

Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій**

Андрій Кевшин, Володимир Галян

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Луцьк

2025

УДК 539.2
К-33

Рекомендовано до друку науково–методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол №6 від 20 лютого 2025 р.).

Рецензенти: *Луньов С.В.* – доктор фіз.-мат. наук, професор, кафедра фізики та вищої математики, Луцький НТУ;

Шигорін П. П. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

К-33 Кевшин А. Г., Галян В. В. **Основи електроніки** : конспект лекцій. Луцьк, 2025. 101 с.

Конспект лекцій «Основи електроніки» – складова комплексу робочих матеріалів написаних на українській мові, створених для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузі знань 01 Освіта / Педагогіка. Видання містить теоретичний матеріал необхідний для організації повноцінної аудиторної та самостійної роботи здобувачів освіти.

Навчально-методичне видання відповідає чинним навчальним програмам підготовки й рекомендовано для здобувачів освіти спеціальності 014.15 Середня освіта (Природничі науки) першого (бакалаврського) рівня Волинського національного університету імені Лесі Українки.

УДК 539.2
© Кевшин А. Г., Галян В. В., 2025
© Луцьк, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ЛЕКЦІЯ №1. ПРЕДМЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ. ОСНОВНІ ЕТАПИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ	6
1.1. Мета, предмет та завдання електроніки як навчальної дисципліни.	6
1.2. Історія розвитку електроніки.	8
ЛЕКЦІЯ №2. ЕЛЕКТРОРАДІОКОМПОНЕНТИ	11
2.1. Резистори.	11
2.2. Конденсатори.	13
2.3. Котушки індуктивності та дроселі.	15
ЛЕКЦІЯ №3. ЛІНІЙНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ	17
3.1. Основні відомості про змінний струм.	17
3.2. Кола змінного струму з резистивним, індуктивним та ємнісним елементом.	18
ЛЕКЦІЯ №4. АКТИВНИЙ, ІНДУКТИВНИЙ ТА ЄМНІСНИЙ ОПОРИ У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ.	22
4.1. Послідовне з'єднання активного, індуктивного і ємнісного опорів.	22
4.2. Резонанс напруг.	23
4.3. Резонанс струмів.	25
ЛЕКЦІЯ №5. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ	27
5.1. Напівпровідникові матеріали.	27
5.2. Електронно-дірковий перехід (<i>p-n</i> перехід).	29
ЛЕКЦІЯ № 6. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ	32
6.1. Загальні відомості про діоди.	24
6.2. Характеристики різних типів діодів.	34
7.3. Фоторезистори.	41
7.4. Фототранзистори.	42
ЛЕКЦІЯ 7. ОПТОЕЛЕКТРОННІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ	39
7.1. Випромінюючі діоди.	39
7.2. Структура та принцип дії фотодіода.	40
ЛЕКЦІЯ 8. БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ. ПРИНЦИП ДІЇ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ	44
8.1. Будова біполярних транзисторів.	44
8.2. Принцип дії біполярних транзисторів.	45
ЛЕКЦІЯ №9. ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ	48
9.1. Характеристики схем включення біполярного транзистора.	48
9.2. Статичні вольт-амперні характеристики біполярних транзисторів.	50
ЛЕКЦІЯ 10. БУДОВА ТА ПРИНЦИП ДІЇ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ	54
10.1. Класифікація польових транзисторів.	54
10.2. Будова та принцип дії польового транзистора з керуючим <i>p-n</i> переходом.	54
10.3. Польові транзистори з ізольованим затвором.	56
10.4. Переваги та недоліки польових транзисторів над біполярними.	57
ЛЕКЦІЯ 11. ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ	59
11.1. Види та класифікація інтегральних схем.	59
11.2. Гібридна інтегральна схема.	60
11.3. Маркування інтегральних мікросхем.	61
ЛЕКЦІЯ №12. ЕЛЕКТРИЧНІ ФІЛЬТРИ	63
12.1. Загальні відомості про електричні фільтри.	63
12.2. Структури схем фільтрів.	65
12.3. Фільтри на основі котушок індуктивності і конденсаторів.	67
ЛЕКЦІЯ №13. ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ	69
13.1. Загальні відомості про підсилювачі електричних сигналів.	69

13.2. Класифікація підсилювачів.	72
ЛЕКЦІЯ №14. ГЕНЕРАТОРИ СИНУСОЇДНИХ КОЛИВАНЬ	76
14.1. Основні відомості та визначення.	76
14.2. LC-генератори.	78
15.3. RC кола для генераторів синусоїдльних коливань.	79
ЛЕКЦІЯ №15. ВИПРЯМЛЯЧІ	81
15.1. Класифікація випрямлячів.	81
15.2. Однофазний однонапівперіодний випрямляч.	82
15.3. Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом	83
15.4. Однофазний містковий випрямляч.	85
ЛЕКЦІЯ №16. СТБІЛІЗАТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ТА СТРУМУ	86
16.1. Класифікація стабілізаторів.	86
16.2. Основні параметри стабілізаторів.	88
16.3. Параметричний стабілізатор напруги.	89
ЛЕКЦІЯ 17. ПРИНЦИПИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ	92
17.1. Незатухаючі електромагнітні коливання та особливості їх утворення.	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	100

Вступ

Конспект лекцій з освітнього компонента «Основи електроніки» розроблений у відповідності до освітньо-професійної програми «Середня освіта. Природничі науки» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. У даному виданні розглядаються будова, основні фізичні принципи дії та практичні використання напівпровідникових приладів і електронних пристроїв, складених на їх основі. Здобувачі освіти мають можливість ознайомитися з елементами сучасної аналогової та цифрової електроніки, з основними ідеями та схемами, що лежить в основі функціонування цифрових радіо-, теле- та комп'ютерних систем, та тенденціями їх розвитку

Мета курсу – ознайомлення здобувачів освіти з основами сучасної електроніки, з принципами роботи елементів електричних кіл, з теоретичними основами роботи та принципами побудови електронних пристроїв, їхніми основними параметрами та властивостями, основами радіозв'язку.

Основними завданнями є:

- формування фундаментальних та теоретичних знань, які дозволяють на основі уявлення про базові елементи сучасної електроніки розуміти фізичні процеси, що в них відбуваються, принципи розробки електронних схем;
- засвоєння здобувачами освіти основ роботи електронних компонентів.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми здобувачі освіти повинні:

знати:

- будову, основні параметри і характеристики електронних компонентів;
- фізичні основи принципу роботи електронних компонентів, схеми їх вмикання;
- призначення елементів при аналізі електронних схем;
- принципи побудови схем електронних пристроїв;
- принципи радіозв'язку.

вміти:

- користуватися довідниковими даними основних параметрів та характеристик схемотехнічної бази аналогових пристроїв;
- читати електричні схеми;
- здійснювати аналіз фізичних процесів в пристроях силової та інформаційної електроніки.

ЛЕКЦІЯ 1. ПРЕДМЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ. ОСНОВНІ ЕТАПИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1. Мета, предмет та завдання електроніки як навчальної дисципліни.

Електроніка – це важлива галузь науки і техніки, яка досліджує фізичні явища та принципи роботи пристроїв, що базуються на переміщенні заряджених частинок у різних середовищах, таких як вакуум, газу і тверді тіла. Основні аспекти електроніки охоплюють:

1. *Фізичні явища:* вивчення змін у концентрації та переміщенні електронів і іонів у вакуумі, газах і твердих матеріалах. Це є основою для розуміння роботи різних електронних компонентів.
2. *Електронні прилади та їх характеристики:* аналіз електричних характеристик та параметрів електронновакуумних, іонних і напівпровідникових приладів. Ці знання необхідні для розробки та налаштування пристроїв, які використовуються у багатьох сферах.
3. *Електронні системи:* дослідження властивостей та функцій систем, які використовують ці прилади для передачі, обробки та зберігання інформації чи енергії.



Електроніку поділяють на три ключові напрями залежно від принципів роботи електронних приладів:

- **Вакуумна електроніка:** вивчає прилади, що працюють у вакуумі, такі як електронно-променеві трубки, які використовувалися у старих телевізорах, осцилографах і різних радіопристроях.

- **Твердотільна електроніка:** зосереджена на напівпровідникових приладах, зокрема транзисторах, діодах і інтегральних схемах. Це основа сучасної електроніки, що дозволяє створювати компактні, надійні й швидкодіючі пристрої, зокрема комп'ютери й смартфони.

- **Квантова електроніка:** вивчає прилади, що використовують квантові явища, наприклад, лазери та інші пристрої, які працюють на основі квантової механіки. Квантова електроніка знаходить застосування в медицині, телекомунікаціях та в квантових обчисленнях.

Історія електроніки тісно пов'язана з досягненнями в радіотехніці, адже обидві галузі активно впливали одна на одну, сприяючи спільному розвитку. Електронновакуумні та напівпровідникові прилади стали ключовими елементами радіотехнічних пристроїв, визначаючи ефективність і якість радіоапаратури. У свою чергу, потреби радіотехніки стимулювали розвиток електроніки: для вирішення нових технічних завдань створювалися нові електронні прилади і схеми, що стало основою для подальшого технологічного прогресу.

Електронні пристрої знайшли широке застосування у таких сферах:

- *Радіозв'язок і телебачення:* передачу та прийом інформації через радіохвилі, які дозволили розвивати масові засоби комунікації.

- *Звукозапис і відтворення:* технології зберігання та передачі аудіоінформації, що відкрили нові можливості для індустрії музики і кіно.

- *Радіолокація:* застосування радіохвиль для визначення місця розташування і швидкості об'єктів, що стало важливим у авіації, військовій техніці і метеорології.

- *Автоматика і телемеханіка:* управління виробничими процесами на відстані і автоматизація.

- *Атомна і ракетна техніка:* ключові технології в оборонній і космічній галузях.

- *Медицина:* діагностичне обладнання (наприклад, томографи і ультразвукові апарати).

- *Астрономія і вимірвальна техніка:* точні прилади для досліджень у науці.

Прогрес у електроніці також призвів до розвитку кібернетики – науки про управління і зв'язок у машинах і живих організмах. Кібернетика стала основою для створення високошвидкісних обчислювальних машин, які стали фундаментом для космічної техніки. Комп'ютери забезпечили можливість для запуску супутників, космічних кораблів і міжпланетних станцій, що зробило освоєння космосу реальністю.

Автоматизація і контроль виробничих процесів стали ще однією важливою сферою застосування електроніки. Розвиток роботизованих комплексів зменшив потребу у важкій ручній праці та підвищив ефективність виробництва.

Завдяки широкому впровадженню інтегральної технології стало можливим створення складних електронних вузлів на крихтих напівпровідникових кристалах. Це дозволило значно зменшити розміри електронних компонентів, підвищивши їхню продуктивність і функціональність. Зокрема, сучасні інтегральні схеми стали основою для систем автоматичної та інформаційних пристроїв, які дедалі більше впливають на всі сфери життя.

Сучасна електронна промисловість активно випускає широкий спектр інтегральних пристроїв – підсилювачів сигналів, комутаторів, логічних елементів, лічильників імпульсів, кодових ключів та дешифраторів, які застосовуються у багатьох електронних системах. Розвиток великих інтегральних мікросхем (ВІМС) та мікропроцесорів зробив революцію у створенні мікромініатюрних обчислювальних машин з високою продуктивністю, що знаходять застосування в різноманітних галузях. У надвеликих інтегральних схемах (НВІС) кількість компонентів може досягати мільйонів, що дозволяє значно підвищити потужність і функціональність електронних пристроїв.

Використання стандартних функціональних мікросхем спрощує розробку складних електронних блоків, адже зменшує потребу в детальних розрахунках для кожного каскаду. У разі, якщо типові інтегральні схеми не вирішують певної задачі, їх можна доповнити дискретними елементами, що вимагає додаткових налаштувань.

Сучасна електроніка також активно розвиває оптоелектроніку – напрямок, який об'єднує електронні й світлові сигнали, що дозволяє вирішувати завдання, які інколи складно реалізувати лише електронними засобами.

Предмет і завдання дисципліни «Електроніка»

Предмет дисципліни «Електроніка» зосереджений на:

- вивченні фізичних явищ і процесів, що лежать в основі роботи напівпровідникових приладів;
- засвоєнні принципів роботи радіоелектронних пристроїв, зокрема цифрових систем на базі напівпровідникових елементів.

Мета вивчення дисципліни:

1. Оволодіння знаннями про фізичні процеси в електротехнічних і напівпровідникових пристроях.
2. Розуміння основних принципів побудови підсилювачів і генераторів, а також функціонування систем радіозв'язку і цифрових пристроїв, які є невіддільною частиною сучасних електронно-обчислювальних машин.

Основні завдання дисципліни:

- формування знань і навичок для ефективного використання методів вимірювання у виробництві, науці та повсякденному житті;
- засвоєння основ науки про вимірювання;
- ознайомлення з перспективами розвитку електроніки;
- сприяння професійному розвитку і формуванню культури майбутніх фахівців.

Дисципліна «Електроніка» спрямована на те, щоб надати студентам не тільки технічні знання, а й підготувати їх до практичних завдань, які вони можуть зустріти у сучасному виробництві та наукових дослідженнях, формуючи професійні навички та розуміння перспективних технологій.

1.2. Історія розвитку електроніки.

Фундаментальні дослідження фізиків у XVIII–XIX століттях стали основою для розвитку електроніки, відомої сьогодні. Перші вагомі відкриття стосувалися електричних розрядів, досліджених такими вченими, як Михайло Ломоносов і Георг Ріхман. Вони вивчали електричні явища в повітрі, що допомогло краще зрозуміти природу електрики. Бенджамін Франклін також зробив вагомий внесок, особливо відомим є його дослідження блискавок і заряджених частинок.

Одним із проривів став винахід електричної дуги російським ученим Василем Петровим у 1802 році. Це відкриття створило передумови для розвитку нових методів досліджень електрики, а згодом і технологій освітлення. Важливу роль у вивченні електричних явищ також відіграло дослідження проходження струму в розряджених газах. Англійські вчені, такі як Вільям Крукс і Джозеф Джон Томсон, а також німецькі науковці, включаючи Гейслера і Плюккера, зробили значні відкриття, які стали базою для створення електронних приладів.

У 1873 році Уїллоубі Сміт винайшов фоторезистор із селену, що стало першим кроком до оптоелектроніки. У 1874 році Карл Фердинанд Браун виявив ефект односторонньої провідності на контакті «метал – напівпровідник», що заклало фундамент для напівпровідникових технологій. Водночас важливими винаходами стали лампа розжарювання, створена А. Н. Лодигінім і вдосконалена Томасом Едісоном, а також дугове освітлення, розроблене Павлом Яблочковим у 1876 році.

На межі XIX–XX століть електронна теорія почала відігравати ключову роль у формуванні електроніки як науки. Відкриття фотоелектричного ефекту Генріхом Герцем у 1887 році та закони фотоелектричного ефекту, встановлені Олександром Столетовим у 1888 році, відкрили шлях для створення фотоелектронних приладів. У 1884 році Томас Едісон виявив явище

термоелектронної емісії, хоча через недостатні знання про електрон на той час не зміг його пояснити. Лише у 1897 році Дж. Дж. Томсон відкрив електрон, а О.У. Річардсон у 1901 році провів подальші дослідження термоелектронної емісії.

Значним досягненням було також створення безпровідного зв'язку Олександром Поповим у 1895 році та Гульєльмо Марконі у 1896 році, що дало поштовх для розвитку радіотехніки. Попри спори щодо першості, ці досягнення сприяли еволюції електронних комунікаційних систем.

Подальший розвиток радіотехніки й електроніки на початку ХХ століття відзначився важливими винаходами, які заклали основу для сучасної електронної індустрії. У 1904 році англійський вчений Дж. А. Флемінг створив двохелектродну лампу-діод, яка ефективно випрямляла високочастотні коливання у радіоприймачах. Вже через два роки, у 1906-му, американський інженер Лі де Форест розробив триод, додавши до лампи керуючу сітку, що дозволило підсилювати сигнали та значно розширило можливості радіопередачі та радіоприйому.

Триод, який пізніше почав широко застосовуватись у радіотехніці, зокрема для генерації електричних коливань, зіграв визначну роль у 1913 році, коли німецький вчений Мейснер застосував його саме для цієї мети. Ці дослідження стали основою для розвитку електронних схем. У 1918–1919 роках Бонч-Бруевич розробив теорію триода, що дало можливість точно розраховувати та проєктувати електронні лампи. Німецький учений Баркгаузен проводив подібні дослідження паралельно з Бонч-Бруевичем, також вносячи значний внесок у цю галузь.

Важливі відкриття продовжувалися у 1920–30-х роках. У 1921 році Хелл запропонував магнетрон – пристрій, що пізніше стане ключовим компонентом для генерації мікрохвиль. У 1930 році був створений пентод, який став однією з найпоширеніших ламп для підсилення сигналів, забезпечуючи стабільніше та потужніше підсилення, ніж попередні моделі. Водночас Л. А. Кубецький і Фарнспорт розробили фотоелектронні помножувачі, які були важливими для розвитку оптоелектроніки.

Розвиток електронних приладів дійшов до будівництва першої електронної обчислювальної машини на основі триодних ламп, що була створена в США у 1946 році. Але справжній прорив настав у 1948 році, коли вчені з Bell Laboratories – Джон Бардін, Вільям Браттейн і Вільям Шоклі – винайшли транзистор. Це відкриття стало революційним, оскільки транзистори поступово замінили електровакуумні прилади, зробивши електроніку більш компактною, економічною та надійною. Транзистори дали потужний поштовх для мініатюризації пристроїв і розвитку нових технологій, а за своє відкриття Бардін, Браттейн і Шоклі отримали Нобелівську премію у 1956 році.

Розвиток елементної бази електроніки пройшов кілька етапів, кожен з яких сприяв мініатюризації, підвищенню продуктивності та енергоефективності електронних пристроїв:

1. *Перше покоління – електровакуумні прилади:* Перші активні елементи в електроніці були електровакуумні лампи. Дослідження термоелектронної емісії, проведені О. У. Річардсоном, заклали основу для їхнього застосування, що стало важливим етапом у розвитку телекомунікацій та обчислювальної техніки. У 1928 році Річардсон отримав Нобелівську премію за свої роботи у цій галузі. Електровакуумні прилади забезпечували надійне підсилення та генерацію сигналів, але були громіздкими і споживали багато енергії.

2. *Друге покоління – дискретні напівпровідникові прилади:* З появою транзистора у 1948 році електроніка перейшла на новий рівень. Напівпровідникові прилади, такі як діоди і транзистори, замінили електровакуумні лампи, дозволивши створювати більш компактні й економічні пристрої. Це стало можливим завдяки дослідженням у фізиці твердого тіла, а транзистори стали основою для розвитку транзисторної логіки та обчислювальних пристроїв.

3. *Третє покоління – інтегральні мікросхеми (ІМС):* У 1958 році Роберт Нойс і Джек Кілбі розробили перші інтегральні мікросхеми. Ці пристрої об'єднували багато компонентів (транзистори, резистори, конденсатори) на одному напівпровідниковому кристалі, що забезпечило мініатюризацію електронних схем та підвищення їхньої продуктивності. Джек Кілбі отримав Нобелівську премію у 2000 році за цей винахід. Зі

зменшення розмірів транзисторів у 1960-х роках інтегральні схеми дали поштовх для створення сучасної обчислювальної техніки.

4. *Четверте покоління – нанoeлектроніка*: Починаючи з останньої третини ХХ століття, електроніка увійшла в еру нанотехнологій. Наноструктури розміром від 100 до 10 нанометрів дозволяють використовувати квантові ефекти, що відкриває нові можливості для надмініатюризації електронних компонентів. Нанoeлектроніка стала основою для розробки надпотужних і надкомпактних пристроїв, таких як процесори для сучасних комп'ютерів, мобільних пристроїв і штучного інтелекту.

Отже, розвиток елементної бази електроніки від першого до четвертого покоління відображає невпинний поступ від макроскопічних приладів до нанoeлектронних систем, які зараз є фундаментом для інноваційних технологій. Кожен етап історії розвитку електроніки мав великий вплив на сучасний світ, прокладаючи шлях для новітніх досягнень.

Контрольні запитання до лекції № 1.

1. Що вивчає електроніка як *галузь науки і техніки*?
2. Що є предметом дисципліни «Електроніка»?
3. Що є метою дисципліни «Електроніка»?
4. Сформулюйте основні завдання вивчення дисципліни «Електроніка».
5. На які види можна розділити електроніку?
6. Назвіть основні етапи розвитку електроніки.
7. З яким епохальним відкриттям пов'язана справжня революція в електроніці?
8. Які прилади відносять до першого покоління елементної бази електроніки?
9. Які прилади відносять до другого покоління елементної бази електроніки?
10. Які прилади відносять до третього покоління елементної бази електроніки?

ЛЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРОРАДІОКОМПОНЕНТИ

2.1. Резистори.

Усі радіоелементи можна поділити на активні та пасивні.

1. *Активні елементи* – це компоненти, які можуть змінювати свої характеристики під дією зовнішнього електричного поля або додаткового джерела живлення. Прикладами є транзистори, діоди, інтегральні схеми, які здатні підсилювати або генерувати електричні сигнали, а також працювати як джерела енергії в електричних схемах.

2. *Пасивні елементи* – це компоненти, які лише реагують на наявний електричний сигнал, не підсилюючи його та не змінюючи свої характеристики під дією джерела живлення. Вони бувають таких основних типів:

резистори – елементи, які опираються проходженню струму, знижуючи його величину або регулюючи напругу. Існують два основні типи резисторів: *постійні резистори* – мають фіксований опір, який не змінюється під час роботи; *змінні резистори* – дозволяють регулювати опір, змінюючи силу струму або напругу в колі;

конденсатори – накопичують електричний заряд і використовуються для згладжування пульсацій, фільтрації сигналів, формування часових затримок тощо;

катушки індуктивності – створюють магнітне поле, яке використовується для зберігання енергії в колах змінного струму, а також для фільтрації і налаштування частоти в радіотехнічних пристроях.

Кожен з цих пасивних елементів виконує певні функції для керування сигналами в електричних і радіоапаратах.

Згідно із законом Ома, опір резистора можна визначити за формулою:

$$R = \frac{U}{I},$$

де R – опір резистора (вимірюється в омах, Ом), U – напруга на резисторі (у вольтах, В), I – сила струму, що проходить через резистор (в амперах, А).

У колах постійного струму резистори просто обмежують струм або задають певну величину напруги на певних ділянках кола, у колах змінного струму резистори поведуться подібним чином, але тут слід враховувати також реактивні елементи (наприклад, ємність і індуктивність), які впливають на поведінку змінного сигналу.

Потужність, яку розсіює резистор у вигляді тепла, можна розрахувати за формулою:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Розглянемо класифікацію та основні параметри резисторів.

1. Класифікація за призначенням.

Загального призначення: не мають жорстких вимог до точності й стабільності, застосовуються в побутовій техніці.

Спеціального призначення: використовуються там, де важлива підвищена стабільність і специфічні характеристики, наприклад: високочастотні – для роботи з високочастотними сигналами; високоомні – для високих значень опору (понад 10 МОм); для мікромодулів і мікрозбірок – для електронних мікросхем та мініатюрних пристроїв.

2. Класифікація за конструкцією.

Плівкові: виготовлені з тонкої плівки, нанесеної на ізоляційну основу.

Металоплівкові: мають металеву плівку, відрізняються високою точністю і стабільністю.

Металоокисні: виготовляються з оксидів металів, стійкі до високих температур.

Металодіелектричні: поєднують метал і діелектрик, добре підходять для імпульсних режимів.

Композиційні: складені з сумішшю провідникових матеріалів, можуть бути недорогими і довговічними.

Напівпровідникові: використовують напівпровідникові матеріали, що дозволяє застосовувати їх у спеціальних електронних пристроях.

3. Класифікація за типом провідного елемента.

Дротяні: мають обмотку з дроту, витримують високі потужності.

Недротяні: не мають обмоток, а використовують інші провідні матеріали, зазвичай плівкові або композиційні.

4. Типи постійних і змінних резисторів.

Постійні резистори поділяються на: *прецизійні* (високої точності), *високочастотні та імпульсні* (стійкі до швидких змін сигналів), *високовольтні* (для напруг понад 2 кВ), *високомегаомні* (для опору понад 10 МОм), *загального призначення* (для побутових приладів).

Змінні резистори поділяються на: *підлагоджувальні* – для періодичного налаштування; *регульовальні* – для частого налаштування апаратури (наприклад, регулювання гучності).

5. Основні параметри резисторів.

Номінальний опір – це значення опору резистора, вказане виробником і виражене в Ом. Це значення визначається згідно з нормативними документами і є основним параметром, який враховують при виборі резистора для конкретного електричного кола.

Номінальна потужність – це максимальна потужність, яку резистор може розсіювати у вигляді тепла без пошкодження. Потужність вказується у ватах (Вт) і визначає, яку кількість енергії резистор може витримувати протягом тривалого часу при стандартних умовах (наприклад, при певній температурі). Перевищення цього значення може призвести до перегріву і виходу резистора з ладу.

Допустиме відхилення номінального опору ΔR – це допустиме відхилення фактичного опору від номінального, виражене у відсотках. Це відхилення може бути як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення. Наприклад, якщо номінальний опір резистора становить 100 Ом, а допустиме відхилення – 5%, то фактичний опір може бути в межах від 95 до 105 Ом. Це значення вказане в технічній документації і дозволяє визначити точність резистора, що особливо важливо в схемах, де потрібна висока точність.

$$\Delta R = \frac{R_{\text{факт}} - R_{\text{ном}}}{R_{\text{ном}}} 100\%$$

Номінальний опір, номінальна потужність і допустиме відхилення можуть позначатися різними способами: цифровим, буквено-цифровим або кольоровим кодуванням.

При буквено-цифровому маркуванні значення опору резистора записується з використанням цифр і букв, де букви вказують на множники: R = 10⁰ (наприклад, 220 R = 220 Ом), K = 10³ (наприклад, 680 K = 680 кОм), M = 10⁶ (наприклад, 3M3 = 3,3 МОм), G = 10⁹ (наприклад, 4G7 = 4,7 ГОм). Числові значення резисторів стандартизовані відповідно до міжнародної системи рядів E (E6, E12, E24, E48, E96, E192), де число після літери E вказує кількість допустимих значень в одному десятковому інтервалі. Чим більше значень, тим точніше можливе налаштування резистора.

Для малогабаритних резисторів, де не вистачає місця для буквено-цифрового коду, використовується кольорове маркування у вигляді кілець. Система кольорових кодів дозволяє швидко визначити опір і точність резистора.

Кольорове маркування з 4 кільцями. Перше і друге кільце позначають перші дві цифри опору, Третє кільце – множник (10ⁿ), який показує, на яке число потрібно помножити значення, Четверте кільце вказує на допуск у % (точність).

Приклад. Якщо перше кільце червоне (2), друге чорне (0), третє коричневе (×10), а четверте золоте (±5%), то опір резистора становитиме: 20×10=200 Ом з допуском ±5%.

Кольорове маркування з 5 кільцями надає ще більшу точність, оскільки перші три кільця вказують три значущі цифри, четверте кільце – множник, а п'яте – допуск.

Кольорове кодування спрощує визначення параметрів резистора, особливо у випадках автоматизованого виробництва, де швидке і точне розпізнавання параметрів важливе.

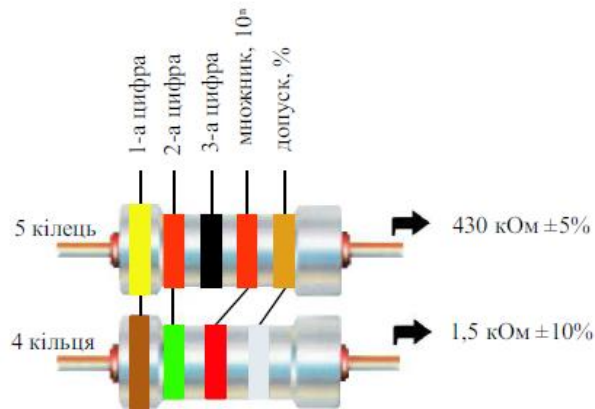


Рис. 2.1.1. Маркування резисторів

Найбільша робоча напруга $U_{\text{макс}}$ для резистора визначається його номінальним опором $R_{\text{ном}}$ та номінальною потужністю розсіювання $P_{\text{ном}}$. Це напруга, перевищення якої може призвести до перегріву струмопровідного шару або пробую ізоляції резистора.

Максимальну робочу напругу можна обчислити за формулою:

$$U_{\text{макс}} \leq \sqrt{R_{\text{ном}} \times P_{\text{ном}}}.$$

Ця формула показує, що робоча напруга залежить як від опору, так і від здатності резистора розсіювати тепло. Якщо прикладена напруга перевищує $U_{\text{макс}}$, резистор може перегрітися і вийти з ладу, особливо якщо його ізоляція не витримує надмірних електричних навантажень. Тому під час проектування електричних кіл важливо забезпечити, щоб прикладена до резистора напруга була нижчою за $U_{\text{макс}}$.

Температурний коефіцієнт опору (ТКО, α) є важливою характеристикою резистора, яка описує, як змінюється опір при зміні температури. Він визначається як відносна зміна опору при зміні температури на 1 К і виражається в одиницях 10^{-6} К:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}.$$

Змінні резистори використовуються для регулювання сили струму і напруги в колах. Вони мають три контакти: два контакти з фіксованим значенням опору, один рухомий контакт, за допомогою якого можна змінювати опір між контактами.

Типи змінних резисторів: дровові – виготовлені з намотаного дроту спеціальних сплавів, мають високу міцність та надійність; плівкові – мають резистивний шар, нанесений як плівка, забезпечують більш точне налаштування.

Терморезистори є напівпровідниковими резисторами, у яких опір значно залежить від температури. Вони поділяються на: термістори з від'ємним температурним коефіцієнтом, тобто опір зменшується при підвищенні температури та термістори з додатнім температурним коефіцієнтом, тобто опір збільшується при підвищенні температури. терморезистори використовуються в системах вимірювання та контролю температури, пожежної сигналізації, а також у багатьох інших пристроях, де потрібно враховувати температурні зміни.

Варистори – це напівпровідникові резистори з нелінійною вольт-амперною характеристикою, тобто їхній опір залежить від прикладеної напруги. За високої напруги їхній опір зменшується, а при зниженні напруги опір зростає. Варистори використовують для захисту електричних схем від перенапруг, стабілізації напруги, регулювання коефіцієнта підсилення, а також у джерелах живлення та при перетворенні сигналів.

2.2. Конденсатори.

Конденсатор – це елемент електричного кола, що може запасати електричну енергію завдяки своїй ємності. Основу його конструкції становить система з двох провідних електродів (пластин), розділених діелектриком.

Конденсатори поділяються за декількома основними критеріями.

1. Робоча напруга: низьковольтні – використовуються в низьковольтних ланцюгах (декілька вольт); високовольтні – розраховані на роботу при високих напругах (десятки, сотні кіловольт).

2. Область застосування: для малих струмів і малих напруг – наприклад, у сигнальних колах; для великих струмів і високих напруг – в силових колах, що працюють при значних навантаженнях.

3. Вид діелектрика: твердий діелектрик – з матеріалів, таких як кераміка або пластик; рідкий діелектрик – застосовується у високовольтних конденсаторах (наприклад, масло); газоподібний діелектрик – використовується у високочастотних та високовольтних конденсаторах; окисний – використовується в електролітичних конденсаторах; органічний – застосовується у спеціальних конденсаторах для певних умов.

4. Діапазон робочих частот: для постійної або пульсуючої напруги; для звукових частот (100–10,000 Гц); для радіочастотного діапазону (вище 100 кГц).

5. Призначення: широкого застосування – для загальних потреб в електроніці; спеціальні – для специфічних умов, наприклад, в імпульсних або високочастотних колах.

Розглянемо основні параметри конденсаторів

1. Номінальна ємність C – відношення накопиченого заряду q до прикладеної напруги U :

$$C = \frac{q}{U}.$$

Це основний параметр конденсатора, який визначає його здатність запасати заряд. Ємність вимірюється у фарадах (Φ).

2. Допустиме відхилення від номінального значення ємності – показує точність конденсатора, виражене у відсотках.

3. Номінальна робоча напруга – максимальна напруга, при якій конденсатор може працювати тривалий час без пошкоджень. Перевищення цього значення може призвести до пробою діелектрика.

4. Частотні властивості – показують, у якому діапазоні частот конденсатор може ефективно працювати. При високих частотах ємність конденсатора може змінюватися через індуктивні і паразитні опори.

5. Допустима амплітуда змінної напруги – максимальне значення змінної напруги, яке конденсатор може витримувати без пошкоджень.

Конденсатори мають специфічне маркування, яке дозволяє швидко дізнатися про їх основні характеристики.

1. Буква «К» – означає, що компонент є конденсатором.



2. Двозначне число після «К» – вказує на тип діелектрика, який використовується в конденсаторі. Наприклад, К10 – може позначати керамічний конденсатор; К50 – зазвичай означає електролітичний конденсатор.



3. Умовний індекс – позначає призначення конденсатора. Він може містити одну або більше букв і чисел, які дають додаткову інформацію про функціональність або область застосування конденсатора.

4. Порядковий номер розробки – ідентифікує конкретну модель або серію конденсатора. Цей номер відрізняє одну модель конденсатора від іншої в межах однієї категорії або типу діелектрика.

5. Номінальна ємність – часто позначається у пікофарадах (пФ), нанофарадах (нФ) або мікрофарадах (мкФ), в залежності від типу конденсатора. Наприклад, 100n означатиме ємність 100 нанофард.

6. Рік випуску – звичайно наноситься у вигляді двох останніх цифр року. Це важливо для конденсаторів, оскільки з часом їхні характеристики можуть змінюватися через зношування матеріалів, особливо у електролітичних конденсаторів.

Нам електричних схемах використовують наступні умовні графічні позначення конденсаторів:  – конденсатор, загальне позначення;  – конденсатор

підлагоджувальний;  – конденсатор змінної ємності;  – конденсатор постійної ємності полярний.

Конденсатори широко застосовуються у фільтрації, згладжуванні пульсацій, налаштуванні частоти, блокуванні постійного струму і багатьох інших електронних схемах.

2.3. Котушки індуктивності та дроселі.

Котушки індуктивності (КІ) є важливими елементами в електричних колах, особливо в радіоапаратурі. Вони застосовуються для створення індуктивного опору, що дозволяє регулювати проходження електричного струму різних частот. Основні типи КІ включають:

1. Котушки індуктивності для коливальних контурів – ці котушки є основними елементами коливальних контурів, які використовуються для генерації або прийому електромагнітних хвиль на певних частотах.

2. Дроселі – це котушки, які служать для обмеження змінного струму високої або низької частоти, залишаючи постійному струму вільний шлях. Дроселі зазвичай мають мінімальний опір постійному струму, але високий опір змінному струму на потрібній частоті.

Крім того, котушки індуктивності поділяються за своїм типом на: з постійною індуктивністю – індуктивність таких котушок не змінюється під час роботи та із змінною індуктивністю – індуктивність можна налаштовувати, щоб змінювати робочу частоту або інші параметри кола.

Розглянемо основні параметри котушок індуктивності та дроселів.

Індуктивність (L) – визначає здатність котушки зберігати магнітне поле й чинити опір зміні струму. Вона є відношенням потокозчеплення Ψ самоіндукції до струму I через котушку:

$$L = \frac{\Psi}{I}.$$

Чим вища індуктивність, тим більше магнітне поле, а отже, більше енергії може зберігати котушка. Вимірюється в генрі (Гн), а також у кратних одиницях — мілігенрі (мГн) і мікрогенрі (мкГн). Індуктивність залежить від кількох факторів: форми та розмірів котушки, кількості витків, матеріалу і форми осердя (феромагнітне осердя, наприклад, збільшує індуктивність до 2,5 разів).

Допустиме відхилення індуктивності – показує, наскільки реальне значення індуктивності може відрізнятись від номінального.

Добротність (Q) – характеризує ефективність котушки, залежить від втрат енергії, що відбуваються у вигляді тепла. Визначається відношенням реактивного опору котушки до її активного опору:

$$Q = \frac{\omega L}{R}.$$




Чим вища добротність, тим меншою є кількість втрат.

Власна ємність – ємність між витками котушки, яка може впливати на роботу пристрою на високих частотах.

Розрізняють наступні типи котушок індуктивності: об'ємні – мають циліндричний або квадратний переріз і зазвичай використовуються в більшості пристроїв; площинні (спіральні) – мають плоску форму й застосовуються в обмеженому просторі, як у мікросхемах.

