

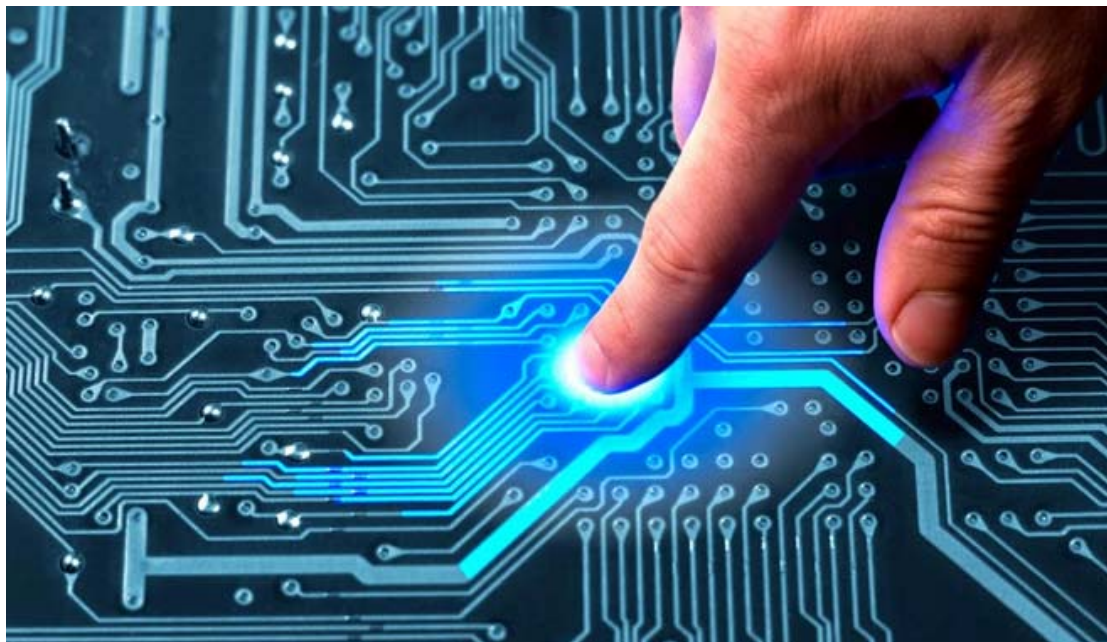
**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЛАДИЖИНСЬКИЙ КОЛЕДЖ ВНАУ**

Факультет механізації
сільського господарства

Кафедра електротехнічних
систем, технологій та
автоматизації в АПК

Відділення електрифікації і
автоматизації сільського
господарства

Величко Т.Г., Рубаненко О.О., Явдик В.В.



ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКИ

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

2018

Автори:

Величко Т. Г., Рубаненко О.О., Явдик В.В.: Основи електроніки та мікросхемотехніки. Навчально-методичний посібник для підготовки студентів за освітнім ступенем «Бакалавр» з галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка» – *Вінниця, видавничий центр ВНАУ:2018 р. – 151 с.*

Рецензенти:

Матвійчук В.Ф. – д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехнічних систем, технологій та автоматизації в АПК Вінницького національного аграрного університету

Собчук Н.В. – к.т.н., доцент кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету

Коротка анотація

Навчально-методичний посібник містить теоретичний матеріал з навчальних дисциплін «Електроніка і мікросхемотехніка», «Електротехніка і мікропроцесорна техніка», «Електроніка і мікропроцесорна техніка», «Електротехніка і електроніка», що вивчаються студентами різних спеціальностей на факультеті механізації сільського господарства, спрямований на організацію вивчення теоретичного матеріалу необхідного для майбутнього спеціаліста.

Рекомендовано до видання науково-методичною комісією ВНАУ
(протокол № 8 від 25.04.2018 року)

Величко Т.Г., Рубаненко О.О., Явдик В.В.

