *емітерний повторювач*.

У режимі спокою $u_{\text{вх}} = 0$. Напруга $U_{\text{зс}}$ викликає струм бази $I_{\text{Бсп}}$ і в емітерному колі буде протікати струм $I_{\text{Есп}}$, що створює спадання напруги на R_E .

Для того щоб у режимі спокою $u_{\text{вих}} = 0$, необхідно в ланцюг навантаження ввести джерело напруги, що компенсує: $U_{\text{комп}} = U_{\text{Есп}}$. У режимі спокою до емітерного переходу транзистора прикладена напруга

$$U_{\text{Бсп}} = U_{\text{зс}} - U_{\text{Есп}}.$$

При подачі вхідного сигналу струми і напруги транзистора одержать збільшення. При позитивному (чи негативному) вхідному сигналі $u_{\text{вх}}$ струми бази і емітера збільшаться (чи відповідно зменшаться), зросте (зменшиться) спадання напруги на R_E . Збільшення напруги на ньому відповідає вихідному сигналу, що буде позитивним (негативним). Полярність вхідного і вихідного сигналів у схемі з *СК* збігаються, тобто каскад є підсилювачем, що не інвертує.

До емітерного переходу транзистора прикладена керуюча напруга

$$\Delta U_{BE} = u_{BX} - u_{BIX}$$

Сигнал u_{BIX} подається на вхід як сигнал НЗЗ: $\Delta U_{ЗЗ} = u_{BX}$. Так як при роботі транзистора u_{BE} завжди позитивно, то $u_{BIX} < u_{BX}$, тобто $K_U = u_{BIX}/u_{BX} < 1$.

Оскільки керуючий сигнал у схемі з СК $\Delta U_{BE} = u_{BX} - u_{BIX}$ малий, перекручування форми переданого сигналу спостерігаються лише при досить великих вхідних напругах, коли амплітуда сигналу складає $(0,2 - 0,4) E_K$.

Основні параметри каскаду з СК.

Як і при розгляді каскаду з СЕ до основних параметрів емітерного повторювача відносяться:

1. Вхідний опір

$$R_{BX} = u_{BX}/i_{BX} = h_{11} + (1 + h_{21})(R_E \parallel R_H)$$

2. Коефіцієнт посилення по напрузі в режимі холостого ходу:

$$K_{Uxx} = u_{BIX}/i_{BIX} \text{ при } R_H = \infty.$$

$$K_{Uxx} = \Delta I_E R_E / \Delta I_B R_{BX}; \quad K_{Uxx} = (1 + h_{21})R_E / h_{11} + (h_{21} + 1)R_E < 1,$$

але тому що $h_{11} \ll (h_{21} + 1)R_E$, $K_{Uxx} \approx 1$

3. Вихідний опір

$$R_{BIX} = R_E \parallel \frac{h_{11} + R_2}{h_{21} + 1}$$

У каскадах з СК $R_{BIX} \neq 10 \div 100 \text{ Ом}$

Інші параметри знаходяться аналогічно (14.7) – (14.9).

15.2. Підсилювач потужності

Підсилювач потужності звичайно є останнім каскадом у ланцюзі посилення сигналу. До його виходу підключається приймач великої потужності. Розрізняють два класи підсилювачів потужності: А и В.

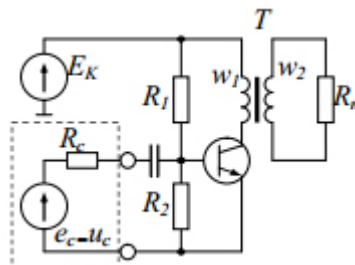


Рис. 56 – Схема підсилювача потужності класу А

На рис. 56 приведена схема підсилювача потужності класу А. Для одержання великої потужності необхідно максимально зменшити опір кола колектора підсилювача по постійному струму і підключити до нього приймач з опором навантаження R_H через трансформатор.

Розглянемо спочатку режим спокою підсилювача, що характеризується точкою А на колекторних характеристиках транзистора. Так як опір ланцюга колектора в режимі спокою дорівнює активному опору первинної

обмотки трансформатора, то можна вважати $R_K \approx 0$. Отже, навантажувальна характеристика практично паралельна осі ординат.