Феромагнітні осердя підвищують індуктивність і добротність. Однак у деяких випадках, коли потрібно уникнути впливу зовнішніх полів, застосовують екранування котушки. Екран знижує вплив зовнішнього електромагнітного поля, але водночас зменшує індуктивність і добротність, збільшуючи власну ємність.

Котушки індуктивності та дроселі є основними елементами для формування фільтрів і контурів у радіотехніці, а їхні параметри мають значення для забезпечення стабільної роботи схем, особливо на високих частотах.

В електричних схемах використовують наступні графічні позначення дроселів та котушок індуктивності:  – котушка індуктивності, загальне позначення;  – котушка із змінною індуктивністю (варіометр);  – котушка індуктивності (дросель) з осердям.

Індуктивність одношарової циліндричної котушки без осердя можна розрахувати за формулою:

$$L = \left[\frac{\omega^2 D}{1000 \cdot \left(\frac{l}{D} + 0,45 \right)} \right],$$

ω – кількість витків; l – довжина намотки, мм; D – діаметр намотки, мм.

Кількість витків одношарової циліндричної котушки без осердя можна розрахувати за такою формулою:

$$\omega = 32 \sqrt{\frac{l}{D} \cdot \left(\frac{l}{D} + 0,45 \right)}.$$

При цьому діаметр проводу рівний:

$$d = \frac{l}{\omega}.$$

В електричних схемах котушки індуктивності та дроселі позначаються літерою **L** із додаванням цифрового індексу, який вказує на номер елемента в схемі. Наприклад, **L5** означає п'яту котушку індуктивності або дросель у схемі.

Таке буквено-цифрове позначення є стандартом, який допомагає легко ідентифікувати компоненти на схемах. Літера **L** була обрана з огляду на фізичний термін «індуктивність» (inductance), оскільки буква **I** вже використовується для позначення струму. Нумерація елементів (1, 2, 3, ...) йде по порядку в межах кожної окремої схеми або блоку схеми.

Контрольні запитання до лекції № 2.

1. Які радіоелементи називаються активними, а які пасивними?
2. На які групи поділяються пасивні радіоелементи?
3. Що таке резистори? Як їх поділяють залежно від області застосування?
4. Як класифікують резистори залежно від конструкції та типу провідного?
5. Назвіть основні параметри резисторів.
6. Що таке конденсатори та як їх класифікують?
7. Назвіть основні параметри конденсаторів.
8. Що таке котушки індуктивності та як їх поділяють?
9. Назвіть основні параметри дроселів та котушок індуктивності.
10. За якою формулою можна знайти індуктивність одношарової циліндричної котушки без осердя?

ЛЕКЦІЯ №3. ЛІНІЙНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1. Основні відомості про змінний струм.

Змінний струм – це струм, який змінюється з часом як за напрямком, так і за величиною (рис 3.1.1).

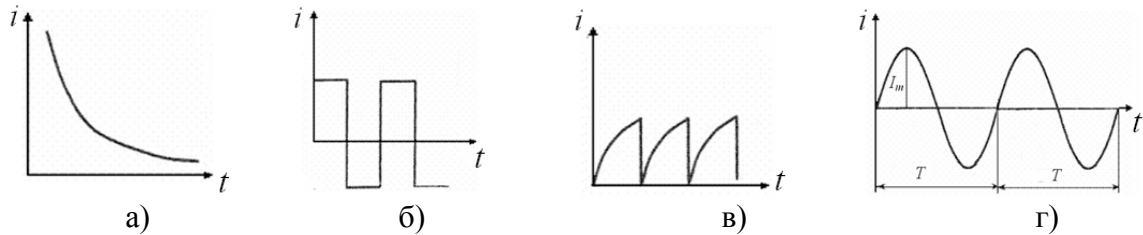


Рис. 3.1.1. Приклади змінних струмів

У теорії та на практиці, найчастіше розглядають саме синусоїдальний змінний струм, тобто той, який має форму синусоїди. Синусоїдальний струм добре підходить для енергопостачання, оскільки він створює мінімальні втрати енергії при передачі по лініях електропередач. Крім того, синусоїдальний струм має чіткі математичні залежності, що дозволяє легше прогнозувати та контролювати його характеристики.

Періодичний синусоїдальний змінний струм можна описати рівнянням:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де $i(t)$ – миттєве значення струму в момент часу t ; I_m – амплітудне значення струму (максимальна величина, яку струм досягає за один період); ω – циклічна частота; $\omega t + \varphi_0$ – фаза коливань в момент часу t ; φ_0 – початкова фаза коливань, що визначає, з якої точки синусоїда починає свій шлях у часі $t=0$. Якщо $\varphi_0 = 0$, то графік починається з нуля (як на рис. 3.1(г)), якщо $\varphi_0 > 0$, синусоїда зміщена вліво відносно початку координат, якщо $\varphi_0 < 0$, то синусоїда зміщена вправо.

Період T – це час, за який струм проходить повне коливання і повертається до свого початкового значення, вимірюється в секундах (с). Частота ν – кількість повних коливань за секунду, вимірюється в герцах (Гц). Зв'язок між періодом і частотою визначається формулою:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Циклічна частота або кутова частота ω вимірюється в радіанах за секунду (рад/с). Вона визначає, наскільки швидко змінюється фаза синусоїди з часом. Формула для циклічної частоти:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

Діюче значення струму (I) – це такий постійний струм, який виділяє за один період T таку ж кількість теплової енергії в резистивному опорі, як і синусоїдно змінний струм.

Це значення часто використовують у техніці та розрахунках, оскільки воно дозволяє розрахувати середню потужність, виділену у колі, так само як і постійний струм. Це значення часто використовують у техніці та розрахунках, оскільки воно дозволяє розрахувати середню потужність, виділену у колі, так само як і постійний струм. Зв'язок між амплітудним значенням і діючим значенням синусоїдного струму виражається формулою:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

Всі електровимірювальні прилади змінного струму показують діюче значення синусоїдних величин.

Для зручності розрахунків в електротехніці іноді використовують середнє значення змінного струму. Це середнє значення беруть як середнє арифметичне миттєвих значень протягом півперіоду коливань, оскільки повний період змінного струму містить як позитивні,

так і негативні значення, що в сумі дадуть нуль. Для синусоїдного струму, напруги чи ЕРС середнє значення за півперіод можна визначити за формулою:

$$I_c = \frac{2I_m}{\pi}; E_c = \frac{2E_m}{\pi}; U_c = \frac{2U_m}{\pi}.$$

Середнє значення важливе для оцінки роботи електричних пристроїв і компонентів, оскільки воно дає уявлення про те, яку «середню» силу струму або напругу бачить електричний елемент протягом півперіоду, коли змінний струм (напруга, електрорушійна сила (ЕРС)) має лише позитивні значення.

Всі властивості, розглянуті для змінного струму, застосовуються також і до синусоїдної ЕРС та синусоїдної напруги.

3.2. Кола змінного струму з резистивним, індуктивним та ємнісним елементом.

Розглянемо електричне коло змінного струму, яке містить лише резистивний елемент (активний опір, рис. 3.2.1).

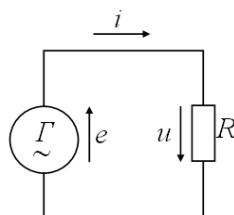


Рис. 3.2.1. Електричне коло змінного струму з активним елементом

Нехай у цьому колі напруга змінюється за синусоїдальним законом:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Згідно із законом Ома, миттєве значення струму $i(t)$ у колі з активним опором R визначається як:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R}.$$

В цьому випадку амплітудне значення сили струму I_m буде:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Цей результат демонструє, що максимальна сила струму залежить від амплітудного значення напруги та опору резистивного елемента. Такий синфазний режим є характерним тільки для кіл із чисто активним опором, де відсутня індуктивність та ємність. Таким чином, закон зміни струму в цьому колі запишеться як:

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3.2.1)$$

Порівнявши формули для $u(t)$ та $i(t)$, бачимо, що обидві величини змінюються синфазно. Це означає, що фази напруги і струму збігаються – обидві синусоїди мають однакову фазу (ωt), і максимум та мінімум струму збігаються з максимумом та мінімумом напруги (рис. 3.2.2). Таким чином, у колі з активним опором струм і напруга перебувають у фазі.

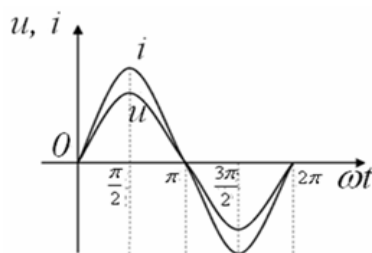


Рис. 3.2.2. Графіки миттєвих значень струму та напруги у колі з активним елементом.

Розглянемо особливості електричного кола змінного струму, яке містить ємнісний елемент (конденсатор, рис. 3.2.3).

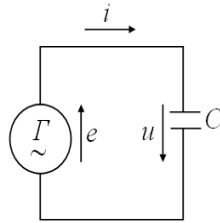


Рис. 3.2.3. Електричне коло змінного струму з ємнісним елементом

У колі з ємнісним елементом напруга $u(t)$ – це різниця потенціалів між обкладинками конденсатора. Відомо, що:

$$u(t) = \frac{q(t)}{C},$$

де $q(t)$ – заряд на обкладинках конденсатора в момент часу t , C – ємність конденсатора.

Струм $i(t)$ у колі визначається як швидкість зміни заряду з часом:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}.$$

Використовуючи вираз для напруги через заряд, можна записати:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

Нехай струм змінюється за законом (3.2.1). Тоді маємо:

$$I_m \sin \omega t = C \frac{du(t)}{dt}.$$

Звідси:

$$du(t) = \frac{I_m}{C} \sin \omega t dt$$

$$u(t) = -\frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

де $\frac{I_m}{C\omega} = U_m$ – амплітудне значення напруги на конденсаторі.

Величину $R_c = X_c = \frac{1}{C\omega}$ називають ємнісним опором конденсатора. Тоді амплітудне значення напруги можна виразити як:

$$U_m = I_m X_c.$$

Порівнюючи закони зміни струму та напруги, видно, що в колі з ємнісним елементом коливання струму випереджають коливання напруги на $\frac{\pi}{2}$. Це означає, що максимум струму досягається на чверть періоду раніше, ніж максимум напруги на конденсаторі (рис. 3.2.4):

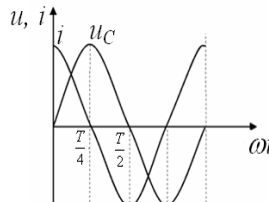


Рис. 3.2.4. Графіки миттєвих значень струму та напруги у колі з ємнісним елементом.

Розглянемо характеристики електричного кола змінного струму, що містить індуктивний елемент (котушку індуктивності, рис. 3.2.5).

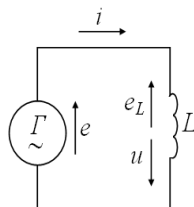


Рис. 3.2.5. Електричне коло змінного струму з індуктивним елементом.

Коло з індуктивним елементом – це коло, де наявна індуктивність L , але активний та ємнісний опори є дуже малими.

Нехай струм змінюється за законом (3.2.1). Він викликає появу електрорушійної сили самоіндукції e_L у котушці індуктивності, яка визначається як:

$$e_L(t) = -L \frac{di(t)}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t = -E_{Lm} \cos \omega t,$$

де $E_{Lm} = \omega L I_m$ – амплітудне значення електрорушійної сили самоіндукції.

Використовуючи друге правило Кірхгофа і припускаючи, що активний опір котушки дорівнює нулю, отримаємо:

$$u = -e_L = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

де $U_m = \omega L I_m$ – амплітудне значення напруги на котушці індуктивності.

Величину $R_L = X_L = L\omega$ називають індуктивним опором котушки. Тоді амплітудне значення напруги на індуктивному елементі можна виразити як:

$$U_m = I_m X_L$$

Як бачимо, у колі з індуктивністю напруга випереджає струм на кут $\frac{\pi}{2}$. Це означає, що максимум напруги досягається на чверть періоду раніше, ніж максимум струму (рис. 3.2.6).

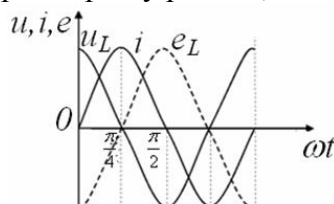


Рис. 3.2.6. Графіки миттєвих значень струму напруги та ЕРС самоіндукції у колі з індуктивним елементом.

Якщо коло містить одночасно активний (R), ємнісний (X_C), та індуктивний (X_L) опори, загальний опір кола визначається як повний опір Z . Для нього виконується:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

де $X = X_L - X_C$ – повний реактивний опір.

Підставляючи значення для X_L та X_C маємо:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Для ділянки кола змінного струму закон Ома записується як:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2}},$$

де I та U – діючі значення струму та напруги, відповідно. Враховуючи, що $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, отримаємо:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}.$$

Контрольні запитання до лекції №3

1. Назвіть основні переваги синусоїдального струму у порівнянні з постійним.
2. Як математично записується закон зміни синусоїдального струму?
3. Що розуміють під миттєвим значенням змінного струму?
4. Що розуміють під періодом та частотою зміни струму?
5. Що називається діючим значенням струму?
6. Який зв'язок між діючими та амплітудними значеннями струму, напруги та ЕРС?
7. Як відбуваються коливання значення струму у порівнянні з коливаннями напруги у колі з активним, індуктивним та ємнісним елементом?
8. За якою формулою можна знайти індуктивний та ємнісний опір?
9. За якою формулою визначається повний реактивний опір?
10. За якою формулою можна знайти повний опір кола?

ЛЕКЦІЯ №4. АКТИВНИЙ, ІНДУКТИВНИЙ ТА ЄМНІСНИЙ ОПОРИ У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ.

4.1. Послідовне з'єднання активного, індуктивного і ємнісного опорів.

Розглянемо нерозгалужене електричне коло змінного струму, яке містить послідовне з'єднання активного опору R , індуктивності L та ємності C (рис. 4.1.1)

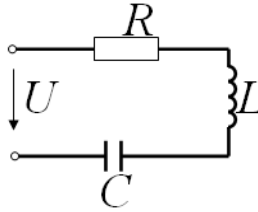


Рис. 4.1.1. Схема з послідовно з'єднаних R , L і C елементів.

У такому колі відбувається складний процес взаємодії напруг і струму, а саме: активна напруга $U_R = IR$ збігається по фазі зі струмом I , індуктивна напруга $U_L = I\omega L$ випереджає струм на 90° , ємнісна напруга $U_C = I \frac{1}{\omega C}$ відстає від струму на 90° . Через протилежні фази індуктивної та ємнісної напруг, вони віднімаються одна від одної. Різниця між ними визначає загальну реактивну напругу в колі. Якщо індуктивна напруга більша за ємнісну, результуюча реактивна напруга U буде випереджати струм на 90° :

$$U = I\omega L - I \frac{1}{\omega C} = I \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right),$$

де $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ – реактивний.

Прикладена до кола напруга U утворює гіпотенузу прямокутного трикутника напруг, де активна напруга U_R і реактивна напруга U_X є катетами (рис. 4.1.2):

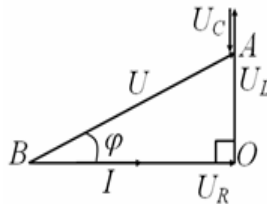


Рис. 4.1.2. «Трикутник» напруг для кола з послідовно з'єднаних R , L і C елементів.

Таким чином, для напруги в колі виконується:

$$U^2 = U_R^2 + U_X^2 = I^2 R^2 + I^2 X^2 = I^2 (R^2 + X^2),$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$$

Останній вираз виражає закон Ома для кола з послідовно з'єднаними R , L , C елементами. Поділивши усі сторони трикутника напруг на струм I , одержимо трикутник опорів (рис. 4.1.3):

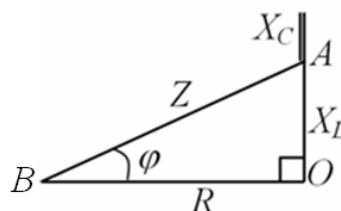


Рис. 4.1.3. «Трикутник» опорів для кола з послідовно з'єднаних R , L і C елементів.

З рисунку можемо записати:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}.$$

Якщо трикутник напруг помножити на струм I , отримаємо трикутник потужностей (рис. 4.1.4):

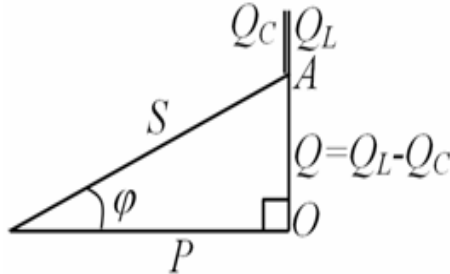


Рис. 4.1.4. «Трикутник» потужностей для кола з послідовно з'єднаних R , L і C елементів.

де $P = U_R I = I^2 R$ – активна потужність; $Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = I^2 (X_L - X_C)$ – реактивна потужність; $S = IU = I^2 Z = \sqrt{P^2 + Q^2}$ – повна потужність.

Із вказаного вище можна зробити наступні висновки про режими роботи кола.

1) *Індуктивний характер кола* (напруга випереджає струм). Якщо $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} > 0$, тобто індуктивний опір більший за ємнісний, тоді напруга випереджає струм на кут φ , і кут зсуву фаз $\varphi > 0$. Таке коло називають індуктивним, і воно має характеристику, подібну до чисто індуктивного навантаження.

2) *Ємнісний характер кола* (напруга відстає від струму). Якщо $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} < 0$, тобто ємнісний опір більший за індуктивний, тоді напруга відстає від струму на кут φ , і кут зсуву фаз $\varphi < 0$. У цьому випадку коло має ємнісний характер, подібний до чисто ємнісного навантаження.

3) *Резонанс напруг* (індуктивний та ємнісний опори рівні). Якщо $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$, тобто індуктивний і ємнісний опори однакові, кут зсуву фаз $\varphi = 0$. Це означає, що напруга і струм кола збігаються по фазі. У такому режимі коло перебуває в *резонансі напруг*, де повний опір Z дорівнює лише активному опору R , і всі реактивні компоненти компенсуються. Резонансний режим характерний тим, що струм у колі досягає максимального значення, оскільки реактивний опір зникає.

4.2. Резонанс напруг.

Резонанс в електричному колі – це особливий режим, при якому коло з реактивними елементами (індуктивністю та ємністю) поводить себе як активний опір. В умовах резонансу напруга і струм збігаються по фазі, тобто кут зсуву фаз між ними дорівнює нулю ($\varphi = 0$). Це означає, що повний опір кола складається лише з активного опору R , а індуктивні та ємнісні опори компенсують один одного (рис. 4.2.1).

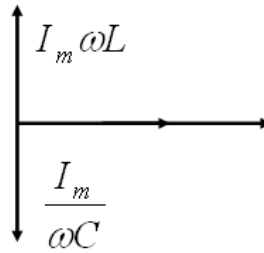


Рис. 4.2.1. Векторна діаграма при резонансі напруг в ідеальному контурі.

Отже можемо записати:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Звідси:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \text{ або } 2\pi\nu L = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

При деякій частоті $\nu_{\text{рез}}$, яка називається резонансною, буде виконуватися умова $X_L = X_C$:

$$2\pi\nu_{\text{рез}}L = \frac{1}{2\pi\nu_{\text{рез}}C}.$$

Звідси

$$\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Резонанс у послідовному *RLC*-контурі – це фізичне явище, при якому амплітуда вимушених коливань струму різко зростає, коли частота прикладеної змінної напруги збігається з власною частотою контуру. У разі досягнення резонансу амплітуда струму різко зростає, оскільки опір усього контуру є лише активним опором R , а загальний опір Z контуру мінімізується. Закон Ома для кола з послідовним з'єднанням при резонансі набуває вигляду:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Це означає, що величина струму залежить тільки від прикладеної напруги U та активного опору R . За зменшення активного опору струм може різко зростати, а при збільшенні R струм зменшується, що послаблює резонанс (рис. 4.2.2):

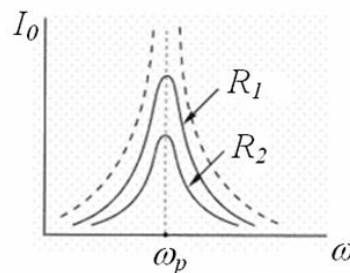


Рис. 4.2.2. Хід резонансних кривих при різних значеннях активного опору ($R_1 < R_2 < R_3$)

Резонанс широко використовується в радіотехніці та електротехніці для налаштування коливальних контурів на певну частоту. Наприклад, радіоприймачі використовують резонанс для вибору сигналу на конкретній частоті, відфільтровуючи небажані частоти. Водночас резонанс може бути небезпечним у силових електричних колах, оскільки значні струми й напруги на окремих ділянках можуть пошкодити обладнання, викликати перегрів елементів чи навіть їх руйнування. Таким чином, резонанс – це корисний, але потенційно небезпечний режим, що потребує контролю та обмеження, особливо у випадках, де високі напруги можуть зашкодити колу.

4.3. Резонанс струмів.

У паралельному коливальному контурі, що складається з індуктивного та ємнісного елементів, може виникати явище резонансу струмів (рис. 4.3.1).

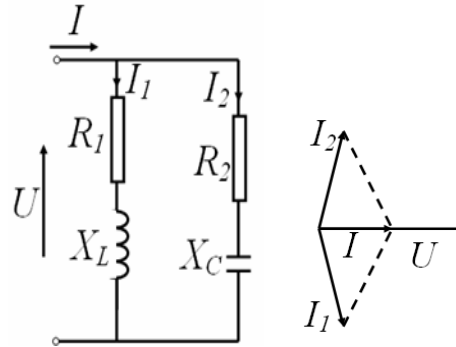


Рис. 4.3.1. Схема і векторна діаграма електричного кола за умови резонансу струмів

Це відбувається тоді, коли частота живлення збігається з власною частотою контуру, що призводить до особливого стану, в якому струми в індуктивній та ємнісній гілках (позначимо їх як I_1 та I_2) досягають значно більших значень порівняно зі струмом, який контур споживає від джерела.

У резонансному стані струми I_1 та I_2 у паралельних гілках контуру мають фазове зміщення, близьке до 180° (тобто вони практично протилежні за фазою). В ідеальному випадку (при відсутності активних опорів $R_1=R_2=0$) зміщення фаз між цими струмами становить точно 180° , і вони повністю взаємно компенсуються, тобто загальний реактивний струм кола дорівнює нулю:

$$I_p = I_{1p} - I_{2p} = 0.$$

Це означає, що загальний реактивний струм у контурі дорівнює нулю, а залишковий струм I , що протікає через джерело, складається тільки з активної складової. Він буде дуже малим, навіть якщо струми в кожній гілці великі. Це дозволяє контуру споживати значно меншу потужність, порівняно з сумою потужностей, що проходять через окремі елементи.

Запишемо I_{1p} та I_{2p} через напруги і провідності і одержимо умову виникнення резонансу струмів:

$$Ub_L = Ub_C.$$

Звідси:

$$b_L = b_C.$$

Запишемо вирази для b_L і b_C :

$$\frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}, \text{ або } \frac{2\pi\nu L}{R_1^2 + (2\pi\nu L)^2} = \frac{1/2\pi\nu C}{R_2^2 + (1/2\pi\nu C)^2}.$$

Звідси:

$$\nu_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}.$$

Коли $R_1 = R_2 = 0$, то

$$\nu_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

У резонансному стані $\cos \varphi = 0$, тобто вся потужність, що передається від джерела, є активною потужністю P , а реактивна потужність $Q = Q_L - Q_C = 0$. Це означає, що паралельний контур у резонансі споживає мінімальну потужність від джерела.

Резонанс струмів можна досягти двома способами: змінюючи параметри контуру (індуктивність L , ємність C) для заданої частоти живлення, або, навпаки, підбираючи частоту джерела живлення для фіксованих значень L та C .

Контрольні запитання до лекції №4

1. Схематично зобразити «трикутник» напруг для кола з послідовно з'єднаних R , L і C елементів.
2. Схематично зобразити «трикутник» опорів для кола з послідовно з'єднаних R , L і C елементів.
3. Схематично зобразити «трикутник» потужностей для кола з послідовно з'єднаних R , L і C елементів.
4. Визначте умову резонансу напруг в колі змінного струму.
5. Намалювати векторну діаграму для резонансу напруг в колі змінного струму.
6. Доведіть, що в колі змінного струму з послідовним включенням декількох елементів можливі умови, при яких напруга на будь-якому з елементів буде перевищувати напругу на вході кола.
7. Визначте умову резонансу струму в колі змінного струму.
8. Намалювати векторну діаграму для резонансу струму в колі змінного струму.
9. Доведіть, що в колі змінного струму з паралельним включенням декількох елементів можливі умови, при яких струм у будь-якій гілці буде перевищувати струм нерозгалуженої ділянки.
10. Як можна досягти резонансу напруг та резонансу струму в колі змінного струму?

ЛЕКЦІЯ 5. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

5.1. Напівпровідникові матеріали.

Напівпровідники — це клас твердих речовин, які мають електричні властивості, проміжні між провідниками та діелектриками. Їхня питома електропровідність (σ) менша, ніж у металів, але значно більша, ніж у діелектриків: для діелектриків вона дуже низька ($\sigma < 10^{-10} \frac{Cm}{m}$), для металів висока (понад $\sigma = 10^7 \frac{Cm}{m}$), а для напівпровідників — проміжна ($\sigma = 10^{-10} \dots 10^3 \frac{Cm}{m}$).

Серед характерних особливостей напівпровідників можна виділити наступне. Електропровідність напівпровідників значно змінюється з підвищенням температури. На відміну від металів, у яких підвищення температури зменшує провідність, у напівпровідниках вона зростає. Введення домішок у напівпровідник (наприклад, додавання атомів з 3-ї або 5-ї групи періодичної таблиці в кристалічну решітку кремнію чи германію) може значно змінити його провідність, утворюючи так звані *p*- та *n*-*типи* провідності. Напівпровідники є чутливими до світла, іонізуючого випромінювання та інших енергетичних впливів, які можуть створювати додаткові носії заряду, збільшуючи електропровідність матеріалу.

Основні напівпровідникові матеріали — це германій і кремній. Обидва належать до 4-ї групи періодичної системи і мають по чотири валентні електрони, що дозволяє їм формувати ковалентні зв'язки з чотирма сусідніми атомами, утворюючи кристалічну решітку, де кожен атом знаходиться у вершині тетраедра (рис. 5.1.1):

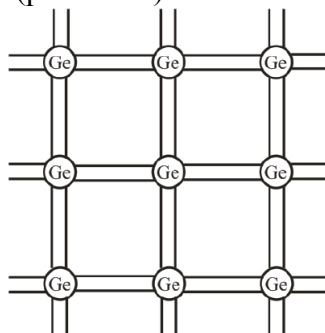


Рис. 5.1.1. Кристалічна решітка кристалу германію.

У ідеальному напівпровіднику при температурі абсолютного нуля всі електрони пов'язані з атомами, тому матеріал не має вільних зарядів і є ідеальним діелектриком. Однак за наявності енергетичного впливу (наприклад, тепла або світла) деякі електрони отримують достатню енергію, щоб відірватися від своїх атомів, утворюючи вільні електрони і «дірки» в кристалічній структурі. Коли електрони отримують достатню енергію для відриву від атомів, вони стають вільними і можуть переміщатися під дією електричного поля, створюючи електричний струм. Провідність, що забезпечується такими вільними електронами, називається електронною або *n*-*провідністю* (від англійського слова «negative» — через негативний заряд електрона). Коли електрон залишає атом, він залишає за собою порожнє місце в кристалічній решітці, яке називається *діркою*. Дірка поводить як «позитивний заряд», і сусідні електрони можуть «заповнювати» ці дірки, залишаючи інші дірки в своїх колишніх місцях. Таке переміщення дірок створює додатковий струм, і ця форма провідності називається *дірковою* або *p*-*провідністю* (від слова «positive»).

Коли кристал напівпровідника (наприклад, германію) поміщають у зовнішнє електричне поле, електрони рухаються в напрямку дії сил цього поля, а дірки — у протилежному напрямку, що забезпечує струм у кристалі. Утворення вільних електронів і дірок дозволяє напівпровіднику проводити електричний струм, хоча його електропровідність все одно залишається нижчою, ніж у металів.

У чистому напівпровіднику, або власному напівпровіднику, при кімнатній температурі відбувається безперервний процес утворення пар електрон-дірка (тобто зв'язки між атомами руйнуються і з'являються вільні електрони та дірки) та їх рекомбінація. У результаті виникає динамічна рівновага: концентрація електронів дорівнює концентрації дірок, що забезпечує власну провідність напівпровідника. У власному напівпровіднику електропровідність обумовлена лише електронами та дірками, які виникають через розрив парноелектронних зв'язків у кристалічній структурі. Відсутність зовнішніх домішок означає, що вільні електрони й дірки з'являються внаслідок теплового збудження атомів. Електропровідність напівпровідників може суттєво збільшитися при додаванні домішок. Якщо, наприклад, у кристал германію внести домішки п'ятивалентного миш'яку, атоми миш'яку створять ковалентні зв'язки з атомами германію, використовуючи лише чотири з п'яти своїх валентних електронів. П'ятий електрон у кожному атомі миш'яку виявляється зайвим, він слабо зв'язаний з атомом і легко може відокремитися, стаючи вільним електроном, що підвищує провідність матеріалу (рис. 5.1.2):

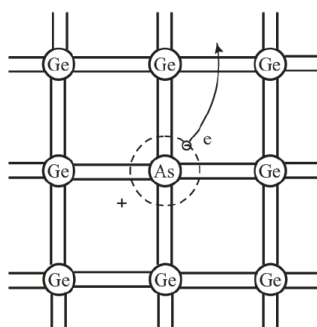


Рис. 5.1.2. Виникнення вільного електрона в кристалі напівпровідника *n*-типу.

Домішки, що віддають додаткові електрони (як миш'як у германії), називаються донорними домішками, а електропровідність, що виникає через такі домішки, називається електронною або *n*-типом провідності. Ці домішки створюють вільні електрони (негативно заряджені частинки), тому символ «*n*» позначає негативний тип провідності. У такому напівпровіднику основні носії зарядів — електрони, а дірки є неосновними носіями.

Якщо в напівпровідник вводять акцепторну домішку (трьохвалентні елементи, такі як індій), вона створює дірки. Трьохвалентний атом (індій) формує три зв'язки з сусідніми атомами, але четвертий залишається незаповненим, утворюючи дірку — незайняте місце, яке може заповнювати електрон із сусіднього атома (рис. 5.1.3):

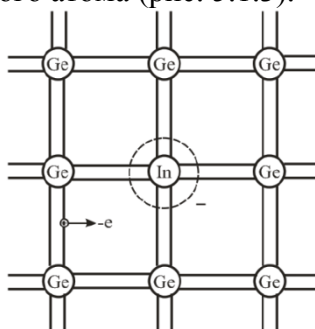


Рис. 5.1.3. Виникнення дірки в кристалі напівпровідника *p*-типу.

Захопивши електрон, атом індію перетворюється на нерухомий негативний іон, але створюється нова дірка. У такому напівпровіднику основні носії зарядів — дірки, а електрони є неосновними носіями.

Таким чином, внесення донорних або акцепторних домішок значно збільшує концентрацію вільних електронів у напівпровіднику, що значно підвищує його провідність. Це явище широко використовується в напівпровідниковій техніці для створення транзисторів, діодів та інших компонентів, що мають контрольовані електричні властивості.

У напівпровідниках носії зарядів можуть переміщуватися через два механізми.

1. Дрейф (дрейфовий рух). Рух носіїв зарядів (електронів або дірок) під дією зовнішнього електричного поля. Цей рух створює дрейфовий струм.

2. Дифузія (дифузійний рух). Рух носіїв зарядів через різницю їх концентрацій у різних ділянках напівпровідника. Наприклад, якщо концентрація зарядів більша в одній частині матеріалу, носії починають переміщуватися в області з меншою концентрацією. Це явище виникає через нерівномірність умов (вплив світла, тепла, поля тощо) і формує дифузійний струм.

У напівпровіднику загальний електричний струм є сумою дрейфового і дифузійного струмів.

5.2. Електронно-дірковий перехід (p - n перехід).

Робота більшості напівпровідникових приладів базується на властивостях, які виникають на межі контакту двох областей монокристалічного напівпровідника з різними типами провідності — p - та n -типу. Цей контакт, відомий як p - n перехід, є основою функціонування багатьох напівпровідникових компонентів, таких як діоди, транзистори, світлодіоди та фотодіоди. p - n перехід — це область контакту між двома частинами одного монокристалу напівпровідника, які мають різні типи провідності: p -тип з дірковими носіями заряду і n -тип з електронними носіями. Це ключовий елемент більшості напівпровідникових приладів, оскільки він має унікальні властивості, які дозволяють контролювати потік струму і створюють основу для роботи діодів, транзисторів та інших електронних компонентів.

На межі контакту напівпровідника з p -типом провідності та n -типом провідності дірки з p -області починають дифундувати в n -область, а електрони з n -області — в p -область (рис. 5.2.1):

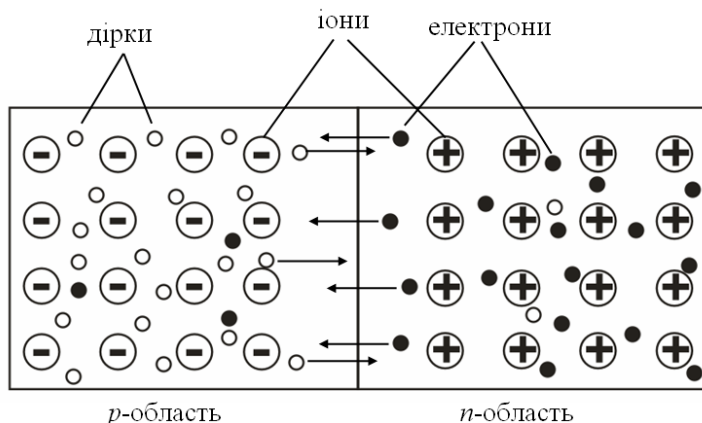


Рис. 5.2.1. Початковий момент утворення p - n переходу

Це взаємне переміщення зарядів створює дифузійний струм. У результаті цього перерозподілу частина рухомих носіїв (дірок і електронів) рекомбінує, тобто взаємно знищується, створюючи область з дуже малою концентрацією рухомих носіїв. Коли дірка з області p потрапляє в область n , вона зустрічається з електроном — основним носієм заряду в n -області. Через високу ймовірність зустрічі електрон і дірка рекомбінують, тобто взаємно «знищуються», утворюючи нейтральний атом. Після рекомбінації дірка і електрон зникають, але залишаються нерухомі іони домішок: негативно заряджені іони акцепторних домішок в p -області та позитивно заряджені іони донорних домішок у n -області. Ці нерухомі іони, що не скомпенсовані після рекомбінації, створюють шар просторових зарядів біля межі p - n переходу. Утворений шар, відомий як заірний шар або зона виснаження, має дуже низьку концентрацію рухомих носіїв заряду (електронів і дірок), оскільки більшість з них рекомбінує на межі розділу.

Нерухомі іони у заірному шарі створюють електричне поле з певною напруженістю \vec{E} , яке спрямоване від позитивних іонів у n -області до негативних іонів у p -області. Це поле перешкоджає подальшій дифузії носіїв через межу p - n переходу. Виникає потенціальний бар'єр, який не дозволяє електронам і діркам легко перетинати p - n перехід. Різницю

потенціалів між p - та n -областями, що утворює цей бар'єр, називають контактною різницею потенціалів $\Delta\varphi_k$ (рис. 5.2.2):

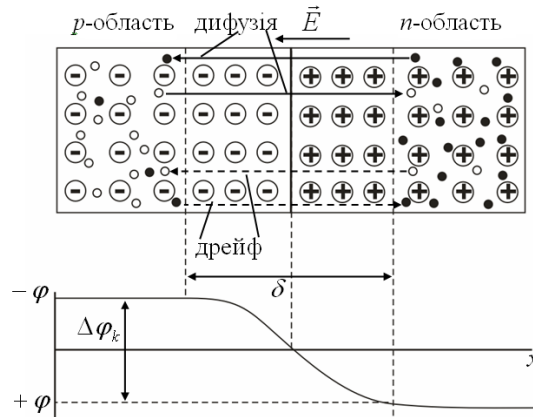


Рис. 5.2.2. Електронно-дірковий перехід при відсутності зовнішньої напруги.

Діаграма показує потенціальний бар'єр для: електронів, що прагнуть дифундувати з n -області в p -область або для дірок, що прагнуть рухатися в зворотному напрямку. Якщо відкласти позитивний потенціал вгору, бар'єр для електронів і дірок буде відображений симетрично.