Вінницький національний аграрний університет, 2018

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕОРІЇ	7
1.1. Основи електронної теорії	7
1.1.1. Електрон та його властивості	7
1.1.2. Робота виходу електронів. Електронна емісія	9
1.1.3. Рух електронів в електричних та магнітних полях	10
1.1.4. Електричний струм в газі	12
1.2. Електрофізичні властивості напівпровідників	13
1.2.1. Фізичні властивості напівпровідників	13
1.2.2. Власна провідність напівпровідників	13
1.2.3. Домішкова провідність напівпровідників	14
1.2.4. Електронно-дірковий перехід	15
1.2.5. Властивості p-n переходу	16
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ	19
2.1. Пасивні елементи електроніки	19
2.1.1. Резистори	19
2.1.2. Конденсатори	20
2.1.3. Котушки індуктивності. Трансформатори	21
2.1.4. Коливальні контури	22
2.1.5. Напівпровідникові резистори	25
2.2. Напівпровідникові діоди	28
2.2.1. Випрямні діоди	29
2.2.2. Високочастотні та імпульсні діоди	31
2.2.3. Стабілітрони	32
2.2.4. Варикапи	33
2.2.5. Тунельні діоди	34
2.2.6. Фотодіоди	34
2.2.7. Світло діоди	35
2.3. Транзистори. Тиристори	37
2.3.1. Класифікація транзисторів	37
2.3.2. Будова та принцип роботи біполярних транзисторів	38
2.3.3. Схеми ввімкнення транзисторів	39
2.3.4. Еквівалентна схема заміщення, h-параметри транзистора	41
2.3.5. Температурні і частотні властивості транзистора	45
2.3.6. Транзистор у режимі ключа	46
2.3.7. Польові транзистори	47
2.3.8. Одно перехідні (дворазові) транзистори	50
2.3.9. Фото транзистори	51
2.3.10. Тиристори	52
2.4. Електровакуумні та іонні прилади	56
2.4.1. Електронні лампи	56
2.4.2. Іонні прилади тліючого розряду	60
2.5. Гібридні інтегральні мікросхеми	61
2.5.1. Конструктивні елементи гібридних інтегральних мікросхем	64
2.5.2. Пасивні елементи	64
2.5.3. Активні елементи – без корпусні напівпровідникові прилади	66

2.6. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми	67
2.6.1. Принцип виготовлення напівпровідникових ІМС	67
2.6.2. Великі ІМС	67
2.7. Оптиелектронні прилади	68
2.7.1. Елементна база мікроелектроніки – світло випромінювачі, фотоприймачі	68
2.7.2. Оптрони	71
2.8. Прилади відображення інформації	72
2.8.1. Електронно-променеві трубки	72
2.8.2. Буквенно-цифрові індикатори	74
РОЗДІЛ 3. ОСНОВИ АНАЛОГОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМОТЕХНІКИ	78
3.1. Підсилювачі	78
3.1.1. Призначення і характеристика підсилювачів	78
3.1.2. Основні показники роботи підсилювача	78
3.1.3. Підсилювачі низької частоти. Попередні каскади підсилення	81
3.1.4. Міжкаскадні зв'язки	82
3.1.5. Підсилювачі потужності	82
3.1.6. Зворотні зв'язки у підсилювачах	84
3.1.7. Фазоінвертори	84
3.1.8. Підсилювачі постійного струму	85
3.1.9. Операційні підсилювачі	87
3.2. Генератори синусоїдальних коливань	92
3.2.1. Класифікація генераторів	92
3.2.2. Автогенератори LC-типу	93
3.2.3. Стабілізація частоти LC-генераторів	93
3.2.4. Автогенератори типу RC	95
3.2.5. Автогенератори на тунельному діоді	96
3.3. ВИПРЯМЛЯЧІ. СТАБІЛІЗАТОРИ	98
3.3.1. Класифікація випрямлячів	98
3.3.2. Однофазні випрямлячі	99
3.3.3. Випрямлячі з помноженням напруги	102
3.3.4. Трифазні випрямлячі	102
3.3.5. Згладжуючі фільтри	104
3.3.6. Стабілізатори постійної напруги	107
3.3.7. Стабілізатори струму	109
3.3.8. Стабілізатори постійної напруги на ІМС	109
3.3.9. Стабілізатори змінної напруги	109
3.3.10. Інвертори струму та напруги	110
РОЗДІЛ 4. ОСНОВИ ЦИФРОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМОТЕХНІКИ	113
4.1. ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ	113
4.1.1. Загальні характеристики сигналів	113
4.1.2. Ключі як генератори імпульсів	114
4.1.3. Мультивібратори	116
4.1.4. Блокінг-генератор	118
4.1.5. Тригер на дискретних елементах	119
4.2. ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ	120
4.2.1. Основні логічні операції (функції)	120