При дії на вході підсилювача потужності джерела, наприклад синусоїдального сигналу $e_c = E_m \sin \omega t$, змінні складові струмів бази i_B та колектора i_K транзистора також будуть синусоїдальними.

Однак для змінної складової струму опір ланцюга колектора дорівнює приведену опору ланцюга навантаження. Тому навантажувальна характеристика колекторного ланцюга по змінній складовій відрізняється від аналогічної характеристики в режимі спокою ($R_K \approx 0$).

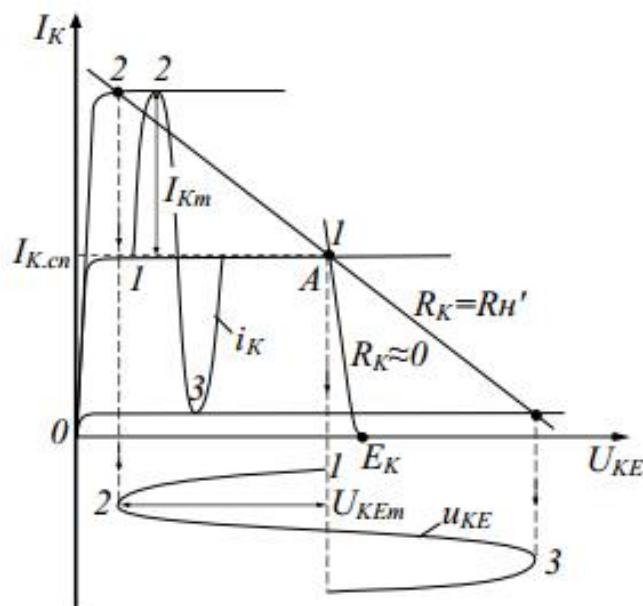


Рис. 57 – Характеристики транзистора підсилювача потужності класу А

Провівши через точку А навантажувальну характеристику по змінній складовій, побудуємо залежність зміни від часу струму колектора

$$i_K = I_{Km} \sin \omega t,$$

і напруги

$$U_{KE} = U_{KE0} - U_{KEm} \sin \omega t,$$

Потужність кола навантаження P_H та джерела сигналу P_H відповідно дорівнюють:

$$P_H = \frac{P'_H h'_{21}}{2} I_{Bm}^2$$

$$P_C = \frac{P_C + h_{11}}{2} I_{Bm}^2,$$

де I_{Bm} – амплітуда синусоїдального струму бази.
Отже, коефіцієнт підсилення потужності

$$K_P = P_H / P_C = P'_H h'_{21} / P_C + h_{11}$$

Його типове значення дорівнює 100 – 200.

Загальним недоліком підсилювачів потужності класу A є низький ККД:
100%

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\partial ж}} 100\% = \frac{1}{2} \frac{I_{Km} U_{KEm}}{E_K I_{Kcп}}$$

де $P_{\partial ж} = E_K I_{Kcп}$ та $P_H = (I_{Kcп} U_{KEm})/2$ відповідно потужності джерела живлення та кола навантаження за умови $I_{Km} < I_{Kcп}$ та $U_{KEm} < E_K$.

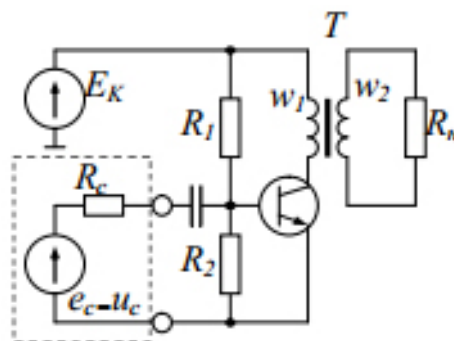


Рис. 58 – Схема підсилювача потужності класу B

Підсилювачі потужності класу B (рис. 14) відрізняються від підсилювачів потужності класу A тим, що в них робоча точка A вибирається таким чином, щоб змінна складова струму колектора була обмежена половиною періоду, як показано на рис. 15.