Розглянемо випадок, коли до p - n -переходу прикладається зовнішня напруга в режимі прямого включення, тобто до p -області подається позитивний полюс джерела, а до n -області — негативний (рис. 5.2.3).

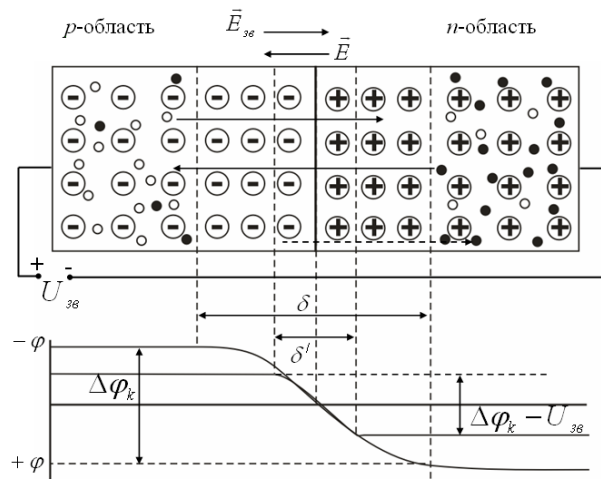


Рис. 5.2.3. Пряме зміщення p - n -переходу.

Це створює зовнішнє електричне поле з напруженістю $\vec{E}_{зв}$, яке спрямоване протилежно до поля потенціального бар'єру \vec{E} . Це призводить до зменшення висоти бар'єру, що спрощує перенесення носіїв заряду через перехід. Результуюча напруженість зменшується і буде рівною:

$$E_{рез} = E - E_{зв}$$

Отже, при прямій полярності зовнішньої напруги потенціальний бар'єр знижується, що дозволяє основним носіям (діркам у p -області та електронам у n -області) проходити через межу розділу. Ширина запірного шару зменшується, опір переходу падає, і основні носії починають інjektуватися в сусідню область, де стають неосновними носіями. Основні носії рекомбінують у новій області, а зовнішнє джерело компенсує витрату цих зарядів.

Якщо p -область сильніше легована, основний струм створюється переважно дірками, якщо n -область сильніше легована, струм створюють переважно електрони. Область із сильнішим легуванням називається емітером, а слабше легована область — базою.

При зворотній напрузі потенціальний бар'єр зростає, заірний шар розширюється, і основні носії вже не можуть пройти через межу розділу. Струм через перехід утворюється за рахунок неосновних носіїв, які присутні в напівпровіднику у невеликій кількості. Ці неосновні носії прискорюються електричним полем у заірному шарі, проходять через перехід, і процес називається екстракцією.

Контрольні запитання до лекції № 5.

1. Які матеріали називаються напівпровідниками?
2. Назвіть характерні особливості напівпровідників.
3. Які напівпровідники називаються власними?
4. Перелічіть носії заряду, які забезпечують електропровідність напівпровідників.
5. Які зовнішні фактори, які впливають на електропровідність напівпровідників?
6. Що таке n та p провідність напівпровідників?
7. Які домішки називаються донорними, а які акцепторними?
8. Що таке поле потенціального бар'єру і як воно утворюється?
9. Поясніть суть дифузійної та дрейфової складової струму p - n -переходу.
10. Які області називаються емітером, базою та колектором?

ЛЕКЦІЯ 6. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

6.1. Загальні відомості про діоди.

Напівпровідниковий діод – це двошполюсний електронний компонент, основна функція якого – пропускати електричний струм лише в одному напрямку. Діод має один p - n перехід, створений шляхом контакту напівпровідників із різним типом провідності: p -область – напівпровідник із дірковою провідністю, а n -область – напівпровідник із електронною провідністю.

Для з'єднання із зовнішнім електричним колом діод має електроди: анод (А) і катод (К) (рис. 6.1.1).

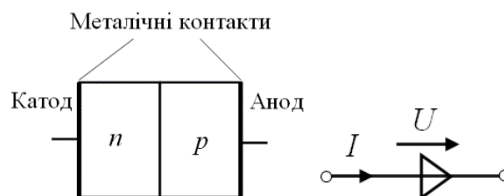


Рис. 6.1.1. Спрощена структура (а) та схематичне зображення (б) діода

При подачі на анод «+», потенціальний бар'єр зменшується, діод пропускає прямий струм, а якщо катод позитивний щодо анода, то потенціальний бар'єр збільшується, і струм обмежується малим струмом насичення (зворотний струм).

Більшість діодів базуються на несиметричних p - n переходах, де одна область легована значно сильніше (емітер). Емітер – область із високою концентрацією домішок, має низький опір. База – область із меншою концентрацією домішок, характеризується вищим об'ємним опором.

Використовують наступну класифікацію діодів.

1. За призначенням.

Випрямні діоди – використовуються для перетворення змінного струму на постійний.

Високочастотні (ВЧ) і надвисокочастотні (НВЧ) діоди – працюють у радіотехніці.

Імпульсні діоди – призначені для роботи в імпульсних схемах.

Стабілітрони – використовуються для стабілізації напруги.

Тунельні діоди – експлуатують квантово-механічний ефект тунелювання.

Варикапи – діоди зі змінною ємністю, застосовуються у частотно-налаштовуваних схемах.

Обернені діоди – використовуються для швидкого перемикавання.

2. За конструктивно-технологічними особливостями.

Площинні діоди – має p - n перехід, виконаний на площині кристалу.

Точкові діоди – використовують точковий контакт між металом і напівпровідником.

3. За типом матеріалу:

Германієві – працюють за низької напруги та температури.

Кремнієві – стійкіші до високих температур і напруги.

Арсеніде-галієві – використовуються у високочастотній техніці (радіо, оптика).

Точкові діоди є цікавим прикладом напівпровідникових приладів, які мають унікальні характеристики завдяки своїй конструкції. Для виготовлення такої діода використовують тонку пластинку з германію або кремнію з електропровідністю n -типу та розмірами: товщина 0,1–0,6 мм, площа 0,5–1,5 мм². До пластинки дотикається голка – загострений металевий провідник з нанесеною домішкою, яка змінює тип провідності при контакті (рис. 6.1.2). Голка створює напівсферичний p - n перехід, коли домішки дифундують у напівпровідник. Завдяки маленькій площі p - n переходу діод має низьку бар'єрну ємність, що критично важливо для високочастотних застосувань.

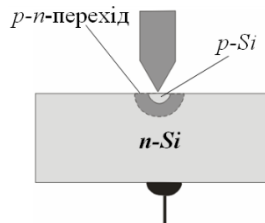


Рис. 6.1.2. Структура точкового діода

Основні властивості точкових діодів.

1. Мала бар'єрна ємність. Через малу площу переходу (у межах декількох квадратних мікрометрів) точкові діоди мають дуже низьку ємність. Це дозволяє їм працювати на частотах від десятків мегагерц до кількох гігагерц.

2. Швидкість перемикання. Завдяки низькій ємності та малій площі, точкові діоди мають короткий час перемикання між провідним і непровідним станами.

3. Стабільність у ВЧ і НВЧ застосуваннях. Вони можуть працювати на високих частотах і в пристроях надвисокочастотної техніки, таких як генератори, підсилювачі та детектори.

Даний тип діодів знаходять використовують для детектування радіосигналів завдяки їх швидкості та чутливості. Вони також входять до складу генераторів високих частот, застосовуються в швидкісних електронних комутаційних схемах. Проте мала площа контакту робить їх менш потужними в порівнянні з площинними діодами.

Площинні діоди є поширеним типом напівпровідникових приладів, які широко використовуються завдяки простоті виготовлення та можливості забезпечити великі струми і високі напруги. Розмір $p-n$ переходу у них значно більший за ширину переходу, а площа переходу варіюється від декількох часток квадратного міліметра до десятків квадратних сантиметрів, залежно від призначення.

Основою діода є пластинка напівпровідника (германію або кремнію). Область із вищою концентрацією домішок (емітер) створюється або вплавленням, або дифузією домішки.

Для виготовлення площинних діодів використовують наступні методи.

1) Метод сплаву (вплавлення). При температурі близько $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ у пластинку напівпровідника вплавляють краплю іншого матеріалу (наприклад, індію для p -типу або сурми для n -типу). Ця крапля формує область з іншим типом провідності, створюючи $p-n$ перехід. Контакти зазвичай виконуються з нікелю (рис. 6.1.3, а).

2) Метод дифузії. Атоми домішок дифундують у поверхню напівпровідника. Для створення p -шару використовують бор або алюміній для кремнію або індій для германію (рис. 6.1.3, б). Цей метод дає змогу точніше контролювати параметри $p-n$ переходу, що робить його популярним у сучасній промисловості.

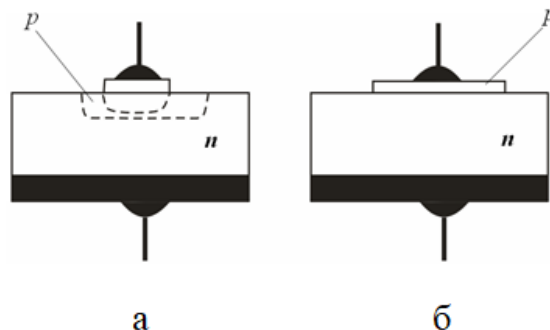


Рис. 6.1.3. Будова площинних діодів: а – виготовлений сплавним методом; б – виготовлений дифузійним методом

Для виготовлення площинних діодів використовують переважно германій та кремній.
Германієві діоди:

- працюють при зворотній напрузі 100–400 В;
- робочий температурний діапазон: -60 °С до +70...85 °С.

Кремнієві діоди:

- витримують зворотну напругу до 1000–1500 В, що значно перевищує можливості германієвих діодів;
- робочий температурний діапазон: -60 °С до +120...150 °С;
- більш стійкі до перегріву, що робить їх популярними в потужній електроніці.

Серед переваг площинних діодів можна виділити наступні:

- висока потужність завдяки великій площі переходу;
- здатність працювати при високих струмах і напругах;
- широкий вибір матеріалів залежно від умов роботи.

Проте велика площа переходу збільшує бар'єрну ємність, що обмежує роботу на високих частотах.

6.2. Характеристики різних типів діодів.

Випрямляючі діоди є ключовими компонентами електронних схем, які використовуються для перетворення змінного струму на постійний. Розглянемо детальніше їх характеристики, параметри та основні особливості.

Випрямляючі діоди використовуються для випрямлення змінного струму, перетворюючи його на постійний. Працюють у схемах випрямлячів (однопівперіодних і двопівперіодних), не мають спеціальних вимог до швидкодії або ємності р-п переходу. Характерними рисами таких діодів є їхній малий опір у провідному стані, велика площа р-п переходу, що забезпечує здатність пропускати високі струми, висока бар'єрна ємність, яка може сягати десятків мікрофарад, через що ці діоди не підходять для високочастотних застосувань.

Основні параметри випрямляючих діодів відносять.

1) Максимальний прямий струм ($I_{пр.макс.}$) – найбільше значення струму, яке діод може пропускати у прямому напрямку без пошкоджень протягом тривалого часу. Цим визначається потужність діода.

2) Допустима зворотна напруга ($U_{зв.дон.}$) – максимальне значення напруги у зворотному напрямку, яке діод може витримувати без руйнування. Важливий параметр для забезпечення надійності в умовах змінного струму.

3) Пряма напруга ($U_{пр.}$) – напруга, яка прикладається до діода у провідному напрямку, коли через нього проходить певний струм. Для кремнієвих діодів зазвичай становить 0,7 В, а для германієвих – 0,3 В.

4) Зворотний струм ($I_{зв.}$) – невеликий струм, що протікає через діод при зворотній полярності і визначається характеристиками матеріалу.

На рис. 6.2.1 показано вольт-амперну характеристику діода.

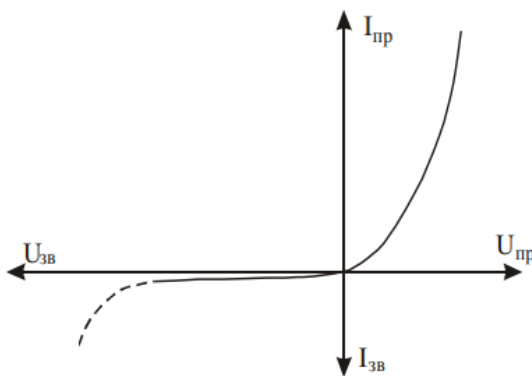


Рис. 6.2.1. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода

Електричний пробій, який зазвичай є небажаним для випрямляючих діодів, знаходить корисне застосування у стабілітронах – спеціальних напівпровідникових діодах, що використовуються для стабілізації напруги. Стабілітрон – це напівпровідниковий діод, який спеціально розроблений для роботи в режимі зворотного пробію, що використовується для стабілізації напруги в електронних схемах. У стабілітрона на зворотній ділянці ВАХ є область, де при досягненні напруги пробію (напруги стабілізації) спостерігається різке зростання струму при практично незмінній напрузі (рис. 6.2.1).

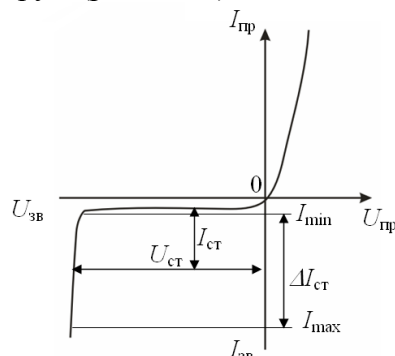


Рис. 6.2.1. Вольт-амперна характеристика стабілітрона.

Стабілітрон працює в режимі стабілізації напруги, коли до нього прикладена напруга, що перевищує напругу пробію. У цьому режимі зворотний струм різко зростає, а опір стабілітрона падає, що дозволяє стабілізувати вихідну напругу.

З вольт-амперної характеристики стабілітрона можна виділити наступні параметри. Напруга стабілізації $U_{ст}$ – це напруга, при якій стабілітрон входить в область пробію і починає виконувати функцію стабілізації. $I_{ст}$ – номінальний струм стабілізації, при якому забезпечується тривала і стабільна робота. I_{min} – мінімальний струм, необхідний для стабілізації, I_{max} – максимальний струм, перевищення якого може призвести до пошкодження стабілітрона

На рисунку 6.2.2 зображено схему із стабілітроном та резистором.

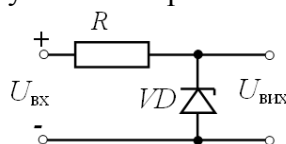


Рис. 6.2.2. Стабілізація напруги.

Складові схеми: стабілітрон VD (з'єднаний паралельно виходу), резистор R (включений послідовно на вході), вхідна напруга $U_{вх}$, вихідна напруга $U_{вих}$. Вхідна напруга $U_{вх}$ повинна бути вищою за напругу стабілізації стабілітрона U_C . Напруга стабілізації U_C залишається незмінною при роботі в режимі пробію ($U_{вих} = U_C$). Резистор R обмежує струм через стабілітрон і створює спад напруги $U_R = U_{вх} - U_C$. Для зміни вихідної напруги можна використовувати стабілітрон із іншою напругою стабілізації або підбирати опір резистора.

Розглянемо основні параметри стабілітрона.

1. Номінальна напруга стабілізації ($U_{ст ном}$) – це напруга на стабілітроні в робочому режимі, при якій він стабілізує вихідну напругу. Зазвичай відповідає заданому номінальному струму стабілізації $I_{ст ном}$.

2. Мінімальний струм стабілізації ($I_{ст.min}$) – найменше значення струму, при якому стабілітрон входить у режим стійкого пробію і виконує функцію стабілізації. Якщо струм через стабілітрон менший за це значення, стабілізація напруги порушується.

3. Максимально допустимий струм стабілізації ($I_{ст.max}$) – найбільший струм, при якому стабілітрон працює без пошкоджень. Перевищення цього струму може призвести до перегріву та виходу з ладу.

4. Диференціальний опір ($r_{диф}$) – параметр, що характеризує зміну напруги стабілізації при зміні струму:

$$r_{\partial u \phi} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}},$$

де ΔU_{cm} – приріст напруги, а ΔI_{cm} – приріст струму. Низький диференціальний опір забезпечує більш стабільну вихідну напругу.

5. Температурний коефіцієнт напруги стабілізації (α_{cm}) – відображає вплив температури навколишнього середовища на напругу стабілізації:

$$\alpha_{cm} = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T},$$

де ΔT – зміна температури.

Тунельний діод – це напівпровідниковий діод, у якого p - n -перехід створено із двох вироджених напівпровідників з надзвичайно високою концентрацією носіїв заряду ($\sim 10^{19}$ см³ і більше). Завдяки цьому в діоді проявляється тунельний ефект, що впливає на його унікальні властивості.

Тунельний ефект – квантове явище, за якого електрони можуть проходити крізь потенціальний бар'єр, навіть якщо їх енергія недостатня для його подолання. Умови для тунелювання: потенціальний бар'єр має бути вузьким і низьким; на іншому боці бар'єру має бути доступний енергетичний рівень, на який може перейти електрон.

При невеликій прямій напрузі виникає тунельний струм, оскільки електрони тунелюють із n -області в p -область. Струм досягає піку I_{Π} при напрузі U_{Π} . З подальшим збільшенням напруги кількість електронів, здатних тунелювати, зменшується, і струм спадає до впадини (I_B , U_B) (рис. 6.2.3):

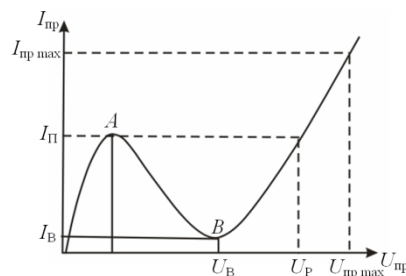


Рис. 6.2.3. Воль-амперна характеристика тунельного діода

ВАХ тунельного діода має спадну ділянку (AB), де диференційний опір від'ємний. Це означає, що зі збільшенням напруги струм зменшується. Завдяки цій властивості тунельні діоди використовуються для генерації та підсилення сигналів.

Основними параметрами тунельного діода є:

1. Піковий струм (I_{Π}) – максимальний струм на прямій ділянці ВАХ.
2. Струм впадини (I_B) – мінімальний струм на спадній ділянці ВАХ.
3. Напруга піка (U_{Π}) – напруга, при якій струм досягає максимуму.
4. Напруга впадини (U_B) – напруга, при якій струм досягає мінімуму.
5. Напруга розчину (U_P) – напруга, більша за U_B , при якій струм знову стає рівним I_{Π} .

Тунельні діоди використовують для створення генераторів ВЧ-коливань, підсилення сигналів, в перемикачах і імпульсних схемах завдяки швидкодії.

Варикап – це спеціалізований напівпровідниковий діод, який використовує залежність бар'єрної ємності p - n -переходу від величини прикладеної зворотної напруги. Його можна уявити як конденсатор, ємність якого змінюється під дією електричного сигналу.

Варикап працює в режимі зворотного зміщення, тобто на нього подається зворотна напруга (U), яка змінює ширину запірного шару p - n -переходу. Ємність варикапа зменшується зі збільшенням зворотної напруги. Ця залежність описується формулою:

$$C = C_0 \left[\frac{U_k}{U_k + |U|} \right]^{\frac{1}{n}},$$

де C_0 – початкова ємність при нульовій зворотній напрузі;
 U_k – контактна різниця потенціалів;
 $n=2$ для різких p - n -переходів і $n=3$ для плавних;
 U – прикладена зворотна напруга. Максимальна ємність досягається при $U=0$.

Вольт-фарадна характеристика відображає зміну ємності варикапа залежно від зворотної напруги (рис. 6.2.4):

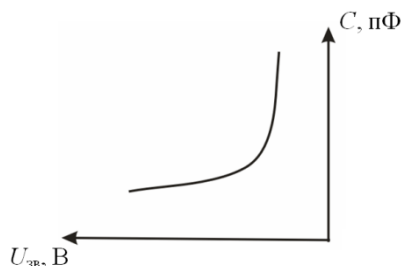


Рис. 6.2.4. Вольт-фарадна характеристика варикапа

Розглянемо основні параметри варикапа.

1. Загальна ємність (C_{ϵ}) – ємність, виміряна при певній зворотній напрузі (наприклад, $U=5$ В). Значення складають десятки-сотні пФ.

2. Коефіцієнт перекриття по ємності (K_n) – визначається як відношення ємностей при двох крайніх значеннях зворотної напруги:

$$K_n = \frac{C_{\epsilon \max}}{C_{\epsilon \min}}.$$

Зазвичай рівний $K_n=5-8$.

3. Добротність (Q):

$$Q = \frac{X_C}{r_{II}},$$

де X_C – реактивний опір варикапа, а r_{II} – опір активних втрат.

4. Зворотний струм ($I_{зв}$) – постійний струм, що протікає через варикап у зворотному напрямку при заданій напрузі.

5. Температурний коефіцієнт ємності (α) визначає відносну зміну ємності на кожен градус зміни температури:

$$\alpha = \frac{\Delta C}{C \Delta T}.$$

Варикапи використовуються як елементи з керованою ємністю у коливальних контурах з перебудовою частоти (Наприклад, у тюнерах телевізорів і радіоприймачів), схемах розподілу і множення частоти, у генераторах для зміни частоти коливань, у фазових модуляторах і антенних системах.

Випромінюючий діод – це напівпровідниковий діод, який генерує світлове або інфрачервоне випромінювання в області p - n переходу під час проходження через нього прямого струму. Випромінювання виходить через прозору пластину, що входить до корпусу діода.

Розрізняють наступні типи випромінюючих діодів: 1) світлодіоди (LEDs) – генерують випромінювання у видимій області спектра (використовуються для підсвічування, індикаторів і в дисплеях); 2) інфрачервоні діоди (ІЧ-діоди) – генерують випромінювання у інфрачервоній області спектра (застосовуються в дистанційних пультах управління, оптичних сенсорах і системах нічного бачення).

Коли через діод протікає прямий струм, електрони з n -області переходять у p -область і рекомбінують із дірками. Під час рекомбінації виділяються кванти енергії у вигляді фотонів. Енергія фотона залежить від ширини забороненої зони напівпровідника. Колір випромінювання світлодіодів залежить від енергетичного зазору (E_g) між валентною зоною і

зоною провідності: червоне світло випромінюється коли вузький енергетичний зазор; синє світло – при широкому енергетичному зазорі.

Корпус діода забезпечує спрямоване випромінювання і мінімізацію втрат. Прозора пластина дозволяє випромінюванню вільно виходити назовні. Для підвищення ефективності випромінювання використовують матеріали з високим коефіцієнтом квантового виходу, такі як GaAs, GaP, InGaN тощо.

Схематичне позначення різних типів діодів на базі *p-n* переходу показано на рис. 6.2.5:

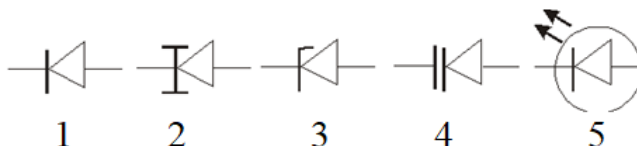


Рис. 6.2.5. Позначення діодів: 1 – випрямляючий діод; 2 – тунельний діод; 3 – стабілітрон; 4 – варикап; 5 – випромінюючий діод (світлодіод).

Контрольні запитання до лекції № 6.

1. Що називають напівпровідниковим діодом?
2. Як на діод подати пряме зміщення?
3. Як класифікуються напівпровідникові діоди?
4. Поясніть особливості будови площинних та точкових діодів.
5. Як символно позначаються напівпровідникові діоди?
6. Які діоди називаються випрямляючими? Назвіть їхні основні параметри.
7. Що таке стабілітрони? Якими основними параметрами вони характеризуються?
8. Що таке тунельні діоди? Назвіть основні параметри тунельних діодів?
9. Що таке варикапи? Назвіть основні параметри, за якими характеризуються варикапи.
10. Що таке випромінюючі діоди? На чому ґрунтується їхній принцип роботи?

ЛЕКЦІЯ 7. ОПТОЕЛЕКТРОННІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

7.1. Випромінюючі діоди.

Оптоелектроніка є міждисциплінарною галуззю, яка досліджує фізичні явища, пов'язані із взаємодією світла та електричних процесів у матеріалах, зокрема в напівпровідниках. Основними аспектами оптоелектроніки є перетворення світлової енергії на електричну та навпаки, що знаходить застосування у багатьох пристроях.

Оптоелектронні прилади можна класифікувати наступним чином.

1) Світловипромінювачі – це пристрої, які перетворюють електричну енергію на світлову. Наприклад, світлодіоди (LED) – некогерентне випромінювання, лазери – когерентне випромінювання.

2) Фотоприймачі – перетворюють світлові сигнали на електричні. Сюди відносять фотодіоди – використовуються в датчиках, камерах, фототранзистори – застосовуються у світлочутливих колах.

3) Фотогальванічні елементи (фотоперетворювачі) – пристрої, які перетворюють енергію світла на електричну безпосередньо (наприклад, сонячні батареї).

Розглянемо основні аспекти світлодіодів. Світлодіод складається з p - n переходу, у якому наявні емітер – сильно легована n -область, яка інjektує електрони, та база – слабколегована p -область, де відбувається випромінювальна рекомбінація (рис. 7.1.1). Омичні контакти забезпечують підключення до зовнішнього джерела струму. При подачі прямого зміщення (напруга на p - n переході спрямована в прямому напрямку), електрони з емітера інjektуються в базу де відбувається їхня рекомбінація з дірками внаслідок чого виділяється енергія у вигляді квантів світла.

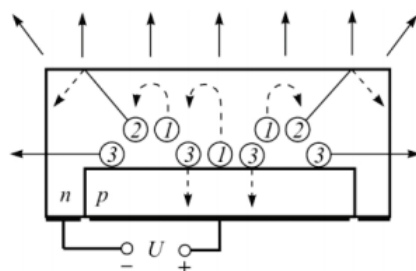


Рис. 7.1.1. Випромінювальний p - n перехід. Втрати оптичного випромінювання: 1 – на власне поглинання; 2 – на повне внутрішнє відбиття; 3 – на зворотне й торцеве випромінювання.

Світлодіоди працюють як в інфрачервоному, так і у видимому діапазонах спектра. Це залежить від властивостей матеріалу та ширини забороненої зони. Для генерації світла напруга на світлодіоді має перевищувати порогову ($U > U_{\text{пор}}$), яка визначається контактною різницею потенціалів. Для зменшення невивипромінювальних рекомбінацій використовуються спеціальні напівпровідникові сполуки, такі як InSb, GaAs, GaP, InP, SiC. Вони забезпечують високу ефективність перетворення енергії.

Зовнішній квантовий вихід ($\eta_{\text{зовн}}$) – це відношення кількості фотонів, які залишають світлодіод, до кількості носіїв, що рекомбінують у базі. Внутрішній квантовий вихід ($\eta_{\text{внт}}$) – це відношення кількості фотонів, що згенеровані в активній зоні, до кількості носіїв, які беруть участь у рекомбінації. При цьому справджується співвідношення:

$$\eta_{\text{внт}} > \eta_{\text{зовн}}$$

Це пов'язано з тим, що існують:

1) Втрати на поглинання. Деякі фотони поглинаються матеріалом напівпровідника, не виходячи за межі діода. Причинами є взаємодія фотонів з атомами решітки або домішками.

2) Втрати через повне внутрішнє відбиття. Через різницю показників заломлення напівпровідника і повітря частина світла залишається всередині кристала через ефект внутрішнього відбиття.

3) Втрати на зворотне і торцеве випромінювання. Фотони, які випромінюються у напрямках, відмінних від виходу (наприклад, у зворотний бік або через бокові поверхні), не потрапляють до зовнішнього середовища.

Для збільшення $\eta_{зовн}$ використовуються наступні технології.

1) Антирефлексійні покриття. Наносять на поверхню кристала для зменшення втрат на внутрішнє відбиття.

2) Оптимізація форми кристала. Використовують спеціальні геометричні форми, такі як куполоподібні оболонки, для спрямування світла до виходу (рис. 7.1.2).

3) Підвищення внутрішньої ефективності. Використовують напівпровідники з високою ймовірністю випромінювальної рекомбінації.

4) Покращення тепловідведення. Надмірний нагрів зменшує ефективність світлодіодів, тому застосовують теплопровідні матеріали.

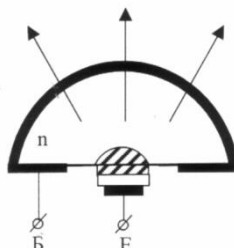


Рис. 7.1.2. Будова світлодіода з прозорим півсферичним покриттям.

Світлодіоди з можливістю керування кольором світіння є прикладом інноваційного підходу до розробки оптоелектронних пристроїв. Розглянемо особливості конструкції і принцип їх роботи.

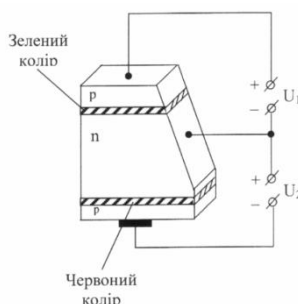


Рис. 7.1.3. Структура світлодіода з перестроюваним кольором свічення.

Двоперехідна структура діода з керуванням світінням зображена на рис. 7.1.3. У кристалі GaP (галій-фосфід) створено два p-n переходи, які випромінюють світло різних кольорів: перший перехід випромінює червоний колір, другий перехід випромінює зелений колір. Ці переходи можуть працювати одночасно або незалежно один від одного. Завдяки явищу змішування кольорів у видимому спектрі, одночасна активація червоного і зеленого переходів дає жовтий колір. Регулюючи струм через кожен з переходів, можна змінювати інтенсивність випромінювання кожного кольору, що дозволяє отримати широкий спектр кольорів: від жовто-зеленого (переважання зеленого) до жовто-червоного (переважання червоного). Можна також отримувати чистий червоний або зелений колір, активуючи відповідний перехід.

7.2. Структура та принцип дії фотодіода.

Фотодіоди є ключовими компонентами у системах, де потрібно перетворювати світлову енергію на електричні сигнали. Їх основна перевага – висока чутливість до світлового випромінювання та швидкість реакції. Розглянемо їхню конструкцію, принцип дії та основні характеристики.

Основними елементами фотодіода є кристал напівпровідника із p-n переходом, розташований так, щоб світловий потік падав на нього через скляне вікно (рис. 7.2.1).

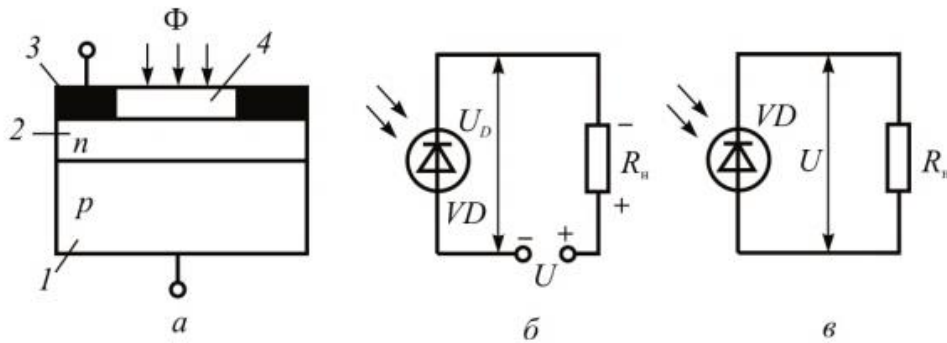


Рис. 7.2.1. Структура (а) та схеми вмикання (б, в) фотодіода: 1 – емітер; 2 – база; 3 – металеві електроди; 4 – прозоре вікно

Активна зона – область поблизу $p-n$ переходу, де відбувається основна дія світла. Для збільшення чутливості активну зону формують тонкою, що забезпечує ефективне поглинання світла та генерацію носіїв заряду. Під дією світлового потоку у напівпровіднику виникає генерація пар електрон-дірка: фотони поглинаються у кристалі, передаючи свою енергію електронам, що переходять із валентної зони до зони провідності. Генерація пар найбільш ефективна в області поблизу $p-n$ переходу. При цьому під дією дифузійного електричного поля фотоелектрони рухаються до області n , а фотодірки – до області p . Переміщення носіїв заряду створює фотоелектрорушійну силу (фотоЕРС, $E_{\phi} = (0.1-1) \text{ В}$). ФотоЕРС спричиняє протікання фотоструму I_{ϕ} через зовнішнє коло, який збігається за напрямком із зворотним струмом $p-n$ переходу.

У фотодіоді створюється зворотне зміщення, тобто до p -області прикладається негативна напруга, а до n -області – позитивна. Зворотне зміщення розширює область просторового заряду, що підвищує чутливість фотодіода до світла. Якщо світловий потік відсутній, через фотодіод протікає темновий струм I_T , зумовлений тепловою генерацією носіїв заряду. Темновий струм є небажаним, оскільки він обмежує мінімальну чутливість фотодіода.

Крім темного струму через фотодіод буде протікати фотострум I_{ϕ} створений під дією світла і який залежить від інтенсивності світлового потоку. Загальний струм буде рівним:

$$I = I_{\phi} + I_T$$

Розрізняють наступні режими роботи фотодіода:

- 1) Фотогальванічний режим – фотодіод працює без зовнішнього зміщення, фотострум створює невелику напругу у зовнішньому колі.
- 2) Режим зворотного зміщення – зовнішня напруга збільшує область просторового заряду, знижуючи рекомбінацію і підвищуючи чутливість фотодіода.

Фотодіоди є критично важливими елементами в оптоелектроніці, їх точна робота дозволяє використовувати їх у різноманітних системах: від оптоволоконного зв'язку до датчиків освітлення.

7.3. Фоторезистори.

Фоторезистор – це простий, але ефективний напівпровідниковий пристрій, який змінює свій електричний опір залежно від інтенсивності світла. Під дією світла (оптичного випромінювання) енергія фотонів збуджує електрони у напівпровіднику. Електрони переходять із валентної зони до зони провідності, створюючи пари носіїв заряду: електронів та дірок. Збільшення концентрації носіїв заряду знижує опір фоторезистора: чим сильніше освітлення, тим менший опір. У відсутності світла опір фоторезистора залишається високим через малу кількість носіїв заряду (електронів і дірок).

Фотопровідність ζ_{ϕ} – це величина, яка характеризує зміну провідності матеріалу під дією світлового потоку:

$$\xi_{\phi} = q(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p),$$

де Δn , Δp – збільшення концентрацій зарядів внаслідок опромінення; μ_n , μ_p – рухливості позитивних і негативних зарядів.

Структура фоторезистора базується на фоточутливому шарі, нанесеному на діелектричну підкладку, і включає металеві електроди для підключення до електричного кола (рис. 7.3.1).

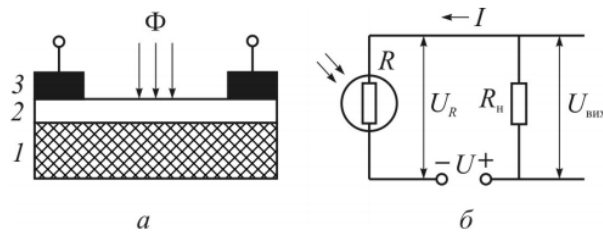


Рис. 7.3.1. Структура (а) та схема вмикання (б) фоторезистора: 1 – діелектрична підкладка; 2 – фоточутливий шар; 3 – металеві електроди.

Розглянемо деталі описаної конструкції.

1. Фоточутливий шар – основний елемент, який реагує на світло. Матеріали, які використовуються, мають напівпровідникові властивості, зокрема: селенід свинцю (PbSe) – чутливий до інфрачервоного випромінювання, сульфід свинцю (PbS) – чутливий до ближнього інфрачервоного діапазону, селенід кадмію (CdSe) та сульфід кадмію (CdS) – чутливі до видимого світла.

2. Підкладка – зазвичай діелектрична, забезпечує стабільність і ізоляцію фоточутливого шару.

3. Металеві електроди. Застосовуються для забезпечення контакту між напівпровідниковим шаром і зовнішнім електричним колом.

Під впливом світла відбувається збудження електронів у фоточутливому шарі, що зменшує опір фоторезистора. Чим більше інтенсивність світла, тим менший опір. Такі матеріали, як PbSe і CdS, вибирають залежно від діапазону випромінювання, який потрібно детектувати (інфрачервоний, видимий спектр тощо).

Фоторезистор є пасивним елементом, що змінює свій електричний опір залежно від інтенсивності світлового потоку Φ , який падає на його поверхню. Щоб через фоторезистор протікав струм, необхідно підключити до нього напругу живлення U .

Формула для загального струму в колі з фоторезистором:

$$I_{\text{заг}} = I_m + I_{\phi},$$

де I_m – темновий струм, який протікає через фоторезистор при відсутності світла ($\Phi=0$). Він зазвичай є дуже малим через низьку провідність напівпровідникового шару в темряві; I_{ϕ} – фотострум, що виникає під дією світлового потоку. Чим більша інтенсивність світла, тим більший фотострум.

7.4. Фототранзистори.

Фототранзистор (ФТ) – це біполярний транзистор, у якому керування колекторним струмом (I_K) здійснюється за рахунок світлового потоку, що падає на його базову область. Він використовується для перетворення світлових сигналів в електричні з одночасним підсиленням струму.

У ФТ фотонісії (електрони та дірки) генеруються в базовій області під дією світла (внаслідок внутрішнього фотоэффекту). Це викликає початковий фотострум у базі I_{ϕ} , який згодом підсилюється транзисторним коефіцієнтом підсилення (β). Загальний колекторний струм визначається як:

$$I_K = \beta I_{\phi}.$$

У стандартному включенні база фототранзистора відключена від зовнішнього електричного кола, а її потенціал бази регулюється виключно інтенсивністю світла (рис. 7.4.1). Такий режим спрощує схему підключення, оскільки не потребує подачі базового струму, і дозволяє керувати транзистором лише за допомогою світла.

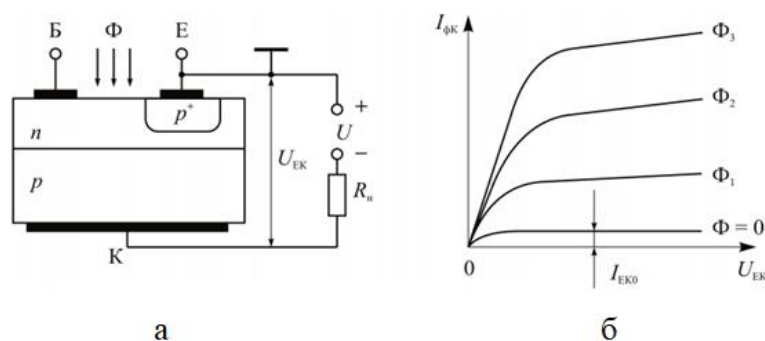


Рис. 7.4.1. Структура (а) та ВАХ (б) біполярного фото транзистора.

ФТ найчастіше включають у зовнішнє електричне коло за схемою із спільним емітером. Це забезпечує високий коефіцієнт підсилення вихідного сигналу.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) фототранзистора схожі на вихідні характеристики звичайного біполярного транзистора. Однак замість струму бази I_B ключовим керувальним параметром є світловий потік Φ . При збільшенні Φ , струм через колектор (I_K) зростає, оскільки генерується більше носіїв заряду. Характеристика має вигляд залежності $I_K = f(U_{KE}, \Phi)$, де U_{KE} – напруга між колектором і емітером. Якщо $\Phi=0$, через фототранзистор протікає тільки темновий струм (I_m), який визначається зворотним струмом колекторного переходу (I_{KE0}). Темновий струм є дуже малим, але не дорівнює нулю через присутність теплової генерації носіїв заряду.

Основна перевага фототранзисторів полягає у високому коефіцієнті інтегральної чутливості: він у β разів перевищує аналогічний параметр для фотодіодів, завдяки підсилювальному ефекту транзистора. Це робить фототранзистори особливо ефективними у схемах, де потрібне підсилення світлових сигналів. Швидкодія фототранзистора залежить від часу життя неосновних носіїв заряду у базовій області. Для більшості фототранзисторів цей час становить $10^{-7} \dots 10^{-6}$ с. Внаслідок цього фототранзистори поступаються фотодіодам у високочастотних застосуваннях (наприклад, у телекомунікаціях або оптичних передавачах).

Фототранзистор може працювати з підключеною базою, коли до неї подається керуюча напруга або струм. Електричне керування дозволяє змінювати фотострум незалежно від світлового потоку Φ . Недоліком такого режиму є падіння інтегральної чутливості через зміну балансу між електричним і світловим керуванням.

Контрольні запитання до лекції № 7.

1. Які прилади називаються оптоелектронними?
2. Що таке напівпровідниковий випромінюючий діод?
3. Зобразіть структурну схему світлодіода та поясніть принцип його роботи.
4. Що розуміють під зовнішнім квантовим виходом світлодіода?
5. Зобразіть структуру світлодіода з перестроюваним кольором свічення.
6. Що називається фотодіодом?
7. Зобразіть структуру та схему вмикання фотодіода.
8. Що називається фоторезистором?
9. Зобразіть структуру та схему вмикання фоторезистора.
10. Зобразіть структуру та ВАХ біполярного фототранзистора.

ЛЕКЦІЯ 8. БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ. ПРИНЦИП ДІЇ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

8.1. Будова біполярних транзисторів.

Біполярний транзистор (БТ) – це напівпровідниковий прилад, який використовує два p - n переходи і здатний підсилювати електричний сигнал завдяки взаємодії двох типів носіїв заряду: електронів і дірок. Винайдений у 1948 році Джоном Бардіном і Волтером Браттейном, разом з Уільямом Шоклі. У 1956 році ці вчені отримали Нобелівську премію за дослідження напівпровідників і відкриття транзисторного ефекту. Біполярні транзистори відіграли ключову роль у розвитку сучасної електроніки, дозволяючи створювати підсилювачі, генератори і складні цифрові пристрої.

Відповідно до частоти БТ поділяють на: низькочастотні (до 3 МГц), середньочастотні (3–30 МГц), високочастотні (30–300 МГц), надвисокочастотні (понад 300 МГц), відповідно до потужності БТ поділяють на: малопотужні (до 0,3 Вт), середньої потужності (0,3–1,5 Вт), великої потужності (понад 1,5 Вт).

Біполярний транзистор виготовляють із монокристалу германію або кремнію, у якому створено три області з різною провідністю: *база*, *емітер*, *колектор* (рис. 8.1.1):

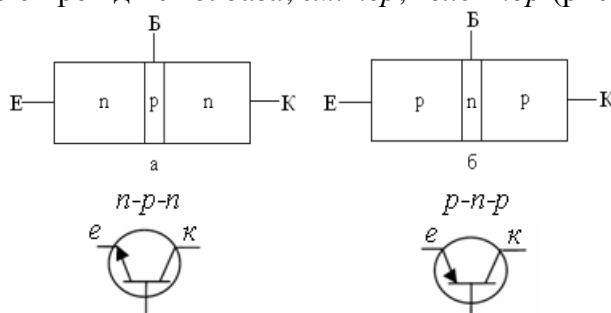


Рис. 8.1.1. Схематичне зображення біполярного транзистора: а – транзистор типу n - p - n , б – транзистор типу p - n - p .

Емітер (Е) забезпечує інжекцію основних носіїв заряду в базу, має високу концентрацію домішок, що забезпечує інтенсивне інжектування носіїв. База (Б) розташована між емітером і колектором, є дуже тонкою, з малою концентрацією домішок, що сприяє ефективному переносу носіїв до колектора. Колектор (К) приймає основні носії заряду, що перетинають базу, має більшу площу порівняно з емітером для розсіювання тепла, яке виникає під час роботи. Відповідно є наступні p - n переходи транзистора: емітерний перехід (перехід між емітером і базою, інжектує носії заряду в базу) і колекторний перехід (перехід між базою і колектором, втягує носії заряду з бази).

Розрізняють наступні типи біполярних транзисторів:

1) n - p - n транзистор (рис. 8.1.1, а) – емітер і колектор мають n -провідність, база – p -провідність. Основні носії заряду – електрони.

2) p - n - p транзистор (рис. 8.1.1, б) – емітер і колектор мають p -провідність, база – n -провідність. Основні носії заряду – дірки.

Основною особливістю конструкції біполярного транзистора є нерівномірність концентрації основних носіїв заряду в його областях (рис. 8.1.2):

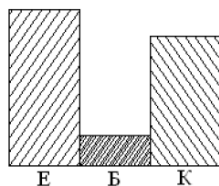


Рис. 8.1.2. Концентрація основних носіїв заряду в областях біполярного транзистора.

В емітері концентрація носіїв заряду максимальна. Звідси інжектуються основні носії в базу. У базі концентрація носіїв набагато менша, ніж у емітері й колекторі. Вона має бути дуже

тонкою, щоб більшість носіїв досягали колектора, не рекомбінуючи. У колекторі концентрація носіїв дещо менша, ніж у емітері, але більша, ніж у базі. Колектор приймає носії заряду, що інжектуються емітером через базу.

Коли між емітером і базою прикладена пряма напруга, носії заряду з емітера інжектуються в базу. Завдяки тому, що носії в базі є неосновними, вони легко долають колекторний перехід (який зміщений у зворотному напрямку) і створюють струм у колекторі. Роль бази – контроль інжекції носіїв, при цьому струм бази залишається малим. Якщо між базою і емітером прикласти запірну напругу, носії не інжектуються в базу, і струм через колектор не протікає.

Біполярний транзистор можна включити в електричне коло за трьома схемами залежно від того, який із його виводів є спільним для входного та вихідного сигналів: зі *спільною базою (СБ)*, з *спільним емітером (СЕ)*, з *спільним колектором (СК)* (рис. 8.1.3).

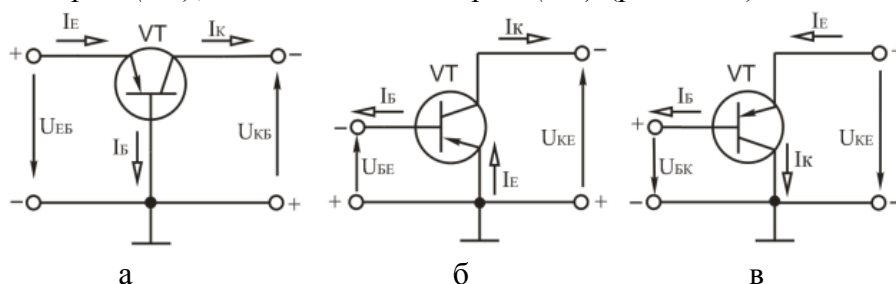


Рис. 8.1.3. Схеми вмикання біполярних транзисторів: а) СБ; б) СЕ; в) СК.

Схема зі спільною базою (СБ). База є спільною точкою для входного і вихідного кола. Така схема характеризується високою частотною здатністю, низьким входним опором, високим вихідним опором. Використовується в підсилювачах високих частот.

Схема зі спільним емітером (СЕ). Емітер є спільним виводом для входного і вихідного кола. Характеризується високим коефіцієнтом підсилення напруги і струму. Застосовується в універсальних підсилювачах і є найбільш поширеною схемою підключення.

Схема зі спільним колектором (СК). Колектор є спільним виводом для обох кіл. Характеризується високим входним і низьким вихідним опором. Використовується як повторювач напруги (емітерний повторювач).

8.2. Принцип дії біполярних транзисторів.

Розглянемо детально функціонування транзистора типу *p-n-p*, підключеного за схемою зі спільною базою, з урахуванням процесів інжекції, дифузії, рекомбінації та екстракції носіїв заряду (рис. 8.2.1):

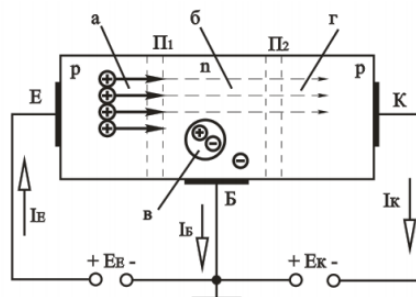


Рис. 8.2.1. Принцип дії біполярного транзистора (*p-n-p*- типу): а – інжекція; б – дифузія; в – рекомбінація; г – екстракція.

Джерело E_E створює пряме зміщення емітерного переходу (Π_1), дозволяючи основним носіям (діркам) інжектуватися в базу. Джерело E_K створює зворотне зміщення колекторного переходу (Π_2), забезпечуючи екстракцію носіїв із бази до колектора.

Зворотний струм колектора ($I_{КЗВ}$) виникає у транзисторі за умов, коли: емітерний перехід розімкнений (немає струму через емітер) або до колекторного переходу прикладена

зворотна напруга. Цей струм невеликий (декілька мкА) і зумовлений переміщенням неосновних носіїв заряду через колекторний перехід під впливом зворотної напруги.

Величина $I_{КЗВ}$ не залежить від зворотної напруги, якщо вона достатньо велика, оскільки концентрація носіїв визначається фізичними властивостями матеріалу і температурою, а не прикладеною напругою. Цей струм протікає за таким маршрутом: $+E_K \rightarrow$ колектор \rightarrow база $\rightarrow -E_K$.

Зворотний струм колектора є небажаним параметром, оскільки він створює втрати в транзисторі навіть у стані спокою. Його зростання при підвищенні температури може призводити до теплового пробію транзистора у несприятливих умовах. У високоякісних транзисторах $I_{КЗВ}$ зазвичай мінімізують шляхом використання чистих матеріалів і покращення технології виготовлення.

Розглянемо основні фізичні процеси, що відбуваються у БТ. Дірки з емітера інжектуються в базу, оскільки емітерний перехід знаходиться під прямою напругою. Інжектвані дірки дифундують через вузьку базу в напрямку до колекторного переходу. Базу роблять тонкою, щоб мінімізувати втрати дірок через рекомбінацію. Невелика частина дірок рекомбінує з електронами в базі, створюючи невеликий струм бази I_B . Дірки, що досягли колекторного переходу, витягуються в колектор під дією зворотної напруги (екстракція носіїв).

При дії зворотної напруги на колекторному переході збільшується потенціальний бар'єр і товщина виснаженої області ($p-n$ переходу). Це забезпечує наявність сильного електричного поля, яке «витягує» дірки, що досягли області переходу, у колектор.

У біполярному транзисторі (БТ) протікають три основні струми: струм емітера I_E – вхідний струм, який створюється інжекцією носіїв заряду емітером; струм колектора I_K – основний вихідний струм, що складається з носіїв заряду, які досягають колектора; струм бази I_B – струм, утворений рекомбінацією незначної частини носіїв заряду в базі. Взаємозв'язок між струмами визначається рівнянням:

$$I_E = I_B + I_K. \quad (8.2.1)$$

Струми емітера та колектора у проводі бази спрямовані зустрічно, і струм бази є їх різницею:

$$I_B = I_E - I_K.$$

У схемі з фіксованою базою коефіцієнт передачі струму α визначає, яка частина носіїв із бази досягає колектора:

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}, \quad (8.2.2)$$

де α завжди менше 1 (0,95...0,995). Чим ближче α до 1, тим ефективніше працює транзистор.

У схемі з спільним емітером (СЕ) вхідний струм – це струм бази I_B , вихідний струм – це струм колектора I_K . Коефіцієнт підсилення за струмом визначається як:

$$\beta = \frac{I_K}{I_B}. \quad (8.2.3)$$

З рівняння (8.2.2) знаходимо:

$$I_K = \alpha I_E.$$

Підставимо (8.2.1) в останній вираз:

$$I_K = \alpha I_B + \alpha I_K,$$

$$I_K(1 - \alpha) = \alpha I_B,$$

$$I_K = \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha}.$$

Підставимо останній вираз у (8.2.3):

$$\beta = \frac{\alpha I_B}{I_B - \alpha} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

У типових транзисторах β може становити десятки або навіть сотні одиниць, що забезпечує значне підсилення струму.

Транзистор у схемі із СЕ працює як струмовий підсилювач: невеликі зміни вхідного струму I_B викликають значні зміни вихідного струму I_K , тобто:

$$\Delta I_K = \beta \Delta I_B.$$

Оскільки напруга джерела живлення E_K у колі колектора значно вища за E_E у колі емітера, колекторна потужність $P_K = I_K E_K$ значно перевищує емітерну потужність $P_E = I_E E_E$. Це дає змогу малими вхідними сигналами керувати великими потужностями, що лежить в основі підсилювальної дії транзистора.

Коефіцієнт підсилення за напругою визначається відношенням зміни напруги на виході $\Delta U_{ВИХ}$ до зміни напруги на вході $\Delta U_{ВХ}$:

$$K_U = \frac{\Delta U_{ВИХ}}{\Delta U_{ВХ}}.$$

З урахуванням струмів та опорів:

$$K_U = \frac{I_{ВИХ} R_H}{I_{ВХ} R_{ВХ}},$$

де R_H – опір навантаження в колі колектора; $R_{ВХ}$ – вхідний опір транзистора.

Коефіцієнт підсилення за потужністю K_P визначається відношенням вихідної потужності $P_{ВИХ}$ до вхідної потужності $P_{ВХ}$:

$$K_P = \frac{P_{ВИХ}}{P_{ВХ}}.$$

Залежно від полярності прикладених напруг, транзистор може працювати у 4 режимах:

- 1) активний режим – емітерний перехід відкритий, колекторний – закритий. Основний режим для підсилення.
- 2) Режим насичення – обидва переходи відкриті, транзистор проводить струм максимально.
- 3) Режим відсічки – обидва переходи закриті, струм практично відсутній.
- 4) Інверсний режим – емітерний перехід закритий, колекторний – відкритий (використовується рідко).

Контрольні запитання до лекції № 8.

1. Що називають біполярними транзисторами та для чого вони призначені?
2. Зобразіть схематично будова площинного біполярного транзистора.
3. Яке призначення бази, емітера та колектора у біполярному транзисторі?
4. Які є схеми вмикання біполярного транзистора? Уміти графічно їх зобразити.
5. У чому полягає фізичний зміст інжекції, дифузії, рекомбінації та екстракції?
6. Поясніть принцип дії біполярного транзистора.
7. Запишіть формулу визначення коефіцієнта підсилення за струмом для схеми з СЕ.
8. За якою формулою можна визначити коефіцієнт підсилення транзистора по напрузі?
9. За якою формулою можна визначити коефіцієнт підсилення транзистора по потужності?
10. Які є режими роботи транзистора? Дайте коротку характеристику кожного з цих режимів.

ЛЕКЦІЯ 9. ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

9.1. Характеристики схем включення біполярного транзистора.

У біполярних транзисторах розрізняють три основні схеми включення залежно від спільного елемента для вхідного та вихідного кола. Основні характеристики, спільними для усіх схем є:

1) коефіцієнт підсилення по струму $\frac{I_{вих}}{I_{вх}}$. Цей коефіцієнт показує, у скільки разів вихідний струм перевищує вхідний. залежить від типу схеми та параметрів транзистора;

2) Вхідний опір $R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}$. Визначає, як транзистор взаємодіє із джерелом сигналу. Чим більший опір, тим менший вплив на джерело сигналу.

1) *Схема із спільним емітером (СЕ)*. Спільний емітер використовується як точка спільного підключення для вхідного і вихідного сигналу. У цьому випадку коефіцієнт підсилення по струму великий ($\frac{I_{вих}}{I_{вх}} = \frac{I_{к}}{I_{б}} = \frac{I_{к}}{I_{е} - I_{к}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \gg 1$), зазвичай від 20 до 500,

вхідний опір ($R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{бе}}{I_{б}}$) залежить від опору бази та частоти сигналу.

Схему із спільним емітером використовують в аналогових підсилювачах звуку, у каскадах підсилення сигналів низької та середньої частоти, у багатокаскадних підсилювачах для загального підсилення потужності.

Недоліки схеми із СЕ.

1) Інверсія сигналу. Вихідна напруга має зворотну фазу щодо вхідної (зміна знака сигналу на 180°).

2) Схильність до нестабільності. Чутлива до температурних змін і зміни параметрів транзистора, що може призводити до нестабільності роботи.

3) Складність забезпечення лінійності. Через нелінійну характеристику транзистора можливі спотворення сигналу, особливо для великих амплітуд.

4) Порівняно низька робоча частота. Через наявність ємностей у транзисторі і схемі може знижуватися ефективність підсилення на високих частотах.

5) Необхідність зовнішніх елементів. Для стабілізації та оптимальної роботи часто потрібні додаткові елементи (резистори, конденсатори), що ускладнює схему.

6) Падіння напруги на резисторі в емітерному колі. Викликає втрати потужності, які можуть бути небажаними в деяких застосуваннях.

Переваги схеми із СЕ.

1) Велике підсилення напруги (K_U). Схема забезпечує значне підсилення вхідної напруги, що робить її ідеальною для роботи в підсилювачах сигналу.

2) Підсилення по струму (K_I). Забезпечує підсилення струму, що дозволяє використовувати її для передачі слабких сигналів на навантаження з більшим струмом.

3) Підсилення потужності. Схема одночасно підсилює і напругу, і струм, забезпечуючи ефективне підсилення потужності сигналу.

4) Середній вхідний опір. Підходить для роботи з багатьма джерелами сигналу (опір бази транзистора дає змогу працювати зі схемами середнього опору).

5) Універсальність. Використовується в підсилювачах низької частоти, високої частоти, багатокаскадних підсилювачах тощо.

2) *Схема із спільним колектором (СК)*. Колектор є спільним для вхідного та вихідного сигналів. Коефіцієнт підсилення по струму рівний $\frac{I_{вих}}{I_{вх}} = \frac{I_{е}}{I_{б}} = \frac{I_{е}}{I_{е} - I_{к}} = \frac{1}{1 - \alpha} = \beta \gg 1$. Вхідний

опір $R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{кб}}{I_{б}}$ великий, підходить для узгодження із джерелами високого опору.

Схему із спільним колектором використовують для узгодження опорів між каскадами, у буферних каскадах для передачі сигналу без спотворень, у пристроях, де потрібне підсилення струму, але не напруги.

Недоліки схеми із СК.

1) Відсутність підсилення напруги ($K_U \approx 1$). Схема не підсилює амплітуду вхідного сигналу, тому не використовується для підсилення напруги.

2) Втрати напруги на переході база-емітер (U_{BE}). Вихідна напруга завжди трохи менша за вхідну через падіння на переході база-емітер ($U_{BE} \approx 0,6-0,7$ В для кремнієвих транзисторів).

3) Обмеження на високих частотах. На дуже високих частотах ефективність схеми може знижуватися через паразитні ємності транзистора та інших елементів.

4) Не підходить для джерел із високим вихідним опором. Якщо джерело сигналу має високий вихідний опір, ефективність схеми значно зменшується.

5) Низька енергоефективність. Частина енергії втрачається у вигляді тепла через струми бази та емітера.

Переваги схеми із СК.

1) Високий вхідний опір R_{ex} . Схема має великий вхідний опір, що дозволяє підключати її до джерел сигналу з високим вихідним опором без значного навантаження на них.

2) Низький вихідний опір $R_{вих}$. Вихідний опір схеми є малим, що дозволяє ефективно передавати сигнал на наступний каскад або навантаження.

3) Передача сигналу з високою точністю ($K_U \approx 1$). Вихідна напруга майже дорівнює вхідній, з мінімальними спотвореннями, що ідеально для повторювачів сигналу.

4) Підсилення по струму $K_I > 1$. Забезпечує значне підсилення струму, що корисно для передачі слабкого сигналу на низькоомне навантаження.

5) Простота живлення. Для роботи схеми потрібне лише одне джерело живлення, що спрощує конструкцію.

6) Стабільність роботи. Схема має гарні температурні властивості й стійка до змін у зовнішніх умовах.

3) *Схема із спільною базою (СБ).* База є спільним елементом для вхідного та вихідного кола. Коефіцієнт підсилення по струму $\frac{I_{вих}}{I_{ex}} = \frac{I_{к}}{I_e} = \alpha$ близький до 1 (0.95–0.99). Вхідний опір

$$R_{ex} = \frac{U_{ex}}{I_{ex}} = \frac{U_{be}}{I_e} \text{ малий (до 100 Ом).}$$

Схему із спільною базою використовують у підсилювачах високих частот, наприклад, у радіопередавачах, у пристроях із потребою в низькому вхідному опорі, у високовольтних схемах, де потрібна стійкість до великих напруг.

Недоліки схеми із СБ.

1) Мале значення коефіцієнта підсилення по струму α . Це означає, що струм на виході майже дорівнює вхідному, і можливості підсилення обмежені.

2) Малий вхідний опір R_{ex} , що ускладнює підключення до джерел сигналу з високим опором.

3) Необхідність у двох джерелах напруги. Для забезпечення роботи схеми потрібні два різних джерела напруги для емітера і колектора. Це ускладнює конструкцію і збільшує вартість системи.

Переваги схеми із СБ.

1) Хороші температурні властивості. Схема стійка до змін температури, що забезпечує її стабільну роботу в різних умовах.

2) Високі частотні характеристики. Схема підходить для роботи на високих частотах, наприклад, у радіотехніці або високошвидкісній обробці сигналів.

3) Висока допустима напруга. Транзистори в цій схемі можуть працювати при високих напругах на колекторі, що корисно у силових або високовольтних пристроях.

9.2. Статичні вольт-амперні характеристики біполярних транзисторів.

Для аналізу транзисторних схем вольт-амперні характеристики (ВАХ) є ключовим інструментом. Вони надають інформацію про залежність між струмами і напругами в транзисторі, що дозволяє правильно розраховувати режими його роботи.

Розрізняють статичні та динамічні типи вольт-амперних характеристик.

Статичні ВАХ. Визначаються при постійних значеннях напруг на електродах і за відсутності зовнішнього навантаження. Дозволяють оцінити основні параметри транзистора: коефіцієнт підсилення, насичення, і режим відсічення. Застосовуються для аналізу робочої точки транзистора (режиму спокою).

Динамічні ВАХ. Визначаються при змінних (синусоїдальних або імпульсних) сигналах і за наявності зовнішнього навантаження. Використовуються для аналізу роботи транзистора в умовах змінного сигналу.

Розглянемо сімейства статичних ВАХ.

1) *Вхідна статична характеристика.* Залежність вхідного струму від вихідної напруги $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$. Наприклад, для транзистора у схемі зі спільним емітером вхідна характеристика відповідає залежності струму бази від напруги база-емітер $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бе}})$. Характеристика має експоненційну форму, яка відображає нелінійність транзистора.

2) *Вихідна статична характеристика.* Залежність вихідного струму від вихідної напруги $I_{\text{вих}} = f(U_{\text{вих}})$. Наприклад, для транзистора у схемі зі СБ вихідна характеристика відповідає залежності струму колектора від напруги на колектор-база $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}})$. Вихідна характеристика складається з кількох кривих, кожна з яких відповідає певному значенню вхідного струму.

Для зняття статичних ВАХ транзистора $p-n-p$ із СЕ використовують схему зображену на рис. 9.2.1:

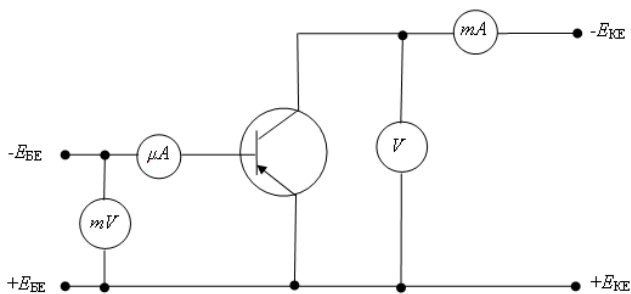


Рис. 9.2.1. Схема зняття статичних характеристик БТ.

Зняття ВАХ використовують для:

1) *Розрахунку робочої точки.* Робоча точка визначає напруги та струми на електродах транзистора в стані спокою. Вибір точки проводиться на вихідній характеристиці з урахуванням режиму (активного, насичення або відсічення).

2) *Оцінка параметрів підсилювача.* ВАХ допомагають зрозуміти, у яких межах працюватиме транзистор при підсиленні змінного сигналу.

3) *Розрахунку кіл зміщення і стабілізації.* Вхідні характеристики дозволяють визначити струм бази ($I_{\text{б}}$), необхідний для вибору стабілізаційних резисторів.

4) *Аналіз режимів роботи.* За допомогою вихідної характеристики можна визначити умови насичення і відсічення, що важливо для комутаційних схем.

Біполярний транзистор (БТ) може бути представлений як чотириполюсник (рис. 9.2.2), у якому один із виводів (залежно від схеми увімкнення: емітер, база або колектор) є загальним для входу і виходу, а інші параметри (напруги й струми) визначаються відповідно до умов роботи:

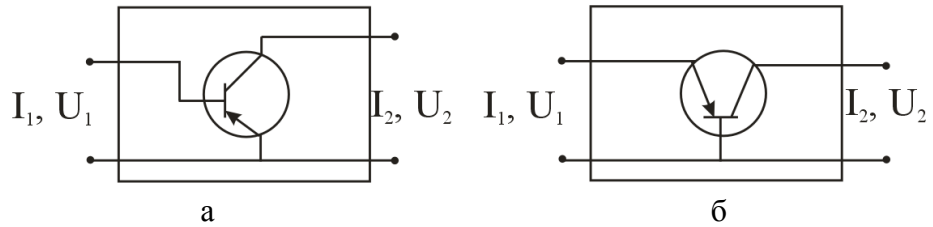


Рис. 9.2.2. Подання транзистора у виді чотириполосника: а) увімкнення зі спільним емітером, б) увімкнення зі спільною базою.

Для моделювання роботи транзистора використовують три основні системи параметрів і характеристик, залежно від того, які напруги і струми беруть за аргументи, а які за значення функції: Y-параметри (адмітансні) – характеризують провідність, Z-параметри (імпедансні) – відображають опір, H-параметри (гібридні) – комбінують адмітанс і імпеданс (таблиця 9.1):

Таблиця 1.

Система	Y	Z	H
Аргумент	$U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВИХ}}$	$I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВИХ}}$	$I_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВИХ}}$
Функції	$I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВИХ}}$	$U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВИХ}}$	$U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВИХ}}$

H-параметри (гібридні параметри) є зручним способом моделювання властивостей транзистора в режимі малих сигналів. Вони широко використовуються в аналізі транзисторних підсилювачів завдяки зрозумілості фізичного сенсу кожного параметра.

Якщо при вимірюваннях задаються вхідний струм (I_1) і вихідна напруга (U_2), а вимірюються вхідна напруга (U_1) та вихідний струм (I_2). У цьому випадку ВАХ транзистора можна записати так:

$$U_1 = f_1(I_1, U_2), \quad I_2 = f_2(I_1, U_2)$$

Запишемо диференціали U_1 та I_2 :

$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2, \quad dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2$$

Останні рівняння через h-параметри записуються так:

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2, \quad i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2$$

Подавши змінні сигнали струму на вхід транзистора та напруги на його вихід, можна виміряти відповідні напруги у вхідному колі та струми у вихідному. На основі цих вимірювань визначають малосигнальні h-параметри транзистора, які можуть бути як безрозмірними величинами, так і мати розмірність провідності або опору.

Для розрахунку h-параметрів необхідно забезпечити умови короткого замикання у вихідному колі та холостого ходу у вхідному. У цих режимах h-параметри описуються через співвідношення між струмами і напругами таким чином:

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{– опір транзистора у вхідному колі за умови, що вихідне коло замкнене}$$

накоротко;

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{– коефіцієнт зворотного зв'язку транзистора за напругою при холостому}$$

ході у вхідному колі;

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{– коефіцієнт передавання струму транзистора за умови замкнутого}$$

накоротко вихідного кола;

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$
 – провідність вихідного кола транзистора за умови відсутності струму у

вхідному колі.

На рисунках 9.2.3 а та 9.2.3 б представлені вольт-амперні характеристики транзистора в схемі зі спільним емітером для вхідного і вихідного кіл відповідно. На рисунку 9.2.3 а крива 1 відповідає напрузі $U_{ке1}=0$, тоді як $U_{ке2}$ та $U_{ке3}$ відповідають напругам, що перевищують нульове значення.

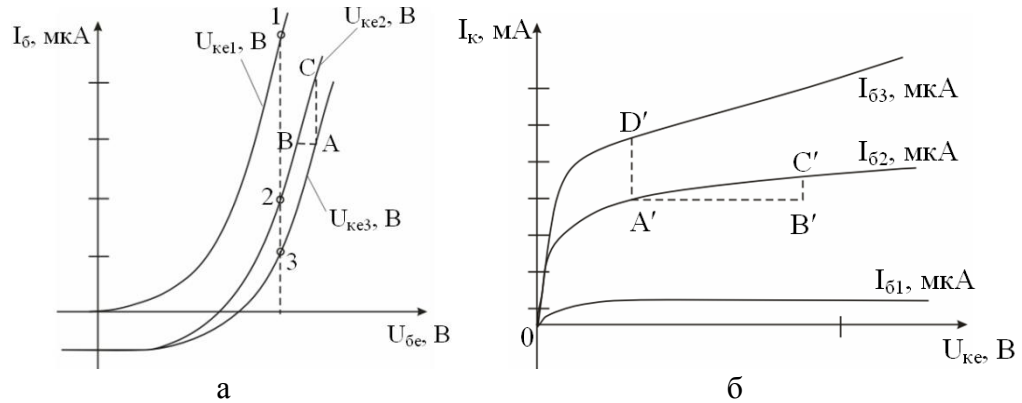


Рис. 9.2.3. ВАХ транзистора в схемі СЕ: а) вхідні; б) вихідні

Для визначення h -параметрів транзистора в схемі зі спільним емітером розглянемо робочу точку А. У цій точці на вхідних характеристиках будується трикутник АВС: з точки А проводять лінії, паралельні осям абсцис і ординат, до перетину з наступною характеристикою в точках В і С (рис. 9.2.3 а). На вихідних характеристиках будується аналогічний трикутник А'В'С' (рис. 9.3 б).

За допомогою трикутника АВС визначають усі необхідні параметри для обчислення h_{11e} , h_{12e} :

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{\delta e}}{\Delta I_{\delta}} = \frac{AB}{AC}; \quad h_{12e} = \frac{\Delta U_{\delta e}}{\Delta U_{ке}} = \frac{AB}{U_{ке3} - U_{ке2}}.$$

У точці робочого режиму А' на вихідній вольт-амперній характеристиці (рис. 9.2.3 б) здійснюють визначення параметрів h_{21e} і h_{22e} :

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta}} = \frac{A'D'}{I_{\delta3} - I_{\delta2}}; \quad h_{22e} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappa}} = \frac{B'C'}{A'B'}.$$

Контрольні запитання до лекції № 9.

1. Назвіть основні показники за якими характеризується будь-яка схема включення транзистора.
2. Назвіть основні недоліки та переваги для схеми включення транзистора із спільною базою?
3. Назвіть основні недоліки та переваги для схеми включення транзистора із спільним емітером?
4. Назвіть основні недоліки та переваги для схеми включення транзистора із спільним колектором?
5. Які є ВАХ транзистора? Як вони визначаються?
6. Що таке вхідна та вихідна статична характеристика БТ?
7. Для чого транзистор зручно представляти у вигляді чотирьохполюсника?
8. Що таке h -параметри?
9. Зобразіть вхідні й вихідні вольт-амперні характеристики транзистора ввімкненого з спільним емітером.
10. Як експериментально визначають h -параметри?

ЛЕКЦІЯ 10. БУДОВА ТА ПРИНЦИП ДІЇ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

10.1. Класифікація польових транзисторів.

Польовий транзистор (ПТ) – це напівпровідниковий прилад, який регулює струм шляхом зміни провідності каналу під впливом електричного поля, створеного між його електродами. Цей пристрій призначений для підсилення електромагнітних сигналів. Основна особливість роботи ПТ полягає у використанні носіїв заряду однієї полярності, через що його ще називають уніполярним транзистором.

У польового транзистора є три основні електроди: витік (B), стік (C) і затвор (Z). Напруга, що подається між затвором і витіком, змінює провідність каналу, а отже, і величину струму, який протікає через транзистор. Це дозволяє розглядати ПТ як джерело струму, кероване напругою затвор-витік. Якщо змінювати напругу на затворі в широких межах, канал може повністю відкриватися або закриватися, тому ПТ також можна використовувати як електронний ключ.

За конструкцією польові транзистори поділяються на дві основні групи:

1. З керуючим p - n -переходом, де затвор впливає на канал через шар p - n -переходу.
2. З ізольованим металевим затвором, відокремленим від каналу діелектриком.

Такі транзистори називаються МДП-транзисторами (метал – діелектрик – напівпровідник). Найпоширенішим матеріалом для діелектрика є двоокис кремнію (SiO_2), тому їх часто називають МОН-транзисторами (метал – оксид – напівпровідник).

Залежно від типу провідності каналу, польові транзистори бувають з каналом p -типу (діркова провідність) і n -типу (електронна провідність).

10.2. Будова та принцип дії польового транзистора з керуючим p - n переходом.

Польовий транзистор із керуючим p - n -переходом – це пристрій, у якому затвор відділений від провідного каналу шаром p - n -переходу, увімкненого у зворотному напрямі. На рис. 10.2.1 і 10.2.2 зображена конструкція такого транзистора та його умовне графічне позначення для різних типів каналів.