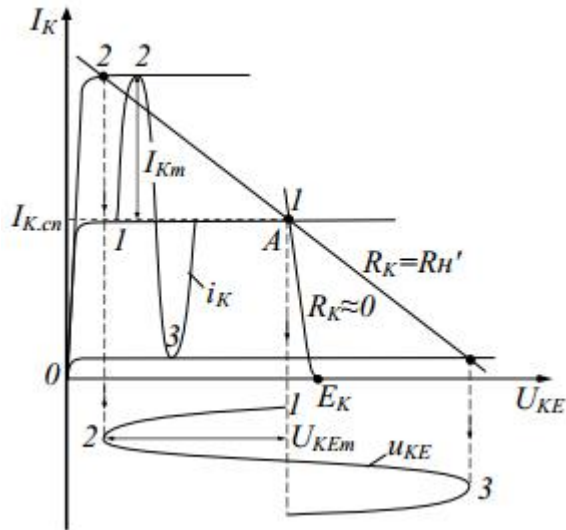


Рис. 59 – Характеристики транзистора підсилювача потужності класу А

Протягом другого напівперіоду струму в колі колектора практично немає. Застосування трансформатора для підключення приймача, як у підсилювачі потужності класу А, не дає в даному випадку великих переваг. Робоча точка А розташована так, що при обох способах підключення приймача напруга джерела живлення E_K , а отже, і його потужність, будуть практично однакові.

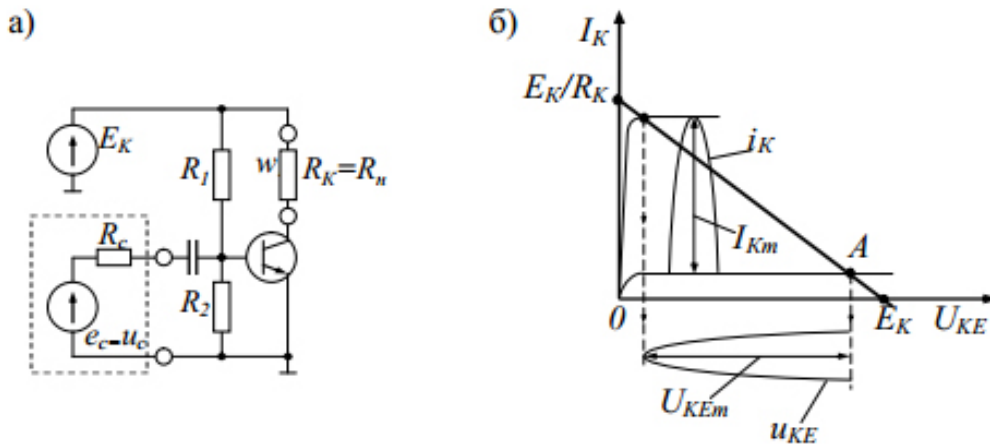


Рис. 60 – Схема підсилювача потужності класу В (а) та розташування робочої точки на вихідних характеристиках (б)

Потужність джерела живлення $P_{дж} = P_{дж} I_{Km} / \pi$, а потужність кола навантаження $P_H = R_K (I_{Km} / 2)^2 \approx E_K I_{Km} / 4$.

Отже, ККД підсилювача потужності класу В

$$\eta = \frac{P_H}{P_{дж}} 100\% \approx \frac{\pi}{4} 100\% \approx 75\%$$

Для посилення потужності синусоїдальних сигналів з високим ККД застосовують двотактні підсилювачі потужності класу В з трансформаторними зв'язками.

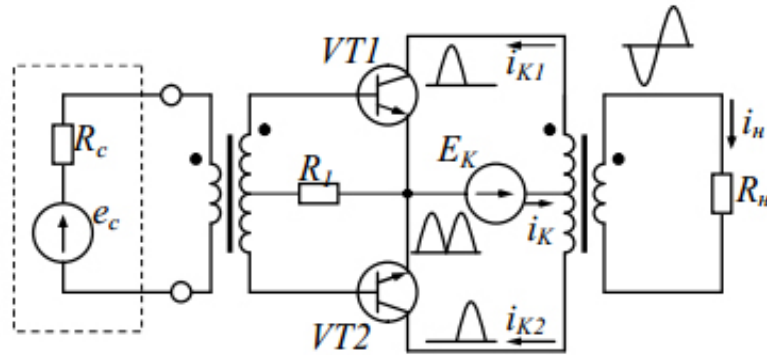


Рис. 61 – Двотактний підсилювач потужності класу В з трансформаторними зв'язками