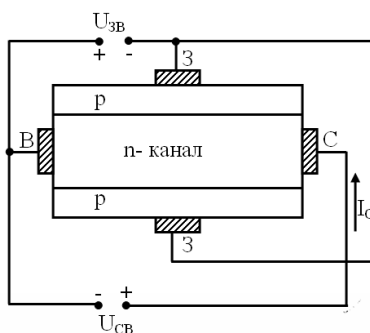


Рис. 10.1.1. Будова польового транзистора з керуючим p - n -переходом (каналом n -типу).

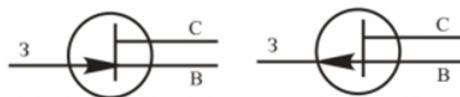


Рис. 10.1.2. Умовне позначення польового транзистора з керуючим p - n -переходом і каналом n -типу (а), каналом p -типу (б).

Канал у цьому транзисторі – це область у напівпровідниковому матеріалі, де основні носії заряду рухаються, а їхній потік регулюється зміною поперечного перерізу каналу. Електрод, через який носії заряду потрапляють у канал, називається витіком (B), а електрод, через який вони залишають канал – стоком (C). Рух носіїв заряду між цими електродами створює наскрізний струм I_C , значення якого залежить від омичного опору напівпровідника:

$$I_C = \frac{U_{CB}}{R}.$$

Затвор (3) – це електрод, що відповідає за керування поперечним перерізом каналу. Затвор формує $p-n$ -перехід із напівпровідниковим матеріалом каналу. Напруга, яка прикладається до затвора, має зворотну полярність відносно витоку. Під впливом цієї напруги ширина $p-n$ -переходу змінюється: із зростанням напруги він розширюється, зменшуючи ефективний переріз каналу, збільшуючи його опір і, відповідно, зменшуючи струм.

Ці процеси добре відображаються на вольт-амперних характеристиках таких транзисторів, які включають залежності між струмом стоку та напругою на затворі чи стоку. Залежність роботи транзистора від цих параметрів дозволяє його використовувати для посилення чи перемикання електричних сигналів.

Стокові характеристики польового транзистора з $p-n$ -переходом і каналом n -типу (рис. 10.1.3, а) описують залежність струму стоку I_C від напруги між стоком і витоком U_C за постійного значення напруги на затворі $I_C=f(U_{CB})$ при $U_{ЗВ}=\text{const}$

Розглянемо особливості роботи польового транзистора. Провідність каналу залежить одночасно від керуючої напруги $U_{ЗВ}$ і напруги U_{CB} . Коли $U_{CB}=0$, струм стоку I_C відсутній. Якщо $U_{CB}>0$ (і $U_{ЗВ}=0$), через канал починає протікати струм I_C , утворюючи падіння напруги вздовж каналу, яке зростає у напрямку стоку.

Збільшення U_{CB} підвищує падіння напруги в каналі, звужуючи його поперечний переріз і зменшуючи провідність. При досягненні певного значення U_{CB} , коли $p-n$ -переходи змикаються, канал перекривається, а опір стає дуже високим. Це значення називають *напругою перекриття* або *напругою насичення* ($U_{CB \text{ нас}}$).

Подавання на затвор зворотної напруги додатково звужує канал, і його перекриття відбувається при нижчому значенні $U_{CB \text{ нас}}$. Робочі режими транзистора зазвичай використовують лінійні (пологі) ділянки вихідної характеристики.

Стік-затворна характеристика показує, як струм стоку I_C змінюється в залежності від напруги затвора $U_{ЗВ}$ за постійного значення U_{CB} : $I_C=f(U_{ЗВ})$ при $U_{CB}=\text{const}$ (рис. 10.1.3, б). Початковий струм стоку позначається як $I_{C \text{ поч}}$.

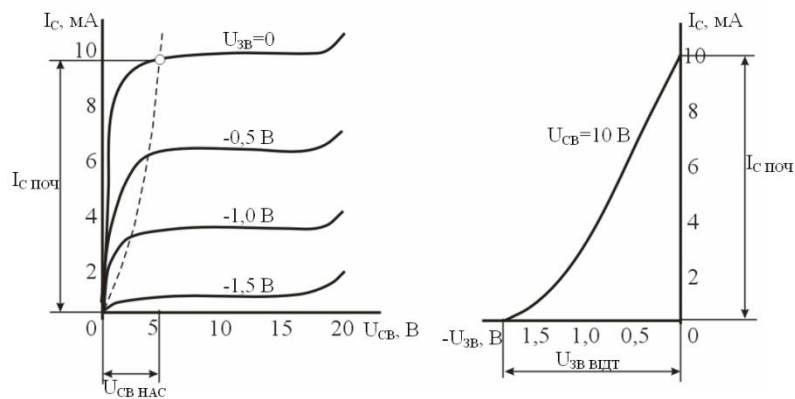


Рис. 10.1.3. Вольт-амперні характеристики польового транзистора з $p-n$ -переходом і каналом n -типу: а – стокові (вихідні); б – стік – затворна.

Польовий транзистор характеризується наступними параметрами.

- 1) Максимальний струм стоку ($I_{C \text{ max}}$): найбільше значення струму стоку при $U_{ЗВ}=0$.
- 2) Максимальна напруга стік-витік ($U_{CB \text{ max}}$): найбільша допустима напруга між стоком і витоком.
- 3) Напруга відтинання ($U_{ЗВ \text{ відт}}$): напруга затвор-витік, при якій струм стоку практично зникає.
- 4) Вихідний опір ($R_{\text{вих}}$): опір між стоком і витоком при змінному струмі за постійного значення $U_{ЗВ}$:

$$R_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_{\text{CB}}}{\Delta I_{\text{C}}} \text{ при } U_{\text{ЗВ}} = \text{const.}$$

5) Крутизна характеристики (S): характеризує, наскільки змінюється струм стоку залежно від напруги на затворі:

$$S = \frac{\Delta I_{\text{C}}}{\Delta U_{\text{ЗВ}}} \text{ при } U_{\text{CB}} = \text{const.},$$

6) Вхідний опір ($R_{\text{вх}}$): визначається опором p - n -переходів затвора, увімкнених у зворотному напрямі:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{ЗВ}}}{\Delta I_{\text{З}}} \text{ при } U_{\text{CB}} = \text{const.}$$

Вхідний опір польових транзисторів із p - n -переходом є дуже великим (до десятків мегаом), що вигідно відрізняє їх від біполярних транзисторів. Це робить польові транзистори ідеальними для роботи з малими керуючими сигналами, мінімізуючи вплив на джерело сигналу.

10.3. Польові транзистори з ізолюваним затвором.

Для керування провідністю каналу не обов'язково забезпечувати прямий контакт затвора з матеріалом каналу. Навіть у разі наявності шару діелектрика між ними, електричне поле, створене напругою на затворі, здатне проникати в приповерхневий шар напівпровідника. Це поле впливає на концентрацію та розподіл носіїв заряду в каналі. Цей принцип лежить в основі роботи польового транзистора з ізолюваним затвором. Схематичну будову такого транзистора показано на рис. 10.3.1:

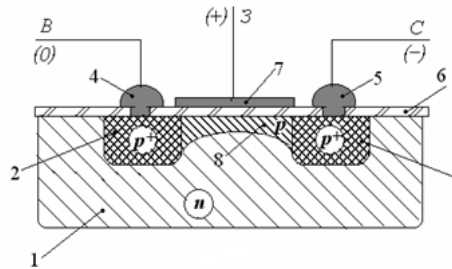


Рис. 10.3.1. Схематичне зображення будови польового транзистора з ізолюваним затвором.

На поверхні слаболегованого електронного напівпровідника (1), який називається підкладкою, створюють дві невеликі області (2) та (3), що сильно леговані акцепторною домішкою. Таку високу концентрацію домішок умовно позначають символом p^+ . Ці області мають металеві контакти (4) і (5), до яких під'єднуються зовнішні провідники для витоку (B) та стоку (C) транзистора.

Поверхню напівпровідника вкривають тонким шаром діелектрика (6), товщина якого становить лише частки мікрона. Для створення цього шару зазвичай використовують процес окислення кремнію в атмосфері кисню, унаслідок чого утворюється шар оксиду кремнію (SiO_2). Цей матеріал має високі діелектричні та механічні характеристики, а також ефективно захищає напівпровідник від зовнішніх впливів.

На поверхню діелектричного шару наносять тонкий шар металу (7), який виконує функцію затвора. Області витоку та стоку з'єднані між собою вузьким «містком» (8) із акцепторно-легованого напівпровідника, що формує канал транзистора типу МДН (метал-діелектрик-напівпровідник).

При нульовій напрузі на затворі (потенціал затвора відносно витоку дорівнює нулю) провідність між витоком і стоком визначається природною провідністю каналу (8). З першого погляду може здатися, що струм міг би протікати через підкладку, яка є електронно-провідною. Проте, через те, що між підкладкою та стоком утворюється закритий p - n -перехід при негативній напрузі на стоку, струм через підкладку не проходить.

Коли на затвор подається позитивна напруга, створене електричне поле проникає в напівпровідник і витісняє дірки з *p*-каналу, зменшуючи їхню концентрацію. Це призводить до зниження провідності каналу і зменшення струму, що протікає через транзистор, аж до повного припинення струму. У такому режимі транзистор працює за принципом збіднення каналу носіями заряду.

Якщо на затвор подати негативну напругу, дірки починають «всмоктуватися» в канал із прилеглих областей. Це підвищує концентрацію дірок у каналі, збільшує його провідність і сприяє зростанню струму через транзистор. Такий транзистор називають МДН-транзистором із вбудованим *p*-каналом, оскільки провідний канал закладений у його конструкцію на етапі виготовлення.

Інший поширений тип МДН-транзистора – це транзистор із *індукованим* каналом. У таких транзисторах відсутній заздалегідь створений канал, який з'єднує витік зі стоком (8). У результаті при нульовій напрузі на затворі струм через транзистор відсутній. Навіть за позитивної напруги на затворі струм залишається нульовим.

Коли на затвор подається негативна напруга, електрони відштовхуються від поверхні напівпровідника, тоді як дірки притягуються до неї. Основним джерелом дірок є підкладка та прилеглі *p*-області. За певного рівня негативної напруги на затворі в області під затвором відбувається інверсія провідності, і між витоком та стоком формується провідний *p*-канал. У міру збільшення негативної напруги провідність цього каналу зростає. Такий транзистор працює за принципом *збагачення* каналу носіями заряду.

10.4. Переваги та недоліки польових транзисторів над біполярними.

Польові транзистори значною мірою витіснили біполярні у багатьох сферах застосування, особливо в інтегральних схемах, де вони широко використовуються як електронні ключі (перемикачі).

Основні переваги польових транзисторів.

1) Високий вхідний опір. Завдяки цьому коло з польовим транзистором майже не споживає вхідного струму, що забезпечує мінімальні енерговитрати.

2) Високе струмове підсилення. Польові транзистори мають значно більшу здатність до підсилення струму, ніж біполярні транзистори.

3) Низький рівень шумів. Польові транзистори не мають рекомбінаційного шуму, характерного для біполярних транзисторів, що забезпечує чистоту сигналу.

4) Економічність керування. Транзистори керуються напругою (електричним полем), а не струмом, що робить їх енергоефективними.

5) Висока швидкість роботи. Польові транзистори швидко переходять між станами провідності та непровідності, що дозволяє їм працювати на вищих частотах, ніж біполярні.

6) Стійкість до радіації. Польові транзистори мають високу стійкість до іонізуючого випромінювання, що важливо для застосування в космічній техніці та ядерній енергетиці.

7) Мала залежність від температури. Параметри польових транзисторів змінюються з температурою набагато менше, ніж у біполярних транзисторів. Також немає залишкової напруги між витоком і стоком у відкритому стані.

Основні недоліки польових транзисторів.

1) Менша термостійкість. Структура польового транзистора руйнується при температурах вище 150 °С, тоді як біполярні транзистори витримують до 200 °С.

2) Зростання енергоспоживання на високих частотах. Хоча польові транзистори споживають менше енергії на низьких частотах, на частотах понад 1,5 ГГц енергоспоживання МОП-транзисторів зростає експоненціально. Це є однією з причин, чому виробники процесорів перейшли до багатоядерної архітектури замість простого збільшення тактової частоти.

3) Чутливість до статичної електрики. Через дуже тонкий діелектричний шар затвора, навіть невелика напруга може пошкодити транзистор. Для захисту застосовують спеціальні корпуси, які мінімізують можливість виникнення небажаної напруги між електродами. Крім того, іноді використовують вбудовані діоди між стоком і витоком.

4) Особливі вимоги до роботи. Під час роботи з інтегральними схемами, що складаються переважно з польових транзисторів, рекомендується використовувати заземляючі антистатичні браслети. Для транспортування таких чіпів використовуються вакуумні антистатичні упаковки.

Таким чином, хоча польові транзистори мають багато переваг, їх недоліки вимагають обережного поводження та особливих умов експлуатації.

Контрольні запитання до лекції № 10.

1. Що таке польовий транзистор?
2. Як за конструкцією класифікуються польові транзистори?
3. Як називаються електроди польового транзистора та яке їх призначення?
4. Поясніть принцип роботи польового транзистора з керуючим *p-n*- переходом.
5. Поясніть характер кривих ВАХ польового транзистора з *p-n*- переходом і каналом *n*- типу.
6. Якими основними параметрами характеризуються польові транзистори?
7. Поясніть принцип роботи польового транзистора з ізольованим затвором.
8. В чому полягає основна відмінність між МДН-транзисторами із «вбудованим» та «індукованим» каналом?
9. Поясніть означення: транзистор працює на збіднення (збагачення) каналу носіями.
10. Назвіть основні переваги та недоліки польових транзисторів над біполярними.

ЛЕКЦІЯ 11. ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

11.1. Види та класифікація інтегральних схем.

Інтегральна мікросхема (ІМС), також відома як мікрочип або чіп – це монолітний пристрій, призначений для виконання функцій певного каскаду або навіть цілої системи. Її компоненти інтегровані у приповерхневий шар підкладки, поєднані між собою в єдину структуру і не можуть бути розділені демонтажем (рис. 11.1.1). За прийнятим визначенням, мікросхема – це мікроелектронний виріб зі щільністю розташування щонайменше п'яти елементів на кубічний сантиметр, який розглядається як єдине конструктивне ціле.

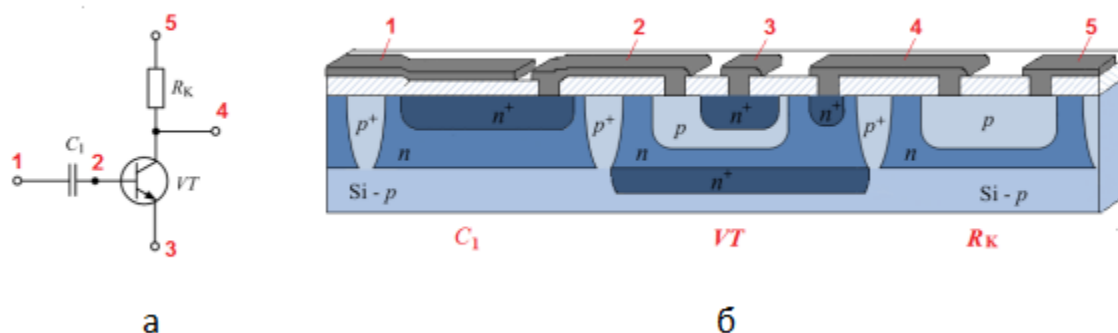


Рис. 11.1.1. Фрагмент напівпровідникової ІС: електрична схема (а) і відповідна структура (б).

Інтегральні мікросхеми використовуються в численних галузях:

- 1) комп'ютерна техніка: реалізація логічних функцій, виконання арифметичних операцій, організація запам'ятовуючих пристроїв;
- 2) смартфони: управління живленням, обробка сигналів, забезпечення зв'язку;
- 3) побутова техніка та автомобілі: контроль і керування електронними системами;
- 4) медичне обладнання: обробка сигналів датчиків;
- 5) військова техніка: навігація, системи управління.

У багатьох пристроях одна ІМС може виконувати майже всі функції електронного пристрою, наприклад, центральний процесор у комп'ютері.

Розрізняють наступні типи інтегральних мікросхем:

- 1) аналогові ІМС: забезпечують безперервну обробку та зміну сигналів;
- 2) цифрові ІМС: обробляють інформацію в дискретному вигляді;
- 3) гібридні ІМС: частина їх елементів виконана як окремі конструктивні блоки;
- 4) напівпровідникові ІМС: їхні елементи виготовлені в об'ємі або на поверхні напівпровідникового матеріалу.

ІМС класифікують за ступенем інтеграції (за кількістю елементів):

1. Перший ступінь інтеграції: до 10 елементів.
2. Другий ступінь інтеграції: від 10 до 100 елементів.
3. Третій ступінь інтеграції: від 100 до 1000 елементів.
4. Великі інтегральні схеми (ВІС): понад 1000 елементів.

Хоча напівпровідникові ІМС мають широке використання, їхнє впровадження має певні обмеження.

1) Високі витрати на виробництво. Доцільність їх виготовлення економічно виправдана лише у масовому виробництві, адже значні витрати потрібні на проектування і створення фотошаблонів.

2) Обмеження параметрів, наприклад, невисока точність резисторів (похибка $\pm 10\%$), неможливість виготовлення конденсаторів великої ємності, температурні й потужнісні обмеження.

ІМС стали ключовим елементом сучасної електроніки, але їхнє виробництво вимагає технологічно складних і економічно обґрунтованих рішень.

11.2. Гібридна інтегральна схема.

Поряд із напівпровідниковими ІМС створюють комбіновані гібридні інтегральні мікросхеми. Їхньою особливістю є використання плівкової технології для виготовлення пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, провідників) і контактів, які наносяться на діелектричну підкладку (рис. 11.2.1). Активні елементи (транзистори, діоди), виготовлені за напівпровідниковою технологією, монтуються на цій підкладці окремо, через що їх називають навісними.

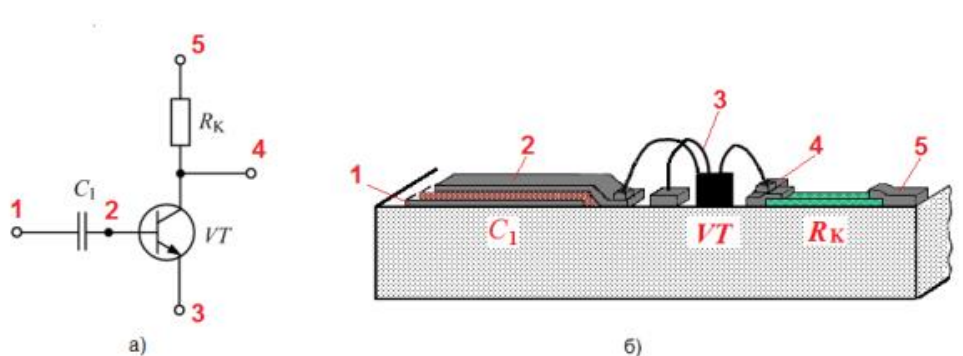


Рис. 11.2.1. Фрагмент гібридної ІС: електрична схема (а) і відповідна структура (б).

Розглянемо процес виготовлення гібридних ІМС.

1. Підкладку шліфують і полірують.
2. Наносять плівки, що формують резистори, нижні обкладки конденсаторів, котушки індуктивності та провідники.
3. Поверхня вкривається діелектричною плівкою, після чого наноситься металева плівка для створення верхніх контактів.
4. На завершальному етапі прикріплюються активні елементи, їхні виводи з'єднують із точками схеми.

Пасивні елементи ІМС виготовляють плівковим методом, а активні компоненти виконуються як навісні деталі. Схему герметизують у корпусі, забезпечуючи захист і можливість підключення до зовнішніх кіл. Гібридні ІМС поступаються напівпровідниковим за розмірами, швидкодією та надійністю, але їх виробництво є економічно вигідним навіть при невеликих серіях, завдяки менш дорогому обладнанню та менш жорстким вимогам до технологічних шаблонів.

Гібридні мікросхеми дозволяють отримувати резистори з точністю $\pm 5\%$, конденсатори – $\pm 10\%$, а при підстроюванні – до десятих часток відсотка. Завдяки цій технології можна реалізувати практично будь-які функціональні схеми.

У суміщених інтегральних схемах активні компоненти (діоди, транзистори) виготовляють у кристалі напівпровідника, а пасивні елементи (резистори, конденсатори) і провідники наносяться плівковим методом на поверхню монолітної структури (рис. 11.3.1):

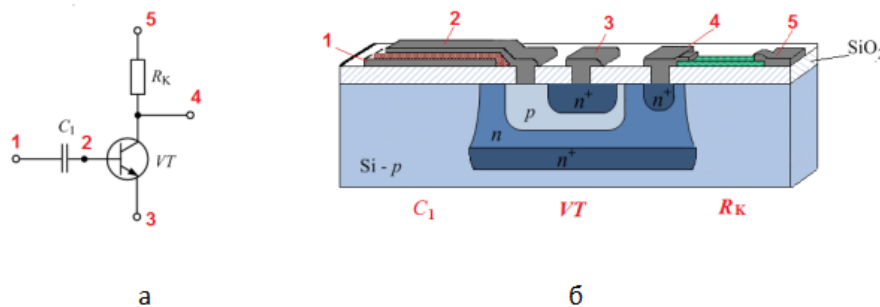


Рис. 11.3.1. Фрагмент суміщеної ІС: електрична схема (а) і відповідна структура (б).

Гібридні ІМС класифікують за товщиною плівки:

1) Товстоплівкові ІМС: товщина плівок становить 1,25–20 мкм. Недоліки: менша стабільність номіналів пасивних елементів і низька щільність монтажу.

2) Тонкоплівкові ІМС: товщина плівок до 1 мкм, що забезпечує щільність монтажу до 200 елементів/см³ і високу точність компонентів.

До основних конструктивних елементів гібридних ІМС відносяться:

1. Підкладка – основа для розміщення елементів.
2. Пасивна частина – плівкові провідники, контактні майданчики, резистори, конденсатори.

3. Навісні активні елементи – дискретні транзистори та діоди.

4. Мініатюрні навісні пасивні компоненти – великі конденсатори, трансформатори, дроселі (використовуються рідко).

5. Корпус – герметизує схему і забезпечує фіксацію виводів.

Гібридні інтегральні мікросхеми поєднують плівкові та напівпровідникові технології, що робить їх універсальними для різних електронних схем, зберігаючи баланс між технічними характеристиками та економічністю.

На рис. 11.4.1 показано зовнішній вигляд гібридної ІС:

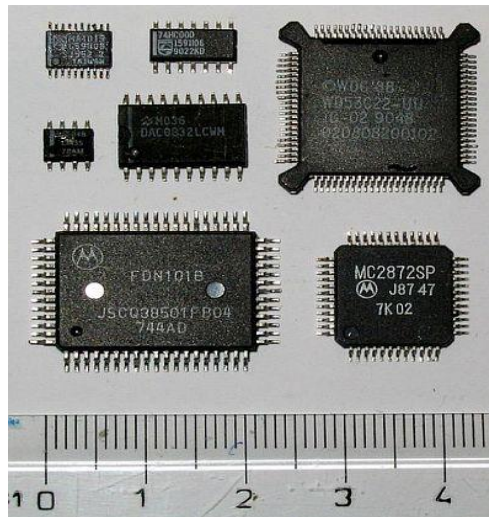


Рис. 11.4.1. Зовнішній вигляд гібридної ІС.

11.3. Маркування інтегральних мікросхем.

Система умовних позначень мікросхем розроблена стандартами для уніфікації їх ідентифікації. Більшість інтегральних мікросхем (ІМС) згруповані у серії, які включають різні мікросхеми, сумісні за характеристиками напруги живлення, рівнями сигналів, опорами та конструктивними особливостями. Завданням серій є забезпечення можливості створення завершених електронних пристроїв, хоча іноді допускається поєднання мікросхем різних серій в одному пристрої.

Маркування ІМС – це буквено-цифровий код, який використовується для визначення типу, функцій, технічних характеристик і серії мікросхеми. У різних країнах та компаніях застосовуються свої системи позначень, проте загалом маркування містить інформацію про функціональне призначення мікросхеми та її властивості.

Маркування ІМС має кілька основних складових:

1. *Буквений префікс* визначає основні характеристики:

«К» – кремнієва мікросхема;

«Г» – германієва;

«І» – для військового або промислового застосування;

- «Р» – радіоелектроніка (наприклад, для аналогових схем).
2. *Цифровий індекс* серії вказує номер або тип серії:
«155» – цифрові логічні схеми;
«133» – швидкісніші або потужніші серії.
3. *Букви після серії* уточнюють функціональність:
«Л» – логічні елементи;
«У» – операційні підсилювачі;
«А» – стандартне виконання;
«Т» – таймери, лічильники.
4. *Номер виконання в серії* деталізує конкретну модель, наприклад, у «К155ЛА3» цифра «3» вказує на конкретний варіант у серії.
5. *Додаткові символи* вказують на особливі характеристики:
«В» – підвищена надійність;
«І» – розширений температурний діапазон;
«Р» – радіаційна стійкість.
- Наприклад, «К561ЛА7» розшифровується так:
- «К» – кремнієва мікросхема;
 - «561» – серія;
 - «ЛА» – логічна схема;
 - «7» – модель в серії.
- Ця система дозволяє легко визначати та підбирати мікросхеми для конкретних завдань.

Контрольні запитання до лекції № 11.

1. Що називається інтегральною мікросхемою?
2. Яке функціональне призначення ІМС?
3. Яка різниця між аналоговими та цифровими ІМС?
4. Як класифікують ІМС в залежності від ступеня інтеграції?
5. Чим обмежено застосування ІМС?
6. Що таке гібридна та суміщена ІМС?
7. У чому полягає різниця між гібридними та напівпровідниковими ІМС?
8. Назвіть основні конструктивні елементи гібридної ІС.
9. Як здійснюється маркування інтегральних мікросхем?
10. Розшифруйте умовне позначення ІМС К155ЛА3.

ЛЕКЦІЯ 12. ЕЛЕКТРИЧНІ ФІЛЬТРИ

1. Загальні відомості про електричні фільтри.

У радіоелектронних колах для виділення потрібного сигналу з-поміж інших застосовуються електричні фільтри. Вони дозволяють зменшити вплив завад та небажаних сигналів, залишивши лише необхідну частину спектра сигналу. Фільтри поділяються на кілька типів залежно від того, за яким параметром сигналу відбувається виділення.

1. Частотні фільтри – використовуються для відокремлення сигналів за частотою. Вони можуть бути різних видів:

- *Низькочастотні фільтри (ФНЧ)* – пропускають сигнали з частотою нижче заданої межі і пригнічують сигнали з вищими частотами.

- *Високочастотні фільтри (ФВЧ)* – навпаки, пропускають сигнали з частотою вище певного рівня.

- *Смугові фільтри* – пропускають сигнали лише в певному діапазоні частот.

- *Загороджувальні фільтри* – пригнічують сигнали в певному діапазоні частот.

2. Амплітудні фільтри – використовуються для виділення сигналів за їх амплітудою. Такі фільтри корисні для роботи з імпульсними сигналами або для обмеження рівня сигналу до певної амплітуди.

3. Часові (імпульсні) фільтри – працюють на основі часових характеристик сигналів. Їх використовують для виділення імпульсних або цифрових сигналів, де важливо зберегти часову структуру сигналу.

Частотний електричний фільтр – це вибірний чотиріполюсник, що призначений для передачі сигналів у певному діапазоні частот з мінімальними втратами (ослабленням), водночас суттєво ослаблюючи сигнали за межами цього діапазону. Цей діапазон, у якому сигнал проходить з найменшим ослабленням, називається смугою пропускання або смугою прозорості. За межами цієї смуги фільтр має смугу непрозорості, де сигнал ослаблюється максимально.

На практиці, смугою пропускання вважають діапазон частот, у якому амплітуда сигналу зменшується не більше ніж на певну величину – зазвичай у $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7$ рази (що відповідає ослабленню на 3 дБ від максимальної амплітуди). Це означає, що в межах цієї смуги відхилення амплітуди сигналу від максимальної величини є досить малим для забезпечення належної якості передачі сигналу.

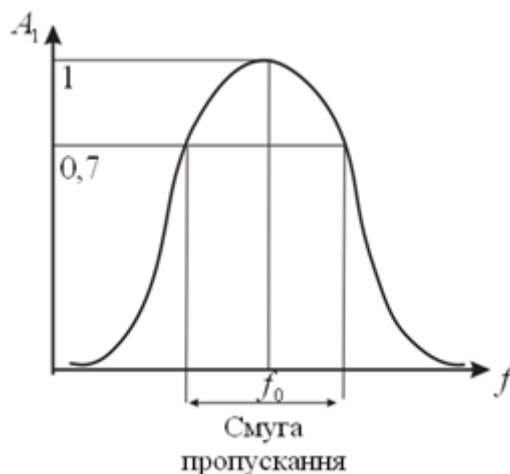


Рис. 12.1.1. Амплітудно-частотна характеристика фільтра.

Частота, яка розділяє смугу пропускання та смугу непрозорості, називається граничною частотою або частотою зрізу. На цій частоті вихідна напруга U_2 зменшується в $\sqrt{2}$ разів порівняно з вхідною напругою U_1 . Це є ключовою характеристикою для частотних фільтрів, оскільки вона визначає межі діапазону ефективної передачі сигналів.

Залежно від призначення фільтра, граничні частоти можуть розташовуватися на різних рівнях частотного спектра, визначаючи, які частоти проходять через фільтр, а які будуть відсічені.

Ідеальні фільтри мають властивість абсолютно не ослаблювати сигнали в смузі пропускання та повністю блокувати їх у смузі затримання. Це означає, що на частоті зрізу вони демонструють нескінченно велику крутизну амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), що в реальних системах є недосяжним, але дає модель ідеальної поведінки для аналізу.

За розташуванням смуги пропускання розрізняють наступні типи фільтрів:

1. *Фільтри нижніх частот (ФНЧ)* – пропускають сигнали з частотою нижче частоти зрізу без ослаблення, а для частот, вищих за частоту зрізу, коефіцієнт передачі дорівнює нулю. Ідеальний ФНЧ відсікає всі височастотні сигнали вище частоти зрізу (рис. 12.1.2).

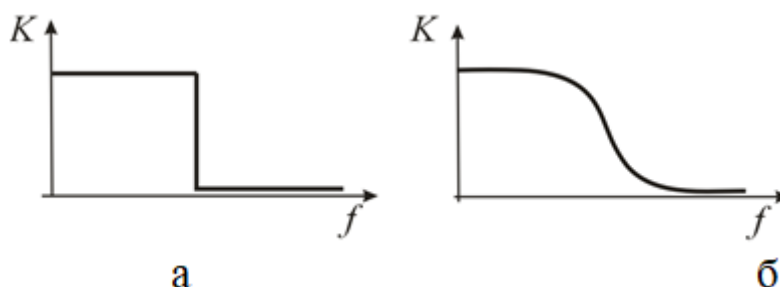


Рис. 12.1.2. Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ: а) ідеального; б) реального.

2. *Фільтри верхніх частот (ФВЧ)* – пропускають сигнали з частотами вище частоти зрізу без ослаблення, але не пропускають сигнали з частотами нижче частоти зрізу (рис. 12.1.3).

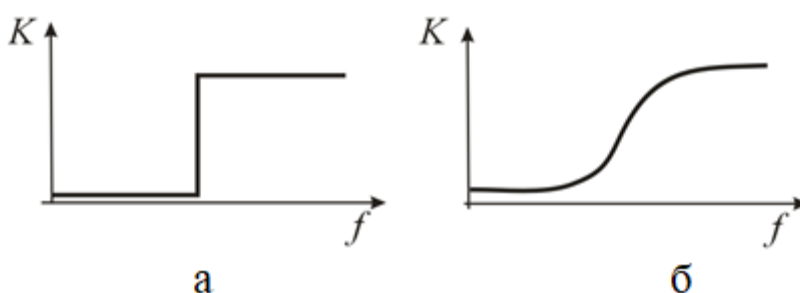


Рис. 12.1.3. Амплітудно-частотна характеристика ФВЧ: а) ідеального; б) реального.

3. *Смугові фільтри (СФ)* – пропускають сигнали, частоти яких знаходяться в певному діапазоні між нижньою та верхньою частотами зрізу, і повністю блокують сигнали за межами цього діапазону. Ідеальний смуговий фільтр передає тільки сигнали в цьому частотному інтервалі (рис. 12.1.4).

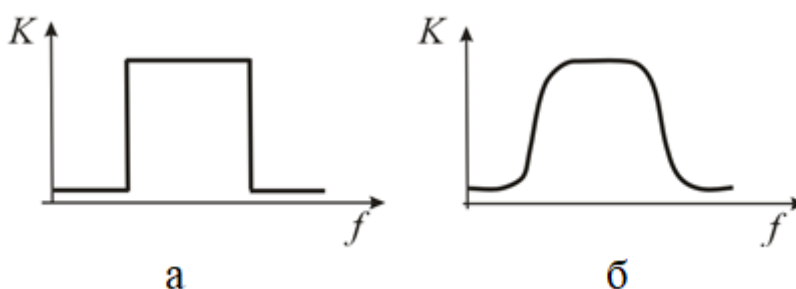


Рис. 12.1.4. Амплітудно-частотна характеристика смугового фільтра: а) ідеального; б) реального.

4. *Загороджувальні фільтри (ЗФ) або режекторні фільтри* – працюють навпаки смуговим фільтрам: вони блокують сигнали, що знаходяться в певному діапазоні частот між нижньою та верхньою частотами зрізу, і пропускають без ослаблення сигнали поза цим діапазоном (рис. 12.1.5).

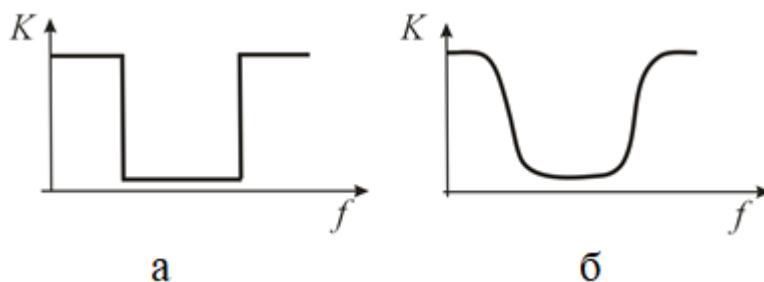


Рис. 12.1.5. Амплітудно-частотна характеристика режекторного фільтра: а) ідеального; б) реального.

5. *Гребенчаті фільтри (ГФ) або багатосмугові фільтри* – мають кілька смуг пропускання або загородження в частотному спектрі. Їх використовують для відокремлення кількох діапазонів частот одночасно.

Ці ідеальні фільтри – лише математична модель, оскільки в реальних умовах фільтри мають обмежену крутизну АЧХ та не можуть забезпечити різке відсічення сигналу на частоті зрізу. Але вони дають важливу основу для розуміння принципів роботи реальних фільтрів.

12.2. Структури схем фільтрів.

Фільтри за структурною схемою дійсно можуть мати кілька типів, і найпростішим є Г-подібний фільтр (рис. 12.2.1). Така структура складається з двох основних елементів – Z_1 і Z_2 , де Z позначає загальний опір або імпеданс елемента для сигнальних струмів. Елементи Z_1 і Z_2 можуть бути як активними, так і реактивними компонентами, залежно від типу фільтра, який будується.

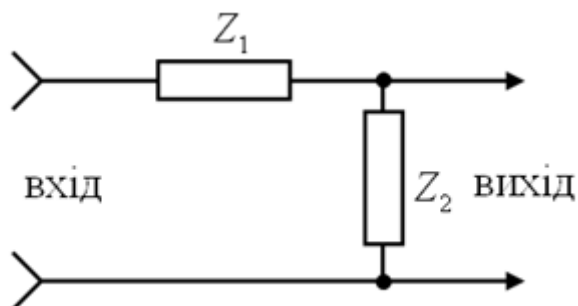


Рис. 12.2.1. Модель Г-подібного фільтра

Г-подібний фільтр виглядає як комбінація двох послідовно і паралельно з'єднаних елементів Z_1 і Z_2 . В такій конфігурації:

- Z_1 зазвичай підключений послідовно до ланцюга.
- Z_2 підключений паралельно до виходу.

Якщо Z_1 і Z_2 є активними опорами, то Г-подібний фільтр фактично є звичайним ділянком напруги. У цьому випадку коефіцієнт передачі напруги (тобто співвідношення вихідної напруги до вхідної) залежить від співвідношення опорів Z_1 і Z_2 . Однак ділянка напруги має нелінійну амплітудно-частотну характеристику (АЧХ), що обмежує його застосування для точного фільтрування сигналів за частотою.

Для розрахунку параметрів ділянки напруги справедливі наступні формули:

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вих}}(R_1 + R_2)}{R_2}; U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх}}R_2}{(R_1 + R_2)}; R_{\text{заг}} = R_1 + R_2; R_1 = \frac{U_{\text{вх}}R_2}{U_{\text{вих}}} - R_2; R_2 = \frac{U_{\text{вих}}R_{\text{заг}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Ця проста схема ділянки напруги використовується як базова концепція для багатьох типів електричних фільтрів. У реальних фільтрах активні опори можуть бути замінені

реактивними компонентами (конденсаторами або котушками індуктивності) для досягнення необхідних фільтраційних характеристик на різних частотах.

Для створення фільтрів на основі ділянки напруги використовуються реактивні елементи (конденсатор або котушка індуктивності), оскільки їхній опір (імпеданс) залежить від частоти. Реактивний опір конденсатора зменшується зі збільшенням частоти, що робить його ідеальним для побудови фільтрів високих і низьких частот.

T-подібний фільтр є наступним етапом ускладнення структури після Г-подібного. Він має три елементи: два послідовні елементи на вході та виході, які можуть бути як резисторами, так і конденсаторами або індуктивностями. Один елемент, підключений паралельно, між ними T-подібний фільтр складається з двох елементів $\frac{Z_1}{2}$, які підключені послідовно, та одного елемента Z_2 , підключеного паралельно між ними (рис. 12.2.2).

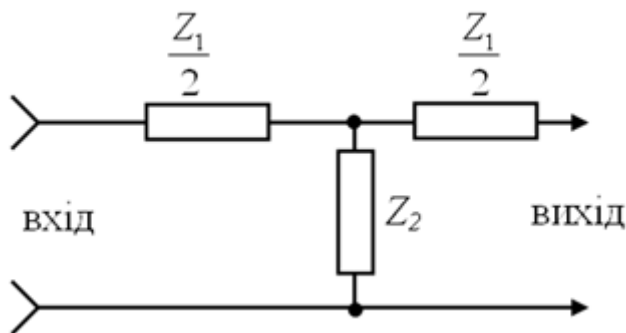


Рис. 12.2.2. Модель T-подібного фільтра.

Якщо замість резисторів використовувати реактивні елементи (конденсатори або індуктивності), можна отримати фільтри високих, низьких або смугових частот.

T-фільтри часто використовуються для більш складної фільтрації, оскільки вони дозволяють досягти кращої вибіркової між смугою пропускання і затримання. Ці принципи застосовуються також і до інших типів фільтрів, які комбінують кілька реактивних елементів для досягнення необхідних частотних характеристик.

П-подібний фільтр є варіацією фільтра, який базується на трьох елементах, але його структурна схема відрізняється від T-подібного фільтра. У П-структурі: один елемент (зазвичай позначений як Z_1) підключений паралельно до вхідного сигналу. Два інших елементи Z_2 підключені послідовно до входу та виходу фільтра (рис. 12.2.3).

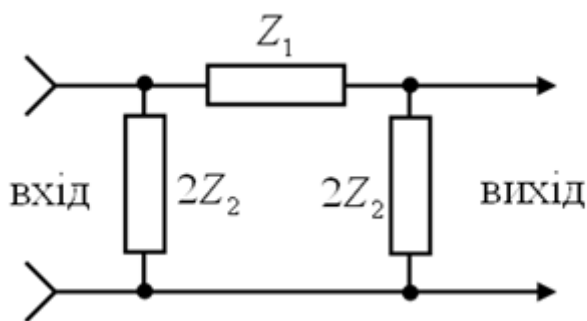


Рис. 12.2.3. Модель П-подібного фільтра.

Модель П-подібного фільтра:

1. Елемент Z_1 розміщується паралельно між двома послідовними елементами Z_2 .
2. Якщо використовувати резистори, індуктивності або конденсатори як Z_1 і Z_2 , можна досягти різних типів фільтрації:
 - для фільтрації високих або низьких частот, елемент Z_1 може бути конденсатором, а Z_2 – індуктивностями або резисторами;
 - якщо Z_1 і Z_2 є комбінацією реактивних елементів, можна створити смугові або загороджувальні фільтри.

П-подібний фільтр отримав свою назву через схему підключення елементів, яка зовні нагадує літеру «П». Така конфігурація дозволяє краще контролювати частотні характеристики фільтра, зокрема покращити крутизну перехідної характеристики між смугою пропускання і смугою затримання. Основне застосування П-фільтрів – у більш складних радіочастотних і аудіосистемах, де необхідна більш точна фільтрація або розділення сигналів на різних частотах. Ця схема використовується для побудови високоефективних фільтрів, що забезпечують більше можливостей для регулювання частотних характеристик, ніж простіші Г- або Т-структури.

RC-фільтри – це тип фільтрів, побудованих на основі резисторів (R) і конденсаторів (C), які використовуються для фільтрації сигналів за частотою. Їхня популярність обумовлена простотою реалізації, малими розмірами та низькою вартістю. Однак вони мають обмежену селективність (здатність чітко розділяти частоти), оскільки в їхній схемі є лише один реактивний елемент – конденсатор, опір якого залежить від частоти сигналу.

Конденсатор володіє реактивним опором, який змінюється зі зміною частоти сигналу: на високих частотах його опір низький, а на низьких частотах – високий. У комбінації з резистором, RC-ланцюг створює фільтр, який може пропускати або блокувати сигнали в залежності від частоти.

Типи RC-фільтрів:

1. *Фільтр нижніх частот (ФНЧ).* В схемі RC-фільтра нижніх частот резистор R підключається послідовно, а конденсатор C – паралельно на виході (рис. 12.2.4).

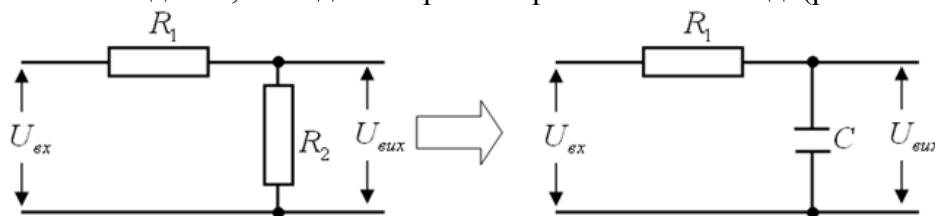


Рис. 12.2.4. RC-фільтр нижніх частот.

На низьких частотах реактивний опір конденсатора великий, тому сигнал передається через резистор на вихід без значних втрат. На високих частотах опір конденсатора малий, і високочастотні сигнали шунтуються через конденсатор, не проходячи на вихід.

Частота зрізу для такого фільтра розраховується за формулою:

$$\nu_{зрізу} = \frac{1}{2\pi RC},$$

де R – опір резистора, C – ємність конденсатора, $\nu_{зрізу}$ – частота зрізу, на якій напруга сигналу зменшується на 3 дБ (або у $\sqrt{2}$ рази).

2. *Фільтр верхніх частот (ФВЧ).* У цьому випадку конденсатор C підключається послідовно, а резистор R – паралельно на виході. На високих частотах конденсатор має низький опір, і сигнал безперешкодно передається на вихід. На низьких частотах опір конденсатора великий, що блокує проходження низькочастотних сигналів.

При розрахунках фільтрів $U_{вх}$ можна прийняти за 1, а $U_{вих}$ за 0,7 (значення відповідне зрізу). Завдяки простоті реалізації, RC-фільтри часто використовуються в електронних приладах, де важлива компактність і вартість, але не потрібна висока селективність.

12.3. Фільтри на основі котушок індуктивності і конденсаторів.

LC-фільтри – це фільтри, побудовані на основі котушок індуктивності (L) і конденсаторів (C). Вони забезпечують вищу селективність, ніж RC-фільтри, завдяки поєднанню двох реактивних елементів, опір яких змінюється залежно від частоти сигналу.

Переваги LC-фільтрів:

1. Вища селективність. Оскільки LC-фільтри використовують і котушку індуктивності, і конденсатор, вони краще відокремлюють частоти в порівнянні з RC-

фільтрами, які базуються лише на конденсаторі. Це дозволяє точніше визначати смугу пропускання та смугу затримання.

2. Менше згасання в смузі пропускання. *LC*-фільтри мають низькі втрати в смузі пропускання, що дозволяє сигналам проходити через фільтр із мінімальним ослабленням.

3. Більше згасання в смузі затримання. *LC*-фільтри ефективніше блокують сигнали поза смугою пропускання, забезпечуючи краще ослаблення небажаних частот.

Котушка індуктивності (*L*) має реактивний опір, який збільшується зі зростанням частоти сигналу. Конденсатор (*C*), навпаки, має реактивний опір, який зменшується зі зростанням частоти. Разом ці елементи створюють фільтр, що може пропускати або блокувати сигнали залежно від їх частоти.

Типи LC-фільтрів.

1. *Фільтр нижніх частот (ФНЧ)*. Конденсатор встановлюється паралельно з навантаженням, а котушка індуктивності – послідовно в колі. На низьких частотах котушка індуктивності пропускає сигнал, а конденсатор блокує високочастотні сигнали.

2. *Фільтр верхніх частот (ФВЧ)*. Котушка індуктивності встановлюється паралельно, а конденсатор – послідовно. На високих частотах конденсатор пропускає сигнал, а котушка блокує низькочастотні сигнали.

3. *Смугові фільтри*. Смугові *LC*-фільтри використовують одночасно конденсатор та індуктивність для пропускання сигналів в певному діапазоні частот, блокуючи сигнали поза ним.

4. *Загороджувальні фільтри*. Ці фільтри блокують сигнали в певному діапазоні частот, пропускаючи інші частоти.

Контрольні запитання до лекції № 12.

1. Що таке електричний фільтр та для чого він використовується?
2. За якими параметрами можна здійснювати виділення електричних сигналів?
3. Що розуміють під смугою пропускання електричного фільтра?
4. Що називається граничною частотою (частотою зріза) електричного фільтра?
5. Як класифікуються електричні фільтри за розташуванням смуги пропускання?
6. Як поділяються електричні фільтри в залежності від типу застосовуваної елементної бази?
7. Назвіть основні структури схем фільтрів.
8. За якою формулою можна знайти частоту зрізу в *RC*-фільтрах нижніх частот?
9. Зобразіть структурну схему *RC*-фільтра верхніх частот.
10. Які основні переваги *LC*-фільтрів над *RC*-фільтрами?

ЛЕКЦІЯ 13. ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

13.1. Загальні відомості про підсилювачі електричних сигналів.

Підсилювач електричних сигналів є важливим електронним пристроєм, що дозволяє збільшувати рівень потужності, напруги або струму вхідного сигналу. Основна мета підсилювача – це підвищення амплітуди сигналу, зберігаючи його оригінальну форму, тобто без значного спотворення. Для виконання цієї функції підсилювач обов'язково потребує зовнішнього джерела живлення, яке забезпечує додаткову енергію для підсилення.

Якщо говорити про узагальнену структурну схему підсилювача, вона зазвичай складається з таких основних компонентів:

1. *Вхід (вхідний каскад)* – куди подається слабкий сигнал, що потребує підсилення. Це місце, де до підсилювача надходить вхідний сигнал. Часто вхідний каскад включає резистори або інші компоненти для налаштування і фільтрації сигналу, щоб запобігти спотворенням на ранніх етапах.

2. *Підсилювальний каскад* – основна частина пристрою, що виконує збільшення сигналу. Це основний елемент схеми, який відповідає за збільшення амплітуди сигналу. Може бути реалізований за допомогою транзисторів, операційних підсилювачів або інших активних компонентів, що збільшують потужність сигналу.

3. *Джерело живлення* – забезпечує енергію, необхідну для збільшення потужності сигналу. Оскільки підсилювач збільшує вихідну потужність у порівнянні з вхідною, цей процес потребує додаткової енергії, яку надає джерело живлення.

4. *Вихід (вихідний каскад)* – підсилений сигнал надходить до споживача. Це частина схеми, яка формує підсилений сигнал для подальшої передачі до навантаження (наприклад, гучномовців або іншого пристрою). Вихідний каскад також може включати в себе елементи для узгодження опору та запобігання перевантаженню підсилювача.

На рисунку 13.1.1, показана схема з позначеними вхідним сигналом, підсилювальним каскадом, джерелом живлення та вихідним сигналом.

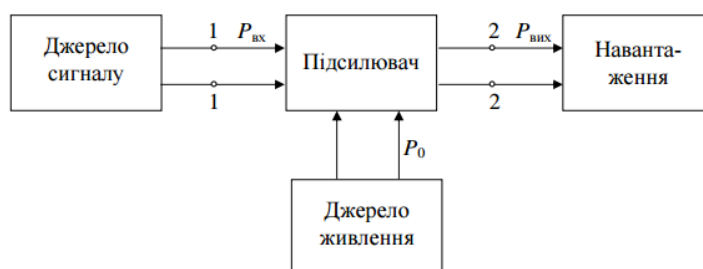


Рис. 13.1.1. Узагальнена структурна схема підсилювача.

Ця схема демонструє базову структуру, яка може бути модифікована залежно від конкретного типу підсилювача (наприклад, потужності, частотного діапазону чи типу сигналу).

У підсилювачі завжди виконується нерівність між потужностями: $P_{вх} < P_{вих} < P_{жив}$, де: $P_{вх}$ – потужність, що подається від джерела сигналу на вхід підсилювача; $P_{вих}$ – потужність, яку підсилювач передає на навантаження (вихідний сигнал); $P_{жив}$ – потужність, яку підсилювач отримує від зовнішнього джерела живлення.

Ця нерівність підкреслює, що підсилювач використовує енергію від джерела живлення для збільшення вихідної потужності, тобто підсилювач перетворює енергію живлення в потужність вихідного сигналу, при цьому керуючим фактором виступає вхідний сигнал. Іншими словами, підсилювач є пристроєм, що управляється слабким вхідним сигналом і перетворює енергію зовнішнього джерела в підсилений вихідний сигнал.

Перетворення енергії в підсилювачі здійснюється за допомогою активних підсилювальних елементів, таких як:

1. *Біполярні транзистори*. Активні елементи, що керують потоком електронів і підсилюють сигнали на основі зміни струму бази.

2. *Польові транзистори.* Використовують електричне поле для керування потоком струму через канал, забезпечуючи ефективне підсилення сигналу.

3. *Електронні лампи.* Вакуумні прилади, які історично використовувалися для підсилення сигналів, особливо в радіо- та телевізійних передавачах.

4. *Інтегральні мікросхеми (ІМС).* Включають безліч активних і пасивних компонентів (транзистори, резистори, конденсатори) на одному чіпі для створення компактних і потужних підсилювачів.

5. *Варикапи.* Напівпровідникові прилади, що змінюють свою ємність в залежності від напруги і використовуються для налаштування підсилювачів.

Ці елементи є ключовими для роботи підсилювача, оскільки саме через них здійснюється процес перетворення енергії і підсилення вхідного сигналу до бажаного рівня на виході.

Підсилювач можна розглядати як *нелінійний активний чотириполіусник*, коли джерело живлення є частиною схеми (рис. 13.1.2). Це означає, що підсилювач має дві пари клем – вхідні та вихідні, через які подається і знімається сигнал.



Рис. 13.1.2. Підсилювач електричних сигналів як чотириполіусник.

Вхідні клемми чотириполіусника служать для подачі вхідного сигналу, що складається з вхідної напруги $U_{вх}$ та вхідного струму $I_{вх}$. Саме цей сигнал необхідно підсилити. До вихідних клем під'єднується навантаження R_n , на якому здійснюється спад напруги $U_{вих}$ і через яке протікає вихідний струм $I_{вих}$. Ці величини є результатом підсилення вхідного сигналу.

Коли вхідний сигнал (напруга $U_{вх}$ і струм $I_{вх}$) подається на вхідні клемми підсилювача, то він за допомогою енергії від джерела живлення збільшує амплітуду цього сигналу. В результаті, на вихідних клеммах підсилювача з'являється підсилений сигнал, який передається на навантаження R_n . Тобто вихідна напруга $U_{вих}$ і струм $I_{вих}$ є значно більшими за вхідні, залежно від коефіцієнта підсилення.

Підсилювач класифікується як нелінійний активний чотириполіусник через те, що:

- він включає активні компоненти (транзистори, лампи, ІМС), які використовують енергію від джерела живлення для підсилення сигналу;
- відношення між вхідними і вихідними параметрами (напруга, струм) не є лінійним для всіх режимів роботи, оскільки підсилення може залежати від різних факторів, як-от режиму роботи активних елементів, частоти сигналу та амплітуди вхідного сигналу.

Параметри підсилювачів визначають їхню здатність збільшувати напругу, струм або потужність сигналу.

Коефіцієнт підсилення напруги k_U – відношення вихідної напруги до вхідної:

$$k_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}},$$

де $U_{вих}$ – вихідна напруга, а $U_{вх}$ – вхідна напруга. Він показує, наскільки підсилювач збільшує напругу сигналу.

Коефіцієнт підсилення струму k_I – відношення вихідного струму до вхідного:

$$k_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}},$$

де $I_{вих}$ – вихідний струм, а $I_{вх}$ – вхідний струм. Цей коефіцієнт показує, як підсилювач збільшує струм сигналу.

Коефіцієнт підсилення потужності k_p – відношення вихідної потужності до вхідної:

$$k_p = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вих}} I_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}} I_{\text{вх}}} = k_U k_I,$$

де $P_{\text{вих}}$ – вихідна потужність, а $P_{\text{вх}}$ – вхідна потужність. Коефіцієнт підсилення потужності характеризує ефективність підсилювача в плані передачі енергії.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – залежність коефіцієнта підсилення від частоти сигналу. Вона показує, як змінюється підсилення при різних частотах сигналу і є важливою характеристикою для визначення діапазону частот, на яких підсилювач працює ефективно. Графічно ця залежність зазвичай зображується у вигляді графіка (рис. 13.1.3), де по осі частот відкладається частота, а по осі ординат – коефіцієнт підсилення.

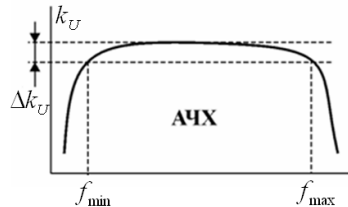


Рис. 13.1.3. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача

Діапазон підсилюваних частот Δf – це діапазон частот, в межах якого нерівномірність амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) Δk не перевищує заданої величини:

$$\Delta f = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}.$$

Іншими словами, це частотний діапазон, на якому підсилювач зберігає стабільне підсилення без значних відхилень.

Вхідний опір – опір підсилювача, який він створює на своєму вході для змінного струму. Високий вхідний опір дозволяє мінімізувати вплив підсилювача на джерело сигналу, забезпечуючи більшу ефективність.

Вихідний опір – опір, який створюється на виході підсилювача для змінного струму. Низький вихідний опір важливий для передачі потужності до навантаження, зменшуючи втрати енергії.

Амплітудна характеристика – залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного сигналу:

$$U_{\text{вих}} = k_U U_{\text{вх}}.$$

Ідеальний підсилювач має амплітудну характеристику у вигляді прямої лінії, де кут нахилу дорівнює коефіцієнту підсилення. Якщо підсилювач є ідеальним, його підсилення є лінійним і не вносить спотворень у сигнал.

Коефіцієнт нелінійних спотворень. Нелінійні спотворення виникають через відхилення амплітудної характеристики реального підсилювача від ідеальної прямої лінії. Ці спотворення призводять до появи нових гармонік (компонентів сигналу) на частотах $2f$, $3f$, ..., nf , які не були присутні в оригінальному сигналі. Цей коефіцієнт визначається як відношення квадратного кореня суми квадратів амплітуд гармонік до амплітуди основної частоти (першої гармоніки):

$$k_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}.$$

Цей показник також відомий як коефіцієнт гармонік і вказує на рівень спотворень у підсилювачі.

Коефіцієнт підсилення в децибелах (дБ) – коефіцієнт підсилення напруги та потужності часто виражають в децибелах для зручності порівняння та спрощення обчислень:

$$k_p(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}.$$

Враховуючи, що потужність пропорційна квадрату напруги ($P \sim U^2$), можна отримати логарифмічний вираз для підсилення потужності через напругу:

$$k_U(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$$

Таким чином, всі ці параметри дозволяють комплексно оцінити підсилювач і його здатність забезпечувати якісне та ефективне підсилення сигналу без значних спотворень.

13.2. Класифікація підсилювачів.

Підсилювачі, побудовані на активних елементах, таких як транзистори або електронні лампи, поділяються на *транзисторні* та *лампові підсилювачі*. В сучасних радіотехнічних пристроях найбільш поширеними є транзисторні підсилювачі через їхні переваги у відносно компактному розмірі, енергоефективності та високій надійності.

Основною функціональною одиницею підсилювача є підсилювальний каскад. Він містить: *джерело живлення* – забезпечує необхідну енергію для підсилення; *транзистор* – основний активний елемент, що виконує підсилення сигналу; *схема зміщення* – забезпечує режим роботи транзистора за постійним струмом, регулюючи положення робочої точки транзистора на характеристиці.

Однокаскадний підсилювач складається з одного підсилювального каскаду і має обмежений коефіцієнт підсилення.

Багатокаскадний підсилювач складається з кількох каскадів. *Коефіцієнт підсилення* багатокаскадного підсилювача визначається як добуток коефіцієнтів підсилення окремих каскадів:

$$K_{\text{сум}} = K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n$$

Якщо коефіцієнти підсилення кожного каскаду виражені в децибелах, то сумарний коефіцієнт підсилення є сумою цих значень:

$$K_{\text{сум}}(\text{дБ}) = K_1(\text{дБ}) + K_2(\text{дБ}) + \dots + K_n(\text{дБ})$$

Залежно від того, як з'єднуються каскади підсилювача, розрізняють три основні види зв'язку: з безпосереднім зв'язком, з ємнісним зв'язком та з трансформаторним зв'язком (рис. 13.2.1).

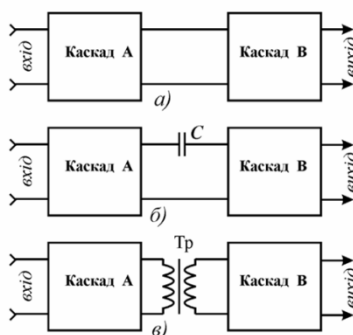


Рис. 13.2.1. Способи зв'язку між каскадами багатокаскадного підсилювача: а – безпосередній зв'язок, б – ємнісний зв'язок, в – трансформаторний зв'язок.

Підсилювачі з безпосереднім зв'язком. Між каскадами відсутні проміжні елементи (конденсатори чи трансформатори). Такі підсилювачі краще передають низькочастотні сигнали і використовуються для підсилення постійного струму.

Підсилювачі з ємнісним зв'язком. Каскади з'єднуються через конденсатор, який блокує постійний струм і пропускає змінний. Це найпоширеніший тип зв'язку, що забезпечує хорошу роботу на середніх і високих частотах.

Підсилювачі з трансформаторним зв'язком. Для зв'язку між каскадами використовуються трансформатори. Це дозволяє узгоджувати опори між каскадами, проте такі підсилювачі є громіздкими і мають обмежений діапазон частот.

Підсилювачі класифікуються залежно від *смуги підсилювальних частот*, що визначає їхнє застосування та конструктивні особливості. Основні типи підсилювачів, які відрізняються

за цим критерієм: підсилювачі *постійного струму*, *смугові підсилювачі* та *резонансні підсилювачі* (рис. 13.2.2)

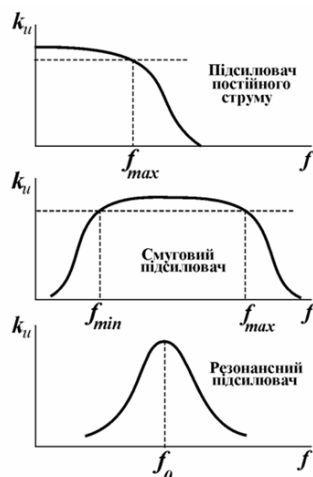


Рис. 13.2.2. Амплітудно-частотні характеристики підсилювачів.

Підсилювачі постійного струму (ППС). Ці підсилювачі здатні підсилювати сигнали постійного струму та низькочастотні змінні сигнали. Для передачі таких сигналів між каскадами використовується безпосередній зв'язок, оскільки конденсатори і трансформатори не передають постійний струм. ППС застосовуються в системах вимірювальної техніки та автоматики, де необхідне підсилення дуже низькочастотних або постійних сигналів.

Смугові підсилювачі. Ці підсилювачі працюють в обмеженому діапазоні частот і поділяються на декілька підтипів залежно від частотного діапазону

- Підсилювачі низьких частот (ПНЧ). Підсилювачі, що працюють в діапазоні звукових частот (20 Гц – 20 кГц), називаються підсилювачами звукових частот (ПЗЧ). Їх застосовують в аудіосистемах, підсилювачах гучності та різних акустичних пристроях.

- Підсилювачі високих частот (ПВЧ). Підсилюють сигнали у вищому частотному діапазоні, включаючи радіочастоти. В залежності від частотного діапазону, їх поділяють на:

- Відеопідсилювачі – працюють в діапазоні від 50 Гц до 5 МГц, і використовуються для обробки відеосигналів, телебачення та в інших системах, де потрібне передавання високочастотних аналогових сигналів.

- Підсилювачі радіочастоти (ПРЧ) – підсилюють сигнали в радіочастотному діапазоні, що використовується в радіо, телекомунікаціях і бездротових системах передачі даних. Вони працюють на частотах вище 100 кГц і досягають мегагерцового та гігагерцового діапазону.

Резонансні підсилювачі. В резонансних підсилювачах як навантаження використовуються коливальні контури, які дозволяють підсилювати сигнали на конкретній резонансній частоті або у вузькому діапазоні частот. Такі підсилювачі мають вузьку смугу підсилення і використовуються для вибіркового підсилення певних частот, наприклад, в радіоприймачах та фільтрах.

Диференційні підсилювачі – це підсилювачі, які підсилюють різницю між двома вхідними сигналами. Така схема дозволяє ефективно фільтрувати шум або небажані сигнали, які присутні на обох входах, підсилюючи тільки корисну різницю між ними.

Операційні підсилювачі (ОП) – підсилювачі постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, виконані у вигляді інтегральних мікросхем. Вони часто мають диференційний каскад на вході, що дозволяє їм бути дуже універсальними в різних схемах, таких як підсилення, інтегрування, диференціювання та фільтрація сигналів.

Підсилювачі зазвичай будуються з *попередніх каскадів* та *вихідних каскадів*. Попередні каскади збільшують напругу сигналу, підготувавши його для подальшого підсилення. Вихідні

каскади забезпечують підсилення струму та потужності для живлення навантаження, такого як динаміки чи інші пристрої.

Основним елементом каскаду є керуючий елемент (КЕ), яким зазвичай виступає транзистор. Транзистор разом з резистором навантаження R_n і джерелом живлення E_k формують основне вихідне коло каскаду (рис. 13.2.3).

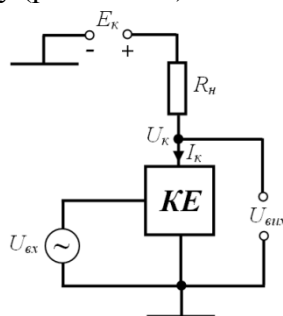


Рис. 13.2.3. Структурна схема підсилювача напруги

Вхідний сигнал $U_{вх}$ впливає на керований опір R_k транзистора, змінюючи його провідність i , таким чином, керуючи потоком струму через вихідне коло.

Вихідний сигнал $U_{вих}$ можна виразити через керований опір R_k і напругу живлення E_k :

$$U_{вих} = E_k \frac{R_k}{R_n + R_k} \quad (1)$$

Це рівняння показує, що вихідна напруга є часткою напруги джерела живлення E_k , і залежить від співвідношення між R_k і R_n .

Розглянемо особливості роботи підсилювача. Вхідний сигнал $U_{вх}$ не потрапляє безпосередньо на вихід, але керує коефіцієнтом передавання напруги живлення через зміну R_k , створюючи на виході копію сигналу. Вихідна напруга $U_{вих}$ завжди є меншою за E_k , тому вибір напруги живлення має значення для досягнення бажаного підсилення. Якщо напруга живлення E_k є більшою за вхідну напругу $U_{вх}$, це дозволяє отримати підсилення, де вихідна напруга буде більшою за вхідну.

Якщо вибрати мале значення керованого опору R_k так, що $R_k \ll R_n$, то рівняння (1) спрощується до:

$$U_{вих} = E_k \frac{R_k}{R_n}$$

Це рівняння першого степеня показує, що якщо R_k змінюється за лінійним законом, то вихідний сигнал $U_{вих}$ буде повторювати форму вхідного сигналу $U_{вх}$, здійснюючи його підсилення.

Отже, принцип роботи підсилювачів заснований на управлінні потоком енергії від джерела живлення через транзистор або інший активний елемент, змінюючи провідність під впливом вхідного сигналу. Таким чином, вхідний сигнал керує потужністю, яку підсилювач передає на вихід, забезпечуючи підсилення сигналу без прямого контакту вхідного та вихідного кола.

Контрольні запитання до лекції № 13.

1. Що називається підсилювачем електричних сигналів?
2. Зобразіть узагальнену структурну схему підсилювального пристрою та поясніть принцип його роботи.
3. Назвіть основні параметри підсилювачів.
4. В чому проявляються нелінійні спотворення підсилювача електричних сигналів?
5. Запишіть формулу визначення коефіцієнта нелінійних спотворень.
6. Запишіть формулу визначення коефіцієнта підсилення напруги та потужності вираженого в децибелах.
7. Як називається найменша підсилювальна одиниця підсилювача?

8. Як поділяються підсилювачі в залежності від способу зв'язку між каскадами?
9. Як поділяються підсилювачі в залежності від смуги підсилюваних частот?
10. Поясніть принцип побудови та роботи підсилюючого каскаду на одному транзисторі.

ЛЕКЦІЯ 14. ГЕНЕРАТОРИ СИНУСОЇДНИХ КОЛИВАНЬ

14.1. Основні відомості та визначення.

Генератор синусоїдальних (гармонійних) коливань – електронний пристрій, який дозволяє генерувати стабільні синусоїдальні сигнали на певній частоті. Основними типами таких генераторів є LC -генератори, кварцеві генератори та RC -генератори, кожен із яких має свої особливості та сфери застосування.

LC -генератори використовують коливальний контур, що складається з конденсатора (C) і котушки індуктивності (L). Частота коливань визначається параметрами цього контуру. Вони зазвичай застосовуються в радіочастотному діапазоні (вище кількох сотень кілогерц), оскільки на високих частотах індуктивні та ємнісні компоненти більш ефективно підтримують коливання.

RC -генератори використовують резистивно-ємнісні (R і C) кола для формування частоти коливань. Ці генератори підходять для роботи на низьких частотах, таких як звуковий діапазон, де використання котушок індуктивності стає менш практичним через великі фізичні розміри індуктивних компонентів.

Кварцові генератори мають подібний принцип роботи до LC -генераторів, але вони використовують кварцовий резонатор замість індуктивного контуру. Кварц має дуже високу стабільність коливань і точність частоти, що робить такі генератори незамінними у застосуваннях, де потрібна виняткова стабільність, наприклад, в годинниках, комунікаційних системах та інших точних приладах.

Кожен із цих генераторів використовується в залежності від вимог до частоти, стабільності і точності сигналу.

Генератори можна класифікувати за частотою генерованих коливань на кілька основних типів: *низькочастотні*, *високочастотні* та *надвисокочастотні*.

Тип генератора	Діапазон частот
Низькочастотні	Від 0,01 Гц до 100 кГц
Високочастотні	Від 100 кГц до 100 МГц
Надвисокочастотні	Від 100 МГц і вище

Низькочастотні генератори працюють у діапазоні від декількох герц до десятків або сотень кілогерц. Використовуються переважно для звукових та інфразвукових сигналів. Наприклад, генератори сигналів для аудіоапаратури, тестування звукових систем, тощо. Для них часто застосовують RC -генератори, які добре працюють у цьому частотному діапазоні.

Високочастотні генератори генерують коливання у діапазоні від сотень кілогерц до кількох десятків мегагерц. Такі генератори широко використовуються в телекомунікаційних системах, радіозв'язку, радіолокації та інших високочастотних застосуваннях. LC -генератори є основним типом генераторів, що використовуються для цих частот.

Надвисокочастотні (НВЧ) генератори працюють у діапазоні від кількох десятків мегагерц до гігагерцових частот (у тому числі в мікрохвильовому діапазоні). Використовуються в супутникових системах зв'язку, мікрохвильових радарях, радіоастрономії, а також у наукових дослідженнях. У цьому діапазоні можуть використовуватися спеціальні НВЧ-генератори, такі як магнетрони або клістри, які забезпечують стабільне генерування на таких високих частотах.

Генератори синусоїдальних коливань поділяються на два основні типи залежно від способу збудження: генератори з незалежним збудженням та генератори з самозбудженням (автогенератори).

Генератори з незалежним збудженням працюють як підсилювачі, вони менш поширені в застосуваннях, де потрібна автоматична генерація сигналів. Їх зазвичай не розглядають у контексті самостійного генерування коливань, тому ми їх розглядати не будемо. Генератори з самозбудженням (автогенератори) самостійно генерують коливання без зовнішнього джерела збудження. Основним принципом їх роботи є позитивний зворотний зв'язок, що дозволяє частині вихідного сигналу повертатися на вхід і підтримувати коливання. Прикладом автогенераторів є LC -, RC - і кварцові генератори. У них використовується активний елемент

(наприклад, транзистор або операційний підсилювач), який разом з коливальним контуром або іншим частото задаючим елементом забезпечує підтримку синусоїдальних коливань. Основна перевага автогенераторів полягає в їх здатності автоматично генерувати та підтримувати стабільні коливання після первинного запуску.

Автогенератор, що генерує синусоїдальні коливання, працює на основі принципу позитивного зворотного зв'язку, який компенсує втрати енергії в коливальному контурі і дозволяє підтримувати незатухаючі коливання (рис. 14.1.1). Давайте розглянемо, як це відбувається детальніше.

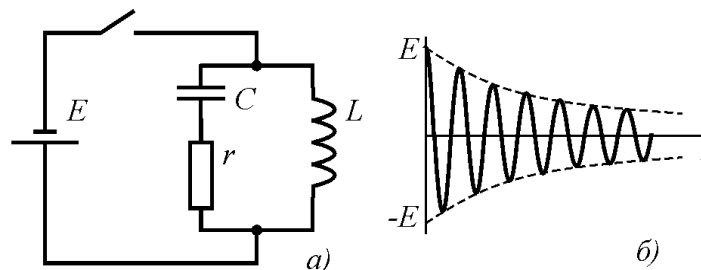


Рис. 14.1.1. Автоколивальні процеси в коливальному контурі.

Ідеальний коливальний контур ($r = 0$). У разі відсутності втрат (опір $r=0$), після розмикання ключа конденсатор C , заряджений до напруги E , почне розряджатися через індуктивність L , викликаючи перетворення енергії між електричним полем конденсатора і магнітним полем котушки індуктивності. У такому ідеальному контурі кутова частота коливань буде рівна:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Коливання будуть незатухаючими, оскільки в ідеальному випадку немає втрат енергії в опорі.

Реальний коливальний контур ($r > 0$). У реальному контурі, де присутній опір r , частина енергії коливань розсіюється у вигляді тепла, що викликає зменшення амплітуди коливань з часом. Такі коливання називаються загасаючими, і амплітуда зменшується за експоненціальним законом:

$$A = A_0 e^{-\delta t},$$

де A_0 – початкова амплітуда, δ – декремент затухання, який залежить від втрат в контурі. Кутова частота загасаючих коливань ω_d у реальному контурі з опором r визначається за формулою:

$$\omega_d = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}.$$

Щоб забезпечити незатухаючі коливання в реальному контурі, необхідно компенсувати втрати енергії за допомогою позитивного зворотного зв'язку. Основний принцип автогенератора полягає в тому, щоб частина вихідного сигналу поверталася назад на вхід коливального контуру, збігаючись по фазі з основним сигналом, і підтримувала коливання, компенсуючи втрати на опорі.

Основні елементи автогенератора:

- *Частотовибірна система.* Це коливальний контур (LC або RC), який визначає частоту генерованих коливань.
- *Підсилювач.* Підсилювач, живлений від джерела постійного струму, забезпечує енергію для підтримки коливань і компенсує втрати енергії в коливальному контурі.

○ *Коло позитивного зворотного зв'язку.* Це система, яка повертає частину вихідного сигналу на вхід генератора таким чином, що сигнал зворотного зв'язку збігається по фазі з сигналом в контурі. Це дозволяє підтримувати стабільні синусоїдальні коливання.

14.2. LC-генератори.

LC-генератори широко використовуються для генерування сигналів високої частоти, зокрема в радіотехніці, зв'язку та обчислювальній техніці. Основні компоненти схеми LC-автогенератора включають:

1. *Колівальна система (коливальний контур).* Складається з конденсатора і котушки індуктивності, з'єднаних паралельно або послідовно. Власна частота коливань цього контуру визначається за формулою:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

де L – індуктивність котушки, C – ємність конденсатора. Саме цей контур визначає частоту генерованого сигналу.

2. *Джерело енергії.* Живить схему і підтримує незатухаючі коливання. Джерело енергії забезпечує постійний струм, який використовується для підтримки коливань у контурі.

3. *Транзистор.* Використовується як підсилювач, з'єднаний зі спільним емітером. Транзистор здійснює управління потоком енергії, яка поступає в коливальний контур від джерела живлення. Він також забезпечує підсилення слабких коливань у контурі.

4. *Зворотний зв'язок.* Важливий елемент, що дозволяє частині вихідного сигналу надходити на вхід підсилювача. У схемах з трансформаторним зворотним зв'язком цей зворотний зв'язок забезпечується за допомогою трансформатора, який передає сигнал із вихідної ланки на вхідну.

Основний принцип роботи LC-генератора полягає в тому, що коливальний контур постійно підтримується в стані резонансу, а підсилювач підживлює втрати енергії в контурі. Енергія, передана з виходу на вхід через коло зворотного зв'язку, має бути у фазі з вихідним сигналом для забезпечення стійких коливань.

Схема LC-автогенератора з трансформаторним зворотнім зв'язком показана на рис. 14.2.1.

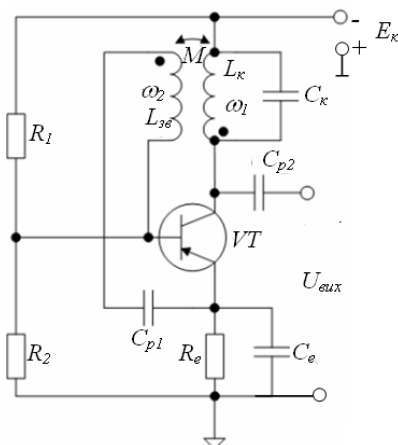


Рис. 14.2..1. Схема LC-автогенератора.

Автогенератор містить:

1. *Колівальний контур.* Паралельно з'єднані конденсатор і котушка індуктивності.
2. *Джерело електричної енергії.* Необхідне для підтримання коливань у контурі. Завдяки цьому джерелу постійно подається енергія, щоб компенсувати втрати в контурі, і таким чином підтримуються незатухаючі коливання.

3. *Транзистор.* Виконує роль підсилювача, через який подається енергія з джерела у коливальний контур. Частіше використовується схема з транзистором із спільним емітером, яка забезпечує підсилення сигналу і дозволяє підтримувати коливання.

4. *Елемент зворотного зв'язку.* Для того щоб автогенератор функціонував, необхідно організувати коло зворотного зв'язку. Зворотний зв'язок може бути організований через трансформатор або інші пасивні компоненти, які подають частину вихідного сигналу назад на вхід схеми. Це допомагає підтримувати коливання, забезпечуючи фазовий зсув, необхідний для резонансу.

У випадку *LC*-генератора з трансформаторним зворотним зв'язком, коло зворотного зв'язку формується за допомогою трансформатора. Основні компоненти такої схеми:

- Транзистор із спільним емітером. Використовується для підсилення сигналу. У схемі з спільним емітером транзистор має високе підсилення, що робить його ефективним для використання в генераторах.
- Коливальний контур (*L* і *C*). Визначає частоту коливань і забезпечує резонансні умови.
- Трансформаторний зворотний зв'язок. Частина вихідної напруги через трансформатор подається на вхід транзистора для збудження коливань.

Коли подається енергія на схему, у коливальному контурі починають формуватися високочастотні коливання. Транзистор підсилює коливання, підтримуючи їх амплітуду. Частина вихідної напруги через трансформатор повертається на вхід схеми (через базу транзистора), що підтримує коливання і стабілізує їх. В результаті, *LC*-генератор генерує стабільні високочастотні коливання. Така схема використовується в різноманітних пристроях, що потребують генерації високочастотних сигналів, наприклад, в радіопередавачах або електронних системах зв'язку.

14.3. *RC* кола для генераторів синусоїдльних коливань.

RC-генератори використовуються для генерування синусоїдних коливань в широкому діапазоні частот, завдяки чому вони є популярним вибором в електроніці. Вони працюють на основі *RC*-фільтрів, що складаються з резисторів (*R*) і конденсаторів (*C*), які створюють необхідні фазові зсуви для забезпечення зворотного зв'язку. На відміну від *LC*-генераторів, які для низькочастотних коливань потребують великих індуктивностей і ємностей, *RC*-генератори є більш зручними через компактніший розмір компонентів і можливість виготовлення в інтегральній схемі.

Ключовими перевагами *RC*-генераторів є:

1. Широкий діапазон частот – вони можуть працювати на частотах від частин герца до сотень кілогерц, що робить їх універсальними для багатьох застосувань.
2. Компактність і вартість – оскільки ці генератори не потребують великих індуктивностей, вони можуть бути меншими за розміром і дешевшими у виробництві.
3. Стабільність – *RC*-генератори забезпечують досить стабільні синусоїдні коливання.

Розрізняють наступні типи *RC*-генераторів:

1. Генератори з фазовим зсувом на $\pm 180^\circ$ – ці генератори використовують кола для повороту фази сигналу на 180° , що забезпечує позитивний зворотний зв'язок, необхідний для генерації коливань.
2. Генератори з нульовим фазовим зсувом – у таких генераторах на певній частоті фазовий зсув сигналу в колі зворотного зв'язку дорівнює нулю, що також дозволяє створювати стабільні коливання.

У фазуючих *RC*-колах частота, кратна $n\pi$, де $n=0, 1$, називається квазірезонансною. На цій частоті відбувається фазовий зсув сигналу на 180° , що є важливим для правильного функціонування *RC*-генераторів, оскільки зсув на 180° забезпечує необхідний позитивний зворотний зв'язок для генерації стабільних коливань.

У схемах фазозсувних *RC*-генераторів використовуються спеціальні кола для забезпечення потрібного фазового зсуву. Такі кола зазвичай складаються з кількох *RC*-ланок, що поєднуються в каскадні структури. Найпоширенішими є Γ -подібні ланки, кожна з яких виконує фазовий зсув сигналу на певний кут.

Для досягнення фазового зсуву на 180° на квазірезонансній частоті, необхідно, щоб вихідна напруга змістилася відносно вхідної на 180° . Це досягається шляхом використання трьох послідовних фазозсувних RC -ланок.

Можна також забезпечити необхідний фазовий зсув використовуючи диференціальні ланцюжки. Кожен з таких ланцюжків (ланка RC -фільтра) виконує зсув фази на певний кут, а сукупний зсув усіх трьох ланок дорівнює π (або 180°). Для цього використовують як мінімум три ланки.

Розрізняють наступні види фазозсувних кіл: R -паралель та C -паралель (рис. 14.3.1).

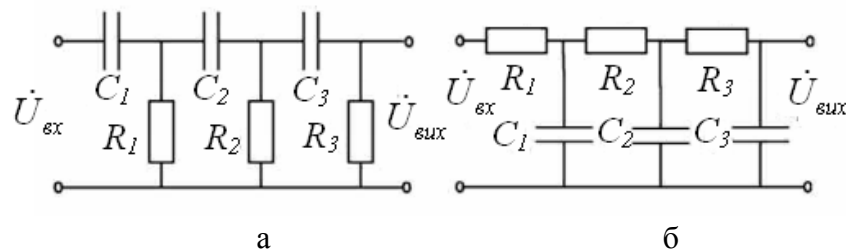


Рис. 14.3.1. Фазообертаючі кола: R -паралель (а); C -паралель (б).

Для R -паралелі характерно те, що резистори підключені паралельно, а конденсатори – послідовно. Вона забезпечує необхідний фазовий зсув і передавання сигналу з мінімальними втратами.

Для C -паралелі характерно те, що конденсатори підключені паралельно, а резистори – послідовно. Ця схема також дозволяє досягти потрібного зсуву фази на робочій частоті. Обидві ці конфігурації забезпечують належний фазовий зсув і використовуються залежно від конкретних вимог до схеми генератора. У практичному застосуванні, ці RC -кола дозволяють забезпечити стабільне генерування синусоїдальних сигналів, що робить їх ефективними для використання у багатьох електронних пристроях, особливо на низьких частотах, де LC -контури стають непрактичними через великі розміри індуктивностей.

Контрольні запитання до лекції № 14.

1. Що називається генератором синусоїдальних коливань?
2. Назвіть три основні типи генераторів електричних сигналів синусоїдальної форми. В яких випадках вони використовуються?
3. Як поділяються генератори залежно від частоти генеруючих коливань?
4. Для чого в генераторах використовується позитивний зворотний зв'язок?
5. Поясніть принцип роботи автогенератора синусоїдальних коливань.
6. Назвіть основні умови існування в генераторі незатухаючих електричних коливань.
7. Для чого призначені LC -генератори. Які різновиди схем транзисторних автогенераторів типу LC ви знаєте?
8. Назвіть основні структурні одиниці LC -автогенератора з трансформаторним зворотнім зв'язком. Поясніть принцип його роботи.
9. Для чого призначені RC -генератори? Яка відмінність їх від LC -генераторів?
10. На які основні групи за принципом побудови поділяються RC -генератори?

ЛЕКЦІЯ 15. ВИПРЯМЛЯЧІ

15.1. Класифікація випрямлячів.

Випрямляч – це електротехнічний пристрій, що перетворює змінний струм у постійний для живлення електричних споживачів, які потребують постійної напруги. Його застосування необхідне, якщо джерело живлення забезпечує змінний струм, наприклад, промислова мережа частотою 50 Гц.

Розрізняють наступні види випрямлячів:

Некеровані випрямлячі – використовують діоди як вентиля, які не мають можливості керування і проводять струм, коли напруга на них позитивна.

Керовані випрямлячі – містять тиристори або інші керовані напівпровідникові елементи, які дозволяють регулювати момент початку провідності, що дає змогу змінювати вихідну напругу.

Випрямлячі можна класифікувати за:

1. Фазністю.

Однофазні – використовують у схемах малої потужності та можуть бути:

Однопівперіодні (струм проходить через вентиль лише протягом одного півперіоду).

Двопівперіодні (струм проходить протягом обох півперіодів).

Схеми з множенням напруги (для підвищення вихідної напруги).

Трифазні – розраховані на вищу потужність і підключаються через трифазні трансформатори.

2. Потужністю.

Малої потужності – однофазні випрямлячі.

Середньої та великої потужності – переважно трифазні.

Можна виділити наступні основні компоненти випрямляча (рис. 15.1.1):

- *Силовий трансформатор* – налаштовує вихідну напругу мережі для необхідного значення навантаження.
- *Вентиль (випрямний діод)* – проводить струм лише в одному напрямку, виконуючи випрямлення.
- *Згладжувальний фільтр* – зменшує пульсації випрямленої напруги для досягнення стабільного постійного струму.
- *Стабілізатор* – підтримує постійну напругу на навантаженні, зменшуючи коливання.

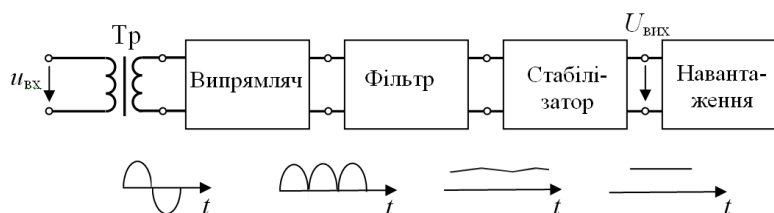


Рис. 15.1.1. Структурна схема випрямлення змінної напруги

Серед основних характеристик випрямляча виділяють наступне:

1. Середнє значення випрямленої напруги (U_0) – вимірюється у вольтах (В) і відображає ефективний рівень постійної напруги на виході.
2. Середнє значення випрямленого струму (I_0) – вимірюється в амперах (А) і характеризує середню силу струму у колі навантаження.
3. Потужність (P_0) у колі випрямленої напруги – показує вихідну потужність випрямляча. При цьому:

$$P_0 = I_0 U_0$$

4. Коефіцієнт пульсацій k_n – описує рівень пульсацій постійної напруги на виході. Він може розраховуватися як відношення амплітуди першої гармоніки пульсацій (U_{m1}) до середнього значення випрямленої напруги (U_0) або як відношення різниці між максимальним і мінімальним значенням напруги на навантаженні до подвоєного значення U_0 (рис. 15.1.2):

$$k_n = \frac{U_{n\max} - U_{n\min}}{2U_0}$$

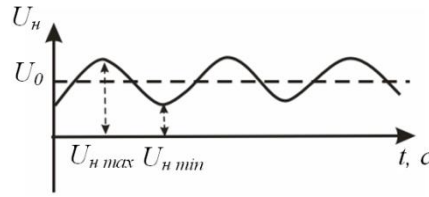


Рис. 15.1.2. До пояснення розрахунку коефіцієнта пульсацій

5. Діюче (I) та амплітудне (I_{\square}) значення струму випрямлення – діюче значення струму характеризує середню силу струму у колі, а амплітудне показує його максимальне значення протягом циклу. Ці параметри використовуються для оцінки навантаження, яке витримують компоненти випрямляча.

6. Максимальна зворотна напруга на діодах ($U_{зв.мах}$) – це максимальна напруга, що прикладається до діода у зворотному напрямку, коли він блокує струм. Вона є критичним параметром для захисту діодів від пошкоджень через перевищення напруги.

7. Коефіцієнт використання трансформатора β – показує ефективність трансформатора у випрямлячі. Він розраховується як відношення габаритної потужності трансформатора (визначеної його розмірами та параметрами) до повних потужностей первинної (S_1) і вторинної (S_2) обмоток:

$$\beta = \frac{S_{caб}}{S_1 + S_2}$$

Цей коефіцієнт допомагає визначити, наскільки ефективно використовується трансформатор при заданому режимі роботи випрямляча.

15.2. Однофазний однонапівперіодний випрямляч.

Однонапівперіодний випрямляч з активним навантаженням є простою схемою, яка випрямляє змінну напругу, пропускаючи лише одну півхвилю. Це робиться за допомогою одного діода, який проводить струм тільки в період додатної напівхвилі вхідного сигналу. Схема такого випрямляча представлена на рис. 15.2.1:

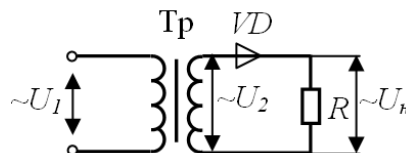


Рис. 15.2.1. Схема однофазного однонапівперіодного випрямляча: Тр – трансформатор, U_1 , U_2 – напруги на первинній та на вторинній обмотках трансформатора, U_n – напруга на навантаженні.

Розглянемо принцип роботи однофазного однонапівперіодного випрямляча. Під час додатної напівхвилі вхідної напруги (з вторинної обмотки трансформатора), на аноді діода виникає позитивний потенціал, що відкриває діод, і струм проходить через навантаження R . У цей період напруга на навантаженні дорівнює випрямленій напрузі. Під час від'ємної напівхвилі напруги на аноді діода виникає від'ємний потенціал, що закриває діод. В цей період струм не проходить через діод і навантаження, тому на виході немає напруги (рис. 15.2.2):

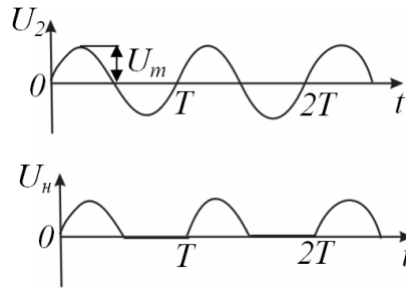


Рис. 15.2.2. Форма напруг на вході ($U_2(t)$) та на виході ($U_n(t)$) однофазного однопівперіодного випрямляча

Можна виділити наступні основні характеристик однопівперіодного випрямляча.

1. Період вихідного сигналу дорівнює періоду вхідного сигналу, тобто він повторюється раз на кожен період змінної напруги.
2. Середнє значення вихідної напруги U_2 є меншим, ніж амплітудне значення, оскільки струм проходить лише протягом одного півперіоду. При цьому:

$$U_2 = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi}$$

3. Максимальна зворотна напруга на діоді дорівнює амплітуді вхідної напруги $U_{max} = U_m$.
4. Коефіцієнт пульсації випрямляча дорівнює 1,7, що вказує на високий рівень пульсацій вихідного струму.

Для коректної роботи діод у схемі повинен задовольняти умови:

- допустимий струм діода $I_{дон.д}$ повинен бути не меншим за струм споживача I_{cn} :

$$I_{дон.д} \geq I_{cn} ;$$

- зворотна допустима напруга $U_{зв.дон}$ діода повинна перевищувати максимальну напругу U_g , яка діє на діод у несправний період:

$$U_{зв.дон} \geq U_g .$$

Перевагами однофазного однопівперіодного випрямляча є простота схеми, наявність лише одного випрямного діода, а недоліками – низька ефективність використання трансформатора через підмагнічування осердя в одному напрямку, що викликає насичення і високі пульсації; низький коефіцієнт корисної дії (максимальне значення ККД – 40,6%).

Через високу пульсацію однопівперіодні випрямлячі зазвичай використовують для живлення схем малої потужності та високої напруги, де стабільність вихідної напруги не є критичною.

15.3. Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом.

Двохпівперіодні однофазні випрямлячі ефективніші за однопівперіодні, оскільки використовують обидва півперіоди змінної напруги для живлення навантаження. Серед основних типів таких випрямлячів – мостовий випрямляч та випрямляч з нульовим виводом вторинної обмотки трансформатора.

Двохпівперіодний випрямляч з нульовим виводом містить трансформатор TV, який має нульову точку, до якої під'єднуються два діоди VD1 та VD2 і резистор навантаження R (рис. 15.3.1):

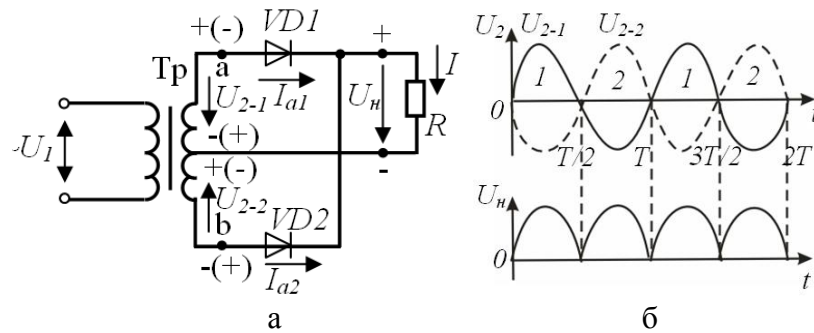


Рис. 15.3.1. Однофазний двоівперіодний випрямляч з нульовим виводом: а – схема, б – часові діаграми.

Робота схеми відбувається наступним чином.

○ Позитивна півхвиля напруги U_1 (інтервал $0-T/2$). На вторинних обмотках з'являються напруги U_{2-1} та U_{2-2} , з полярністю, де U_{2-1} позитивна, а U_{2-2} – негативна. У цьому випадку діод $VD1$ відкритий, і струм тече через нього до навантаження R , створюючи напругу U_n . Діод $VD2$ в цей момент закритий, і через нього струм не проходить.

○ Негативна півхвиля напруги U_1 (інтервал $T/2-T$). Полярність напруг на вторинних обмотках змінюється: U_{2-1} стає негативною, а U_{2-2} – позитивною. Відповідно, діод $VD2$ відкривається, пропускаючи струм до навантаження R , тоді як $VD1$ залишається закритим. Напруга U_n на навантаженні залишається тієї ж полярності, як і у попередньому інтервалі.

Таким чином, випрямлена напруга U_n на навантаженні R зберігає стабільну полярність протягом обох півперіодів напруги мережі. Кожен діод поперемінно пропускає струм протягом свого півперіоду, що дозволяє ефективніше використовувати електричну енергію з мережі.

Перевагами даної схеми є:

- 1) *вища ефективність*. Завдяки двом півперіодам значно підвищується коефіцієнт корисної дії;
- 2) *стабільне навантаження*. Постійна полярність випрямленої напруги забезпечує надійну роботу пристроїв, підключених до випрямляча.

Цей тип випрямлячів широко використовується для живлення пристроїв, що потребують стабільної постійної напруги.

15.4. Однофазний містковий випрямляч.

Містковий випрямляч – це ефективний двоівперіодний випрямляч, в якому для випрямлення струму використовується чотири діоди ($VD1$ - $VD4$), з'єднані за схемою «містка» (рис. 15.4.1):

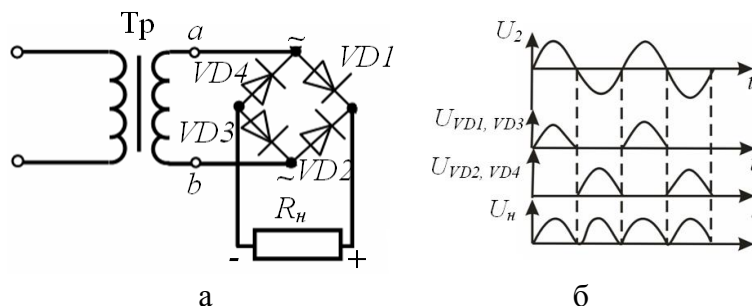


Рис. 15.4.1. Схема місткового випрямляча (а) та його часова діаграма (б).

Розглянемо особливості роботи такого випрямляча.

1. Перший півперіод напруги U_2 . У цей момент точка «а» вторинної обмотки трансформатора має позитивний потенціал щодо точки «б». У результаті відкриваються діоди

VD1 та VD3, а VD2 та VD4 залишаються закритими. Струм проходить через навантажувальний резистор R, забезпечуючи на ньому напругу.

2. Другий півперіод напруги U_2 . Коли потенціал на точці «а» стає нижчим від потенціалу на точці «б», відкриваються діоди VD2 та VD4, тоді як VD1 та VD3 закриті. Це знову ж таки забезпечує проходження струму через резистор R у тому ж напрямку, що і в першому півперіоді, забезпечуючи постійну полярність випрямленої напруги.

Містковий випрямляч має певні переваги.

- *Ефективне використання трансформатора.* У мостовій схемі кожний півперіод струм протікає в різних напрямках у вторинній обмотці, що запобігає підмагнічуванню трансформатора.

- *Коефіцієнт корисної дії (ККД).* Містковий випрямляч має максимальний ККД близько 81,2%, що значно вище за однопівперіодні схеми.

- *Коефіцієнт пульсацій.* КП = 0,48, що означає, що напруга після випрямлення значно стабільніша порівняно з однопівперіодними випрямлячами.

- *Порівняно з випрямлячем з нульовим виводом* містковий випрямляч потребує менше витків у вторинній обмотці трансформатора, що знижує вартість.

При проектуванні місткового випрямляча важливо правильно вибрати діоди відповідно до таких умов.

- *Допустимий струм діода $I_{дон.д}$* повинен відповідати струму, споживаному навантаженням $I_{сн}$:

$$I_{дон.д} \geq \frac{1}{2} I_{сн} .$$

- *Зворотна допустима напруга $U_{зв.дон.}$* має перевищувати напругу U_{ϵ} , що діє на діод у непровідний період:

$$U_{зв.дон.} \geq U_{\epsilon} .$$

При цьому:

$$U_{\epsilon} = \frac{\pi}{2} U_{сн} ,$$

де $U_{сн}$ – напруга споживача, В.

Головним недоліком мостових випрямлячів є потреба у подвоєній кількості діодів, що може трохи ускладнити конструкцію і збільшити вартість. Але за рахунок вищої ефективності та простоти конструкції трансформатора містковий випрямляч залишається одним із найпоширеніших рішень для перетворення змінної напруги в постійну.

Контрольні запитання до лекції № 15.

1. Що називається випрямлячем?
2. Як підрозділяються випрямлячі?
3. Назвіть основні компоненти необхідні для випрямлення змінної напруги?
4. Якими основними параметрами характеризуються випрямлячі?
5. У чому полягає відмінність між керованими та некерованими випрямлячами?
6. Зобразіть схему однопівперіодного випрямляча з активним навантаженням та поясніть принцип її роботи?
7. Запишіть умови для вибору діода за струмом та за напругою для однофазного однопівперіодного випрямляча.
8. Яких типів бувають однофазні двохпівперіодні випрямлячі?
9. Поясніть принцип роботи однофазного двохпівперіодного випрямляча з нульовим виводом.
10. Зобразіть схему та поясніть принцип роботи однофазного місткового випрямляча?

ЛЕКЦІЯ 16. СТАБІЛІЗАТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ТА СТРУМУ

16.1. Класифікація стабілізаторів.

Для забезпечення стабільної роботи радіотехнічних пристроїв важливо підтримувати постійну напругу живлення з високою точністю. Нестабільність напруги часто спричинена такими факторами, як коливання напруги мережі живлення та зміни навантаження на виході випрямляючого пристрою. Також на стабільність можуть впливати температура довкілля, частота мережевої напруги та інші умови.

Різні типи радіотехнічного обладнання мають свої допустимі межі нестабільності:

- Передавальні та зв'язкові радіостанції: допустима нестабільність напруги живлення не більше ніж 2–3%.
- Багатокаскадні підсилювачі постійного струму: допустима нестабільність на рівні 0,005–0,01%.
- Пристрої високого класу точності: допускається нестабільність не більше 0,0001%.

Класифікація стабільності: низька стабільність: зміна напруги або струму більше ніж на 5%; середня стабільність: зміна в межах 1–5%; висока стабільність: зміна в межах 0,1–1%; прецизійна стабільність: зміна менше ніж на 0,1%. Дотримання цих параметрів є критичним для забезпечення надійної та точної роботи чутливих радіотехнічних пристроїв.

Стабілітрони використовуються в стабілізаторах напруги завдяки своїй здатності підтримувати стабільну напругу на ділянці пробою, незалежно від значних змін зворотного струму. На цій властивості базується робота багатьох пристроїв, що автоматично забезпечують сталу напругу або струм, компенсуючи вплив дестабілізуючих факторів.

Виділяють наступні види стабілізаторів.

1. *Параметричні стабілізатори (ПЧН)*. Ці стабілізатори працюють на основі пасивних компонентів із нелінійними вольт-амперними характеристиками (ВАХ), таких як стабілітрони та котушки індуктивності (рис. 16.1, а). Вони мають властивість обмежувати напругу при значних зростаннях струму, забезпечуючи таким чином стабілізацію. Параметричні стабілізатори ефективні для підтримання стабільності напруги в умовах, коли змінюються навантаження або інші зовнішні фактори.

2. *Компенсаційні стабілізатори*. Використовують активні регулюючі елементи з від'ємним зворотним зв'язком, забезпечуючи більш точну стабілізацію шляхом автоматичного регулювання параметрів.

3. *Імпульсні стабілізатори*. Працюють у ключовому режимі, де регулюючий елемент перемикається між станами високого і низького опору. Це забезпечує високу енергоефективність і точність стабілізації при різних рівнях навантаження.

Для стабілізації струму часто використовуються елементи з нелінійними характеристиками, подібними до тих, що наведені на рис. 16.1.1, б. До них належать:

- *Термістори* – резистори з температурною залежністю опору. При підвищенні температури термістор змінює свій опір, забезпечуючи стабільне значення струму навіть при коливаннях зовнішніх факторів.
- *Лампи накаливання* – прилади, які також мають нелінійну вольт-амперну характеристику. Зі збільшенням струму через лампу її спіраль нагрівається, збільшується опір, що стабілізує струм на певному рівні.

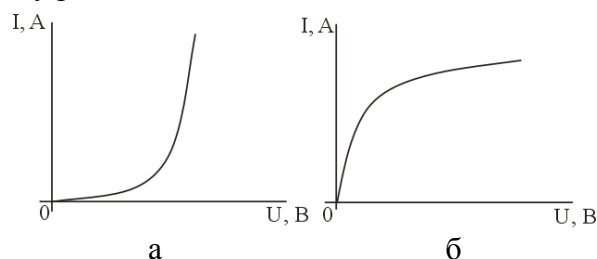


Рис. 16.1.1. Вольт-амперні характеристики стабілізаторів напруги (а) та струму (б).

Завдяки цим властивостям термістори та лампи накаливання застосовують у схемах, де необхідна стабілізація струму, а не напруги, зокрема в електронних пристроях з високими вимогами до стабільності струму.

Компенсаційні стабілізатори напруги або струму (КСН) – це стабілізатори, побудовані на принципах автоматичного регулювання з від’ємним зворотним зв’язком (рис. 16.1.2). Такі системи автоматично коригують вихідні параметри, реагуючи на зміни вхідної напруги чи навантаження, щоб підтримувати стабільність напруги або струму на виході.

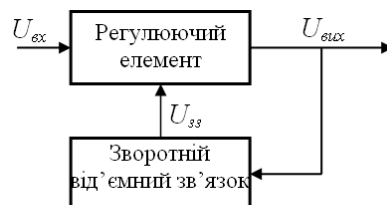


Рис. 16.1.2. Структурна схема компенсаційного стабілізатора

Основна характеристика компенсаційних стабілізаторів полягає в тому, що стабілізація досягається шляхом зміни характеристик регулюючого елемента. У цих стабілізаторах сигнал зворотного зв'язку є ключовим елементом. У стабілізаторах напруги зворотний сигнал формується на основі вихідної напруги, тоді як у стабілізаторах струму – на основі вихідного струму. Зворотний зв'язок дозволяє пристрою автоматично компенсувати будь-які відхилення від заданого рівня. Якщо вихідний параметр (наприклад, напруга) починає відхилятися від необхідного значення, система регулювання вносить коригування, змінюючи характеристики регулюючого елемента для відновлення стабільності.

Компенсаційні стабілізатори є надзвичайно ефективними для підтримання високої точності вихідних параметрів і використовуються в чутливих до напруги і струму електронних схемах.

Стабілізатори напруги класифікують за різними критеріями залежно від їхньої конструкції, способу увімкнення та режиму роботи.

1. Класифікація за типом регулюючого елемента:

- Лампові стабілізатори – використовують вакуумні або газорозрядні лампи для регулювання напруги.
- Транзисторні стабілізатори – регулюють напругу за допомогою транзисторів, які є поширеним рішенням завдяки високій швидкодії та точності.
- Тиристорні стабілізатори – регулювання відбувається за допомогою тиристорів, які підходять для великих потужностей.
- Дросельні стабілізатори – використовують котушки індуктивності (дроселі) для стабілізації.
- Комбіновані стабілізатори – поєднують кілька різних типів регулюючих елементів для покращення стабілізації.

2. Класифікація за способом увімкнення регулюючого елемента відносно навантаження:

- Послідовні стабілізатори – регулюючий елемент увімкнений послідовно з навантаженням, що дозволяє підтримувати сталість вихідної напруги.
- Паралельні стабілізатори – регулюючий елемент увімкнений паралельно до навантаження, забезпечуючи стабільність через відведення надлишкового струму.

3. Класифікація за режимом роботи регулюючого елемента:

- Стабілізатори з неперервним регулюванням – забезпечують плавну стабілізацію за допомогою постійної зміни опору регулюючого елемента.
- Імпульсні стабілізатори (ключові) – регулюючий елемент працює в ключовому режимі, тобто або в режимі відсікання (максимальний опір), або насичення (мінімальний опір). Завдяки цьому імпульсні стабілізатори можуть функціонувати з високою ефективністю.

Розрізняють наступні підтипи імпульсних стабілізаторів:

- Широтно-імпульсні – регулювання відбувається за рахунок зміни ширини імпульсу.
- Частотно-імпульсні – регулюють частоту імпульсів для досягнення стабілізації.
- Релейні – працюють за принципом вмикання і вимикання в певні моменти для підтримання стабільності.

Імпульсні стабілізатори, що працюють у ключовому режимі, є енергоефективними, адже в таких системах регулюючий елемент діє як перемикач (ключ), переключаючись між станами високого і низького опору.

16.2. Основні параметри стабілізаторів.

Для характеристики якості роботи стабілізаторів використовують наступні параметри.

Коефіцієнт стабілізації за напругою (K_H) – показує, наскільки ефективно стабілізатор зменшує вплив змін вхідної напруги на вихідну напругу. Цей коефіцієнт визначається як відношення відносної зміни вхідної напруги до відносної зміни вихідної напруги.

Формула для обчислення коефіцієнта стабілізації має вигляд:

$$K_H = \frac{\Delta U_{BX}}{U_{HBX}} \frac{\Delta U_{BHX}}{U_{HBHX}},$$

де ΔU_{BX} – максимальне відхилення вхідної напруги, що дорівнює

$$\Delta U_{BX} = U_{BX \text{ MAX}} - U_{BX \text{ MIN}},$$

U_{HBX} – номінальна вхідна напруга; ΔU_{BHX} – максимальне відхилення вихідної напруги стабілізатора від номінального при зміні вхідної напруги, В; U_{HBHX} – номінальна вихідна напруга, В.

Коефіцієнт стабілізації за струмом (K_C) – характеризує здатність стабілізатора утримувати вихідну напругу стабільною при зміні вхідного струму. Він показує, у скільки разів відносна зміна вхідного струму перевищує відповідну зміну вихідної напруги.

Формула для розрахунку коефіцієнта стабілізації за струмом виглядає так:

$$K_C = \frac{\Delta I_{BX} / I_{BX}}{\Delta U_{BHX} / U_{BHX}},$$

де ΔI_{BX} – зміна вхідного струму; I_{BX} – номінальний вхідний струм; ΔU_{BHX} – зміна вихідної напруги; U_{BHX} – номінальна вихідна напруга. Чим більшим є коефіцієнт стабілізації за струмом, тим ефективніше стабілізатор утримує стабільність вихідної напруги, незважаючи на коливання вхідного струму.

Вихідний опір R_{BHX} :

$$R_{BHX} = \frac{\Delta U_{BHX}}{\Delta I_H},$$

при $U_{BX} = const$, де ΔI_H – зміна струму навантаження, А.

Коефіцієнт корисної дії η :

$$\eta = \frac{P_H}{P_{BX}} \cdot 100\%,$$

де P_H – корисна потужність, яку стабілізатор споживає від випрямляючого пристрою, Вт.

Температурний коефіцієнт напруги (α_U) характеризує, наскільки стабільною є вихідна напруга стабілізатора при зміні температури навколишнього середовища. Він визначає відносну зміну вихідної напруги на кожен градус зміни температури і показує, наскільки стабілізатор чутливий до температурних коливань. Температурний коефіцієнт напруги визначається за формулою:

$$\alpha_U = \frac{\Delta U_{\text{ВИХ}}}{U_{\text{ВИХ}} \cdot \Delta T},$$

де $\Delta U_{\text{ВИХ}}$ – зміна вихідної напруги при зміні температури; $U_{\text{ВИХ}}$ – номінальна вихідна напруга; ΔT – зміна температури (°C або K).

Напруга пульсацій $U_{\text{НП}}$ – рівень змінної складової вихідної напруги.

Коефіцієнт пульсацій n_n :

$$n_n = \frac{U_{\text{НП}}}{U_H} \cdot 100\%,$$

де U_H – номінальна вихідна напруга, В.

Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) – характеризує ефективність використання електроенергії в мережі, враховуючи лінійні та нелінійні спотворення, які спричиняє навантаження зі значною реактивною складовою. Він показує співвідношення між активною потужністю, яка виконує корисну роботу, і повною потужністю, яку отримує стабілізатор від мережі.

Формула для коефіцієнта потужності має вигляд:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S},$$

де: P – активна потужність, яку стабілізатор отримує від мережі (Вт); S – повна потужність, яку стабілізатор отримує від мережі (ВА).

Коефіцієнт потужності може набувати значень від 0 до 1. Значення, близьке до 1, свідчить про мінімальні реактивні спотворення та високу ефективність споживання енергії. Низький коефіцієнт потужності вказує на значну частку реактивної складової, яка не виконує корисної роботи, але створює навантаження на мережу і призводить до додаткових втрат.

Інерційність стабілізатора напруги – це характеристика, яка показує його здатність швидко реагувати на зміни напруги. Час реагування є ключовим показником: він відображає період від моменту виникнення змін у вхідній напрузі до початку реакції стабілізатора на ці зміни. Чим менший цей час, тим швидше стабілізатор встигає компенсувати відхилення, і тим вищим є коефіцієнт стабілізації.

16.3. Параметричний стабілізатор напруги.

Принцип роботи параметричного стабілізатора постійної напруги з використанням стабілітрона базується на його здатності підтримувати стабільну напругу на виході, незважаючи на зміни вхідної напруги (рис. 16.3.1).

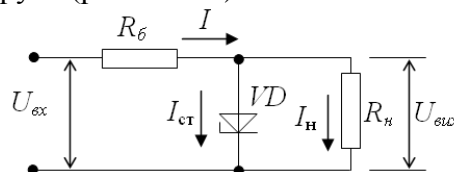


Рис. 16.3.1. Параметричний стабілізатор напруги

На початку, коли вхідна напруга $U_{\text{вх}}$ починає збільшуватися від нуля, напруга на навантаженні $U_{\text{вих}}$ теж зростає пропорційно вхідній. Коли вхідна напруга досягає певного значення – напруги пробою стабілітрона – стабілітрон починає проводити струм, і в його колі виникає струм $I_{\text{ст}}$. На цьому етапі стабілітрон переходить в активний режим і утримує вихідну напругу стабільною. Подальше збільшення вхідної напруги не впливає на вихідну напругу $U_{\text{вих}}$, оскільки напруга на стабілітроні залишається майже постійною. Вся різниця між вхідною напругою $U_{\text{вх}}$ та вихідною напругою $U_{\text{вих}}$ тепер падає на баластному резисторі $R_б$, який обмежує струм через стабілітрон і захищає його від перегріву.

Таким чином, стабілітрон діє як регулятор, підтримуючи стабільну напругу на навантаженні, що є корисним для живлення чутливих електронних компонентів, які потребують постійної напруги.

На рисунку 16.3.2 представлені різні вольт-амперні характеристики елементів параметричного стабілізатора, що дозволяє зрозуміти його роботу та межі допустимих режимів.

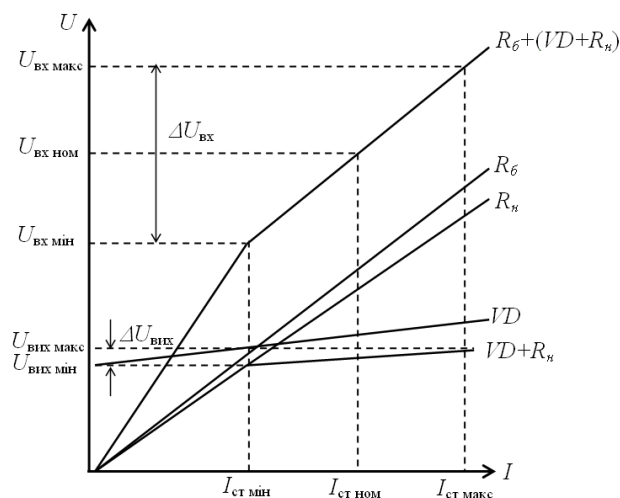


Рис. 16.3.2. Стабілізація напруги

1. Вольт-амперна характеристика стабілітрона VD : показує залежність струму стабілітрона від прикладеної до нього напруги. Як тільки напруга на стабілітроні досягає напруги пробного $U_{проб}$, стабілітрон відкривається і починає стабілізувати вихідну напругу, утримуючи її майже постійною.

2. Вольт-амперна характеристика навантаження R_n : відображає залежність струму через навантаження від напруги на ньому. Навантаження сприяє зменшенню коливань напруги, але його характеристика також враховується при налаштуванні стабілізатора.

3. Результуюча вольт-амперна характеристика $(R_n + VD)$: це сумарна характеристика стабілітрона та навантаження. Ця характеристика дозволяє бачити загальну стабілізаційну здатність системи при підключеному навантаженні.

4. Вольт-амперна характеристика баластного резистора R_b : відображає залежність струму від напруги, що падає на ньому. Баластний резистор захищає стабілітрон, обмежуючи струм, коли вхідна напруга збільшується понад необхідне для стабілізації значення.

5. Сумарна вольт-амперна характеристика всього пристрою: поєднує вплив стабілітрона, навантаження та баластного резистора, показуючи загальну поведінку стабілізатора.

З урахуванням обмежень, максимальний струм стабілітрона визначається допустимим нагріванням, а отже, й максимальне значення вхідної напруги $U_{вх\ макс}$ не повинно перевищувати певного рівня, щоб уникнути перегріву. Мінімальне значення вхідної напруги обмежується напругою пробного стабілітрона $U_{проб}$. Таким чином, номінальне значення вхідної напруги $U_{вх\ ном}$ має бути посередині між $U_{вх\ макс}$ і $U_{вих\ макс}$ – це забезпечує оптимальну роботу стабілізатора в межах безпечного діапазону для стабілітрона.

Для оцінки якості параметричного стабілізатора постійної напруги застосовується коефіцієнт стабілізації $k_{ст}$. Цей коефіцієнт показує, наскільки ефективно стабілізатор підтримує вихідну напругу стабільною, незважаючи на зміни вхідної напруги.

Коефіцієнт стабілізації визначається як:

$$k_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{вих}},$$

де: $\Delta U_{вх}$ – зміна вхідної напруги; $\Delta U_{вих}$ – зміна вихідної напруги, яка в ідеальному випадку є значно меншою за зміну вхідної.

Коефіцієнт стабілізації залежить від співвідношення опорів баластного резистора R_σ та навантаження R_n :

$$k_{cm} \approx \frac{R_\sigma}{R_n}.$$

Це означає, що стабілізуючий ефект буде вищим, якщо опір баластного резистора значно перевищує опір навантаження. Високе значення k_{cm} вказує на добру стабілізаційну здатність стабілізатора, оскільки при зміні вхідної напруги вихідна напруга змінюється незначно.

Контрольні запитання до лекції № 16.

1. Що називається стабілізатором напруги (струму)?
2. Як поділяються стабілізатори в залежності від виду стабілізуючої напруги?
3. Як поділяються стабілізатори в залежності від методу стабілізації напруги?
4. Що називається параметричним стабілізатором?
5. Що називається компенсаційним стабілізатором напруги або струму?
6. Який стабілізатор напруги називається імпульсним?
7. Якими основними параметрами характеризуються стабілізатори?
8. Поясніть принцип роботи параметричного стабілізатора постійної напруги.

ЛЕКЦІЯ 17. ПРИНЦИПИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

17.1. Незатухаючі електромагнітні коливання та особливості їх утворення.

Радіозв'язок здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль (ЕХ). Відомо, що інтенсивність (густина потоку енергії) хвилі характеризує її здатність переносити енергію і визначається співвідношенням:

$$I = \frac{\Delta W}{\Delta S \Delta t},$$

ΔW – енергія, що переноситься за час Δt через площадку ΔS перпендикулярно до її напрямку.

З іншої сторони інтенсивність залежить від об'ємної густини енергії (енергії, яка зосереджена в одиниці об'єму електромагнітного поля) u і швидкості хвилі c :

$$I = cu.$$

Об'ємна густина енергії електричного поля u_e рівна:

$$u_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2,$$

ε – діелектрична проникність середовища; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – електрична стала; E – напруженість електричного поля.

Об'ємна густина енергії магнітного поля u_m рівна:

$$u_m = \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2,$$

μ – магнітна проникність середовища; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна стала; B – модуль вектора магнітної індукції.

Отже густина енергії електромагнітної хвилі буде рівною:

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2.$$

Причиною виникнення електромагнітної хвилі є прискорений рух електронів, тобто напруженість електричного поля пропорційне прискоренню заряджених частинок:

$$E \sim a.$$

Якщо електрони коливаються в антені по гармонічному закону, то амплітуда їх прискорення рівна:

$$a_m = \omega^2 A.$$

ω – циклічна частота; A – амплітуда зміщення.

З двох останніх співвідношень можемо зробити висновок, що напруженість електричного поля пропорційна ω^2 . Оскільки магнітне поле породжується змінним електричним полем, то і $B \sim \omega^2$. Тому густина енергії електромагнітної хвилі $u \sim \omega^4$, а отже і інтенсивність також $I \sim \omega^4$. Звідси можемо зробити висновок, що низькочастотні коливання не створюють електромагнітної хвилі. Нехай по провіднику проходить струм частотою 50 Гц і він буде випромінювати електромагнітні хвилі інтенсивністю I_0 . Тепер по цьому провіднику нехай проходить струм частотою 50 МГц (ультракороткі хвилі) та випромінює електромагнітні хвилі інтенсивністю I . Оскільки $\frac{50 \text{ МГц}}{50 \text{ Гц}} = 10^6$, то $I = 10^{24} I_0$. Отже протяжні

лінії електропередач, по яких проходить струм частотою 50 Гц практично нічого не випромінюють, а невелика антена мобільного телефону, який працює на частоті 800 МГц випромінює інтенсивні електромагнітні хвилі.

Зміна характеристик коливань по заданому закону називається модуляцією. Нехай напруженість електричного поля поблизу приймальної антени змінюється по гармонічному закону:

$$E(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Якщо амплітуду A змінюємо по заданому закону, то маємо амплітудну модуляцію (АМ), якщо змінюємо циклічну частоту ω – маємо частотну модуляцію (FM), якщо змінюємо початкову фазу – маємо фазову модуляцію. Для радіомовлення використовується як АМ, так і FM. Фазова модуляція більше використовується для передачі цифрових сигналів. Амплітудна модуляція використовується на довгих, середніх і коротких хвилях, частотна модуляція використовується на коротких і ультракоротких хвилях. У телебаченні використовується обидва види модуляції: зображення передається за допомогою амплітудно-модульованого сигналу, а звук – за допомогою частотно-модульованого сигналу.

Розглянемо як практично можна реалізувати передачу інформації на відстань. Введемо поняття: несуча частота – частота, на якій здійснюється як радіопередача, так і радіоприйом. Для створення такої частоти необхідний генератор – генератор несучої частоти (ГНЧ). Розглянемо його будову, на основі транзистора.

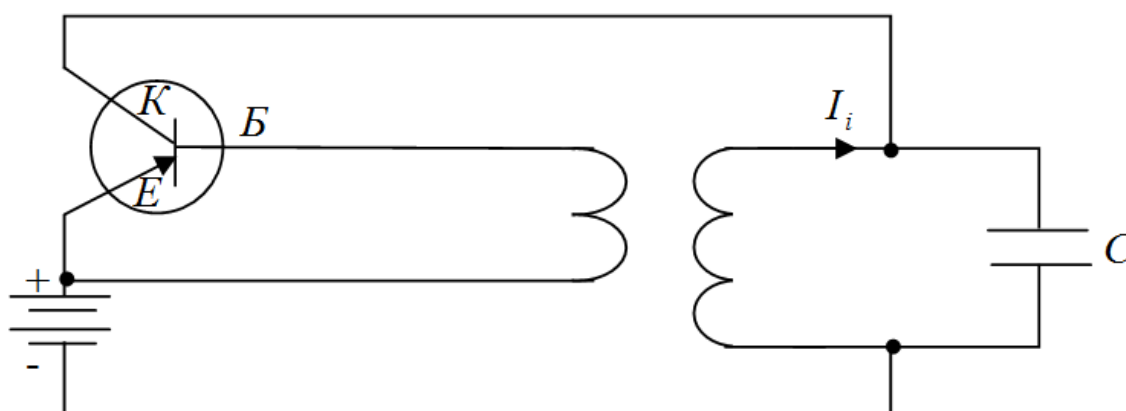


Рис.17.1.1. Транзисторний генератор незатухаючих коливань

Незатухаючі коливання, що відбуваються без періодичної зовнішньої дії називаються автоколиваннями. Автоколивальна система обов'язково повинна включати у себе джерело енергії. Енергія повинна подаватися у коливальну систему не постійно, а у певні моменти часу. Для цього необхідний певний пристрій, який поєднує джерело енергії з коливальною системою. Назвемо умовно цей пристрій клапан. Система, яка вказує клапану інформацію про стан коливальної системи називається системою зворотного зв'язку.



Рис. 17.1.2. Блок-схема автоколивальної системи

Розглянемо принцип роботи пристрою, який дозволяє отримати незатухаючі електромагнітні коливання за рахунок енергії джерела струму у коливальній системі. Основою такої системи є коливальний контур.

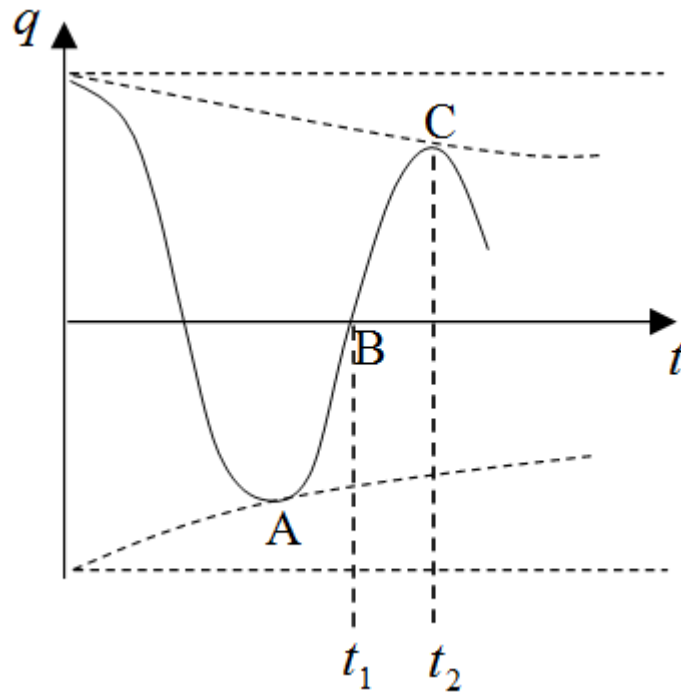


Рис. 17.1.3. Затухаючі коливання заряду на обкладках конденсатора

Оскільки котушка має певний опір, то ці коливання будуть затухаючими. Заряд в контурі буде змінюватись так, як показано на рис. 17.1.3. Розглянемо такий момент, коли конденсатор заряджається за рахунок енергії магнітного поля котушки, тобто коли індукційний струм I_i через конденсатор протікає проти годинникової стрілки (на рис. 17.1.4 показано стрілкою, на рис. 17.1.3 ділянка А-С). Цей струм не зможе зарядити конденсатор до попереднього значення, тому потрібно до цього струму додати інший струм.

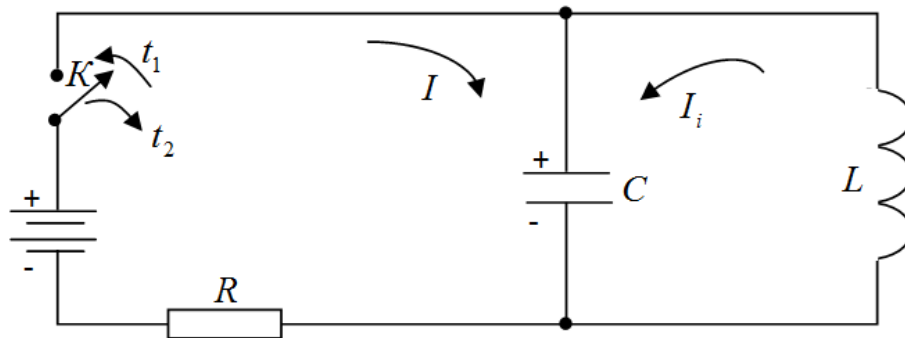
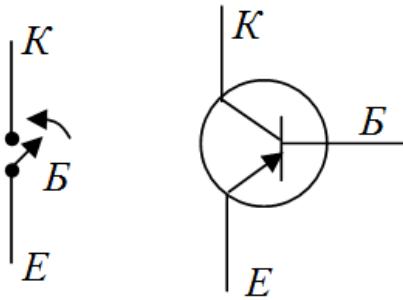


Рис. 17.1.4. Схема забезпечення незатухаючих коливань заряду на обкладках конденсатора

Для цього паралельно до конденсатора під'єднаємо джерело струму і у потрібний момент часу (у момент t_1 , коли енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного струму, на рис. 17.1.3 ділянка В-С) замкнемо ключ K . В колі почне протікати струм I , який буде додаватися до струму I_i і надасть конденсатору додатковий заряд. Завдяки цьому заряд вийде до попереднього значення. У момент часу t_2 , коли ми одержали попереднє значення заряду, потрібно відключити ключ K . І так потрібно робити кожен період, щоб домогтися незатухаючих коливань. У якості такого ключа використовують транзистор.



Подаючи на базу невелику напругу відносно емітера (менше 1 В), ми можемо змінювати опір ділянки емітер-колектор.

Зберемо наступні схеми.

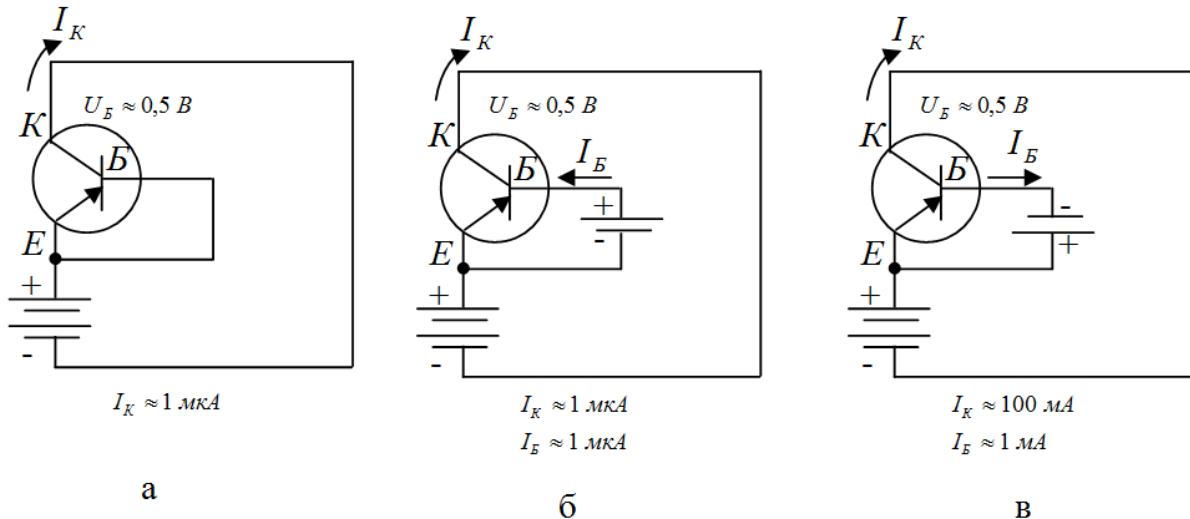


Рис. 17.1.5. Робота транзистора в режимі ключа

Якщо зібрати схему так, як на рис. 17.1.5 а, то струм колектора (для кремнієвих транзисторів) буде приблизно 1 мкА. За схемою як на рис. 17.1.5 б, струм колектора $I_K \approx 1 \text{ мкА}$, струм бази $I_B \approx 1 \text{ мкА}$, а транзистор буде закритий. Змінимо полярність джерела живлення на базі, як показано на рис. 17.1.5 в. При цьому буде: $I_K \approx 100 \text{ мА}$, $I_B \approx 1 \text{ мА}$, і транзистор буде відкритий. Це рівносильне тому, що ми замкнули ключ.

Використаємо такий транзистор для одержання автоколивань у системі. Для цього, замість джерела живлення у схемі на рис. 17.1.4 використаємо транзистор. Розглянемо момент часу, коли магнітне поле в котушці зменшується, а електричне поле в конденсаторі збільшується. Це значить, що індукційний струм тече від котушки до конденсатора і його заряджає, але не може його зарядити до попереднього значення, оскільки частина енергії втратилась на нагрівання провідника з якого зроблена котушка. Тому саме в цей час нам потрібно відкрити транзистор. При цьому почне протікати додатковий струм (струм колектора I_K), який разом з індукційним струмом дозарядить конденсатор. Отже цей транзистор потрібно відкрити тоді, коли зменшується магнітне поле котушки. Якщо у котушці зменшується магнітне поле, то змінюється магнітний потік через котушку. Помістимо біля цієї котушки ще одну котушку, щоб частина ліній магнітного поля проходили через неї. При зміні магнітного потоку у більшій котушці, буде виникати ЕРС індукції у меншій котушці і вона перетвориться у джерело струму.

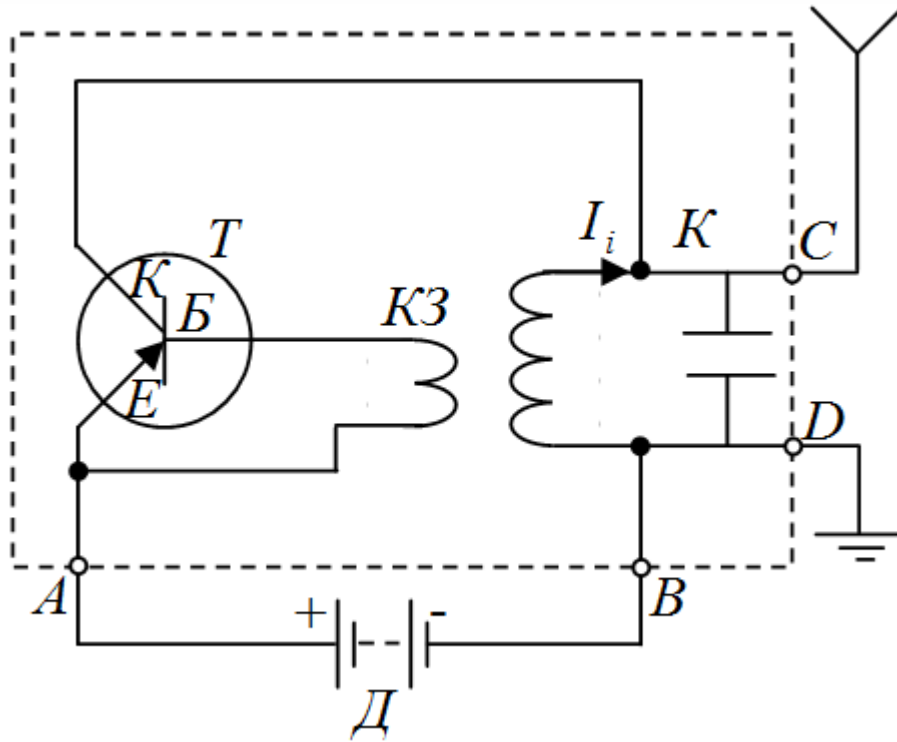


Рис. 17.1.6. Транзисторний генератор незатухаючих коливань

Частота автоколивань визначається характеристиками коливального контуру K , тобто несуча частота – це частота вільних коливань у цьому контурі. Для створення зворотного зв'язку між базою і емітером транзистора T включають котушку зворотного зв'язку $K3$. Для живлення генератора використовується батарея струму B . У такому автогенераторі будуть виникати незатухаючі електромагнітні коливання, амплітудою яких ми будемо керувати по заданому закону.

Ці коливання нам потрібно передати в ефір. Для цього коливальний контур з'єднуємо з антеною і заземленням. Штрих-пунктирною лінією обведений генератор незатухаючих коливань (або генератор несучої частоти (ГНЧ)) з характерними точками живлення (A і B) і точками виходу (C – з'єднання з антеною і D – з'єднання із заземленням).

Нехай ми говоримо перед мікрофоном МК, під'єднаного до підсилювача Π . Цей підсилювач під'єднано до первинної обмотки трансформатора Tr , який ще називають модуляційним трансформатором. Підсилювач підключений до модуляційного трансформатора називають модулятором. Напряга на виході трансформатора (на вторинній обмотці) $U_{нч}$ (низької частоти, рис. 17.1.7). Якщо ми мовчимо перед мікрофоном, то напряга $U_{нч}$ відсутня і через обмотку трансформатора Tr джерело живлення підключене до ГНЧ. При цьому амплітуда коливань $U(t)$ (напряга між антеною і заземленням) залишається постійною, рис. 17.1.8, а.

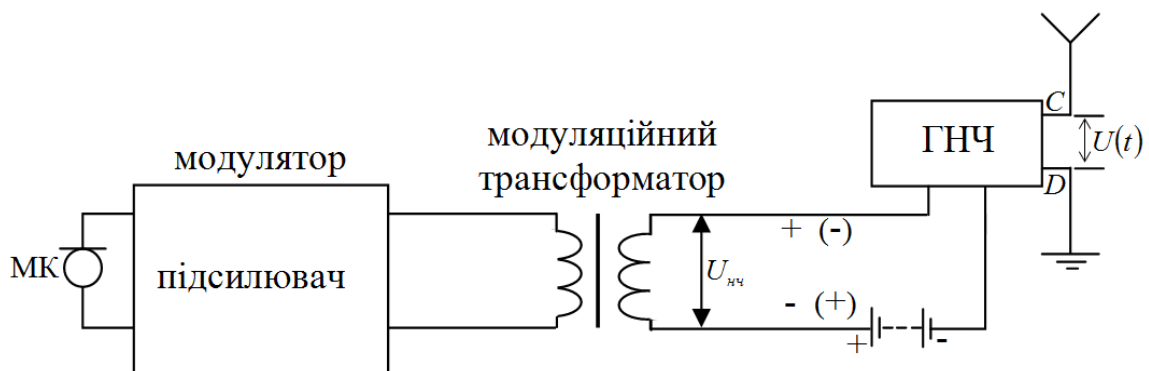


Рис. 17.1.7. Найпростіша схема передавача електромагнітних хвиль

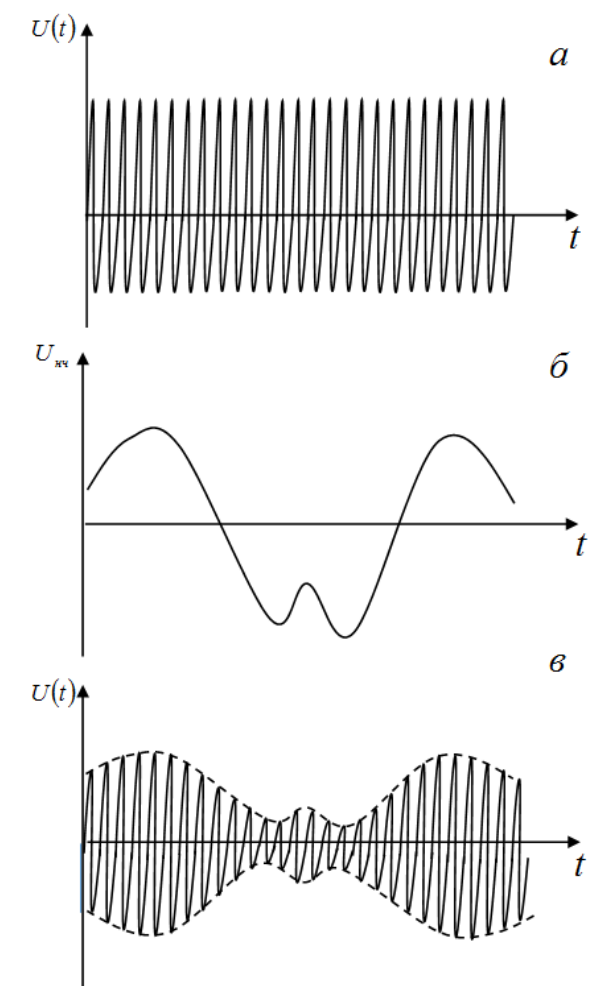


Рис. 17.1.8. Профіль електромагнітної хвилі: а – високочастотної несучої; б – низькочастотної; в – модульованої

Якщо ми починаємо щось говорити, то ці коливання низької частоти $U_{нч}$ підсилюються і подаються на модуляційний трансформатор. Tr трансформує ці коливання і напруга $U_{нч}$ на виході буде то з «+», то з «-». Якщо на верхньому виводі трансформатора «+», то він буде джерелом живлення послідовно з'єднаний з джерелом постійної напруги і ці напруги додаються і в результаті на ГНЧ подається більша напруга, ніж у режимі мовчання. Отже і напруга коливань на виході генератора буде більшою. Через деякий час напруга $U_{нч}$ змінить знак, на верхньому виводі трансформатора буде «-». В цьому випадку знову маємо два джерела живлення, тільки включені так, що їх напруги будуть відніматися (напруга $U_{нч}$ буде відніматися від напруги постійного джерела живлення) і напруга коливань на виході генератора буде меншою. У результаті у колі антени напруга буде змінювати свою амплітуду у відповідності із законом $U_{нч}$ (рис. 17.1.8, в). Тобто нам удалося закласти інформацію у низькочастотних коливаннях у високочастотний сигнал, а, відповідно, він буде ефективно випромінюватися антеною.

Тепер потрібно цю інформацію, яка передана в ефір, прийняти. Розглянемо принцип роботи найпростішого приймача, рис. 17.1.9. Основною частиною його служить напівпровідниковий діод (VD), який називають детектором. У відповідності до цього приймач

називають детекторним. Цей приймач з'єднаний до антени і заземлення, і в антені виникають коливання, які повторюють коливання струму в антені передатчика.

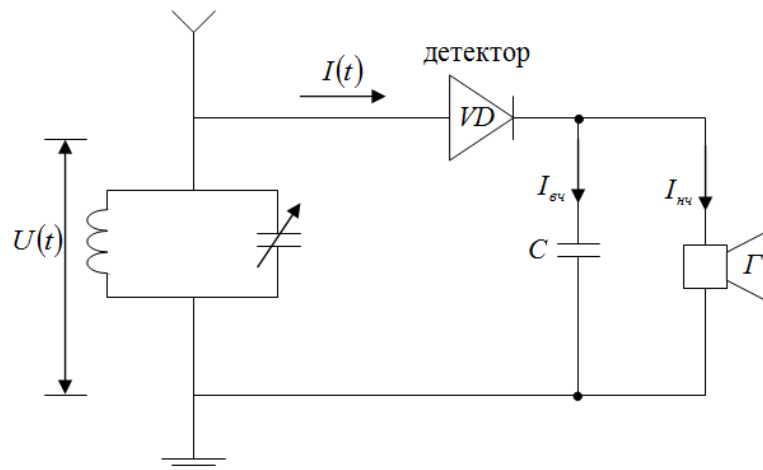


Рис. 17.1.9. Принцип роботи найпростішого приймача електромагнітних хвиль

Щоб виділити із усіх несущих одну потрібну, використаємо коливальний контур. Як відомо, вимушені коливання у коливальному контурі різко підсиляться, коли частота власних коливань співпадає з частотою вимушеної напруги, тобто з частотою струму в антені. Для зміни частоти власних коливань використовують, як правило, конденсатор змінної ємності. На коливальний контур подається напруга $U(t)$, рис. 17.1.10 а. Ця напруга подається на діод, який під'єднаний, наприклад, до гучномовця. У колі протікає струм $I(t)$. Діод пропускає струм тільки в одному напрямку. Тому позитивні півхвилі напруги $U(t)$ призводять до протікання струму через детектор, а від'ємні – ні. У Результаті $I(t)$ буде мати вигляд, як показано на рис. 17.1.10 б, тобто нижня частина відтинається завдяки односторонній провідності діода.

Оскільки частота несучої порядку МГц, то внаслідок проходження струму такої частоти через гучномовець Г, ми нічого не почуємо. Потрібно зробити так, щоб через гучномовець протікав низькочастотний струм, який змінюється по закону згинаючої. Струм $I(t)$, який змінюється так як на рис. 17.10 б, можна представити у вигляді суми двох струмів: струму високої частоти $I_{вч}$ (рис. 17.1.10 в) та струму низької частоти $I_{нч}$ (рис. 17.1.10 г).

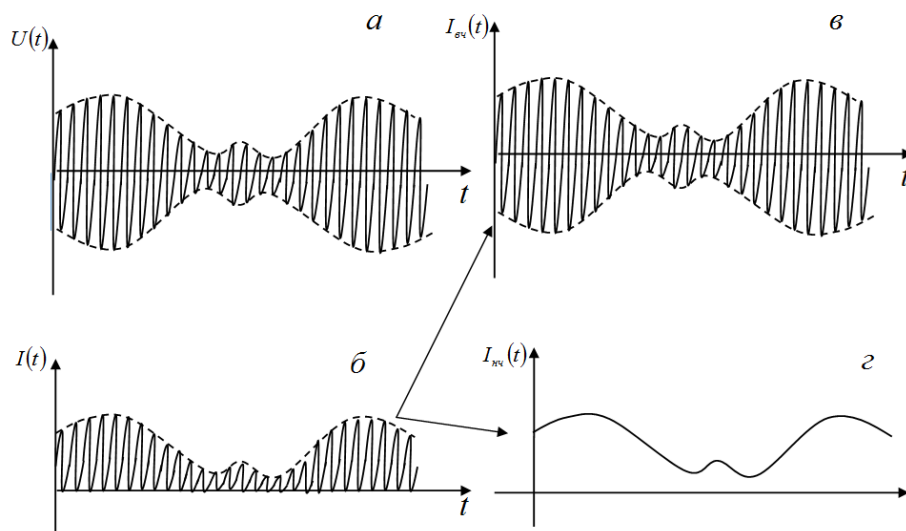


Рис. 17.1.10. Часова зміна напруги та струму в колі приймача електромагнітних хвиль.

Щоб пропустити низькочастотну складову струму $I_{нч}$ через гучномовець, а високочастотну складову струму $I_{вч}$ пустити в обхід, використовують конденсатор. Ємнісний опір конденсатора X_C рівний:

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

Як бачимо, чим більша частота струму ν , тим менший ємнісний опір конденсатора. Отже, через конденсатор буде протікати високочастотна складова струму $I_{вч}$, а струм $I_{нч}$ буде проходити через гучномовець. Отже, струм низької частоти повністю повторює коливання на вході підсилувача біля мікрофона.

Контрольні запитання до лекції № 17.

1. Чому для радіозв'язку використовують високочастотне електромагнітне випромінювання?
2. Що таке автоколивальна система та для чого вона використовується?
3. Чому у коливальному контурі утворюються затухаючі електромагнітні коливання?
4. Що потрібно зробити, щоб у коливальному контурі виникали незатухаючі електромагнітні коливання? Поясніть це на прикладі схеми рис. 17.3.
5. Поясніть принцип роботи транзистора в режимі ключа.
6. Поясніть принцип роботи транзисторного генератора незатухаючих коливань.
7. Поясніть принцип роботи схеми на рис. 17.7.
8. Поясніть принцип роботи приймача електромагнітних хвиль, зображеного на рис. 17.9.
9. Для чого використовується конденсатор у приймачі електромагнітних хвиль?
10. Навіщо у приймачі електромагнітних хвиль у коливальному контурі використовують конденсатор змінної ємності?

Список використаних джерел

1. Кевшин А. Г., Галян В. В. Електроніка : конспект лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2018. 87 с. Рекомендовано НМР СНУ ім. Лесі Українки (протокол № 6 від 21 березня 2018 р.) (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19595>)
2. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електроніка: задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 48 с. Рекомендовано НМР СНУ ім. Лесі Українки (протокол № 1 від 23.09.2020 р.) (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19584>).
3. Кевшин А. Г., Галан В. В. Фізика з основами радіоелектроніки: конспект лекцій. 113 с. Рекомендовано НМР ВНУ ім. Лесі Українки (протокол № 6 від 23.02.2022 р.) (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/20761>).
4. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електротехніка : навчальний посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 127 с. (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19575>).
5. Матвієнко М. П. Основи електротехніки та електроніки : підручник. К. : Ліра-К, 2021. 504 с.
6. Новосад О. В., Федосов С. А., Божко В. В., Кевшин А. Г. Електроніка : методичні рекомендації до лабораторних робіт. 87 с. Рекомендовано НМР ВНУ ім. Лесі Українки (протокол № 3 від 18.11.2020 р.) (<https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19583>).
7. Новосад О. В., Федосов С. А., Кевшин А. Г. Лабораторний практикум з електрики і магнетизму : навч. посіб. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2023. 165 с. Рекомендовано до друку вченою радою ВНУ імені Лесі Українки (протокол № 4 від 30 листопада 2023 р.).
8. Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П. ромислова електроніка. Теорія і практикум. К. : Каравела, 2017. 536 с.
9. Федосов С. А., Замуруєва О. В., Сахнюк В. Є., Захарчук Д. А., Кевшин А. Г., Новосад О. В. Структурні елементи напівпровідникових пристроїв : задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 32 с.
10. BASIC ELECTRONICS NOTES (https://igitsarang.ac.in/assets/documents/coursematerial/basic_electronics_note-2nd_sessemester_btech_compressed_1589976528.pdf)

Навчально-методичне видання

Кевшин Андрій Григорович
Галян Володимир Володимирович

Основи електроніки

Конспект лекцій

Друкується в авторській редакції