4.2.2. Найпростіші логічні схеми	121
4.2.3. Логічні інтегральні мікросхеми (класифікація)	125
4.2.4. Характеристики і параметри логічних мікросхем	126
4.2.5. Логічні ІМС типу ДТЛ, ТТЛ, на МДН (МОН) транзисторах	127
4.2.6. Коротка характеристика деяких серій логічних ІМС	129
4.3. ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ	130
4.3.1. Цифрові способи зображення (передавання) інформації. Системи числення	130
4.3.2. Тригери на логічних елементах	138
4.3.3. Двійковий лічильник та дільник частоти	141
4.3.4. Регістри	144
4.3.5. Комбінаційні цифрові інтегральні пристрої (комбінаційні цифрові мікросхеми)	146
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	150

ВСТУП

Електроніка, як наука, займається вивченням електронних явищ і процесів, пов'язаних із зміною концентрації і переміщенням заряджених часток в різних середовищах (в вакуумі, газах, рідинах, твердих тілах) і умовах (при різній температурі, під дією електричних і магнітних полів).

Задача електроніки, як галузі техніки, - розробка, виробництво і експлуатація електронних пристроїв самого різного призначення.

Ефективність електронної апаратури зумовлена високою швидкістю, точністю і якістю елементів, які входять в неї, самими важливими з яких є електронні прилади. Крім того, за допомогою електронних приладів вдається перетворювати неелектричну енергію в електричну і навпаки (наприклад, фотоелементах, терморезисторах). Різноманітні електронні датчики і вимірювальні прилади дозволяють з високою точністю вимірювати, реєструвати і регулювати зміни різних неелектричних величин - температури, тиску, прозорості і т.д.

Становлення і розвиток електроніки стало можливим дякуючи зусиллям багатьох сотень вчених-фізиків, які пробували на протязі довгого часу пізнати і науково пояснити природу електричних явищ.

Ще в Давній Греції Фалес із Білета побачив, що янтар, потертий об вовну, притягує легкі предмети. Від грецької назви янтарю і виникла назва "електрика".

Від перших дослідів по вивченню електричних явищ до відкриття електрона пройшло більше 2 тисяч років. Лише в 1892 році англійський фізик Дж. Стоні, спираючись на досліди Фарадея, Максвелла і других вчених, ввів в науку поняття "електрон", розуміючи під цим елементарну кількість електрики.

Основні дати відкриттів і винаходів в електроніці

- 1880р. Італійський вчений А. Вольта побудував перше електрохімічне джерело постійного струму.
- 1872р. Побудова російським вченим А. Н. Лодигіним лампи накалювання.
- 1887р. Силами багатьох вчених світу відкрито явище термоелектронної емісії.
- 1802р. Відкриття електричної дуги академіком В.Петровим
- 1873р. Російський електротехнік А.Н. Лодигін винайшов перший в світі електровакуумний прилад - лампу розжарення.
- 1884р. Т.А. Едісон відкрив термоелектронну емісію.
- 1887р. Німецький фізик Г.Р. Герц відкрив фотоелектричний ефект.
- 1888р. Російський вчений Столетов відкрив явище фотоелектронної емісії.
- 1895р. Російським вченим Поповим здійснені передача і приймання радіосигналів. Відкриття радіо стало стимулом подальшого бурного розвитку радіоелектроніки.
- 1904р. Англійський вчений Флемінг сконструював найпростішу лампу - вакуумний діод, який використовувався в радіотехніці в якості детектора радіосигналів. Через три роки після Флемінга вчений де Форест Лі ввів в лампу Флемінга керуючий електрод - сітку і побудував тріод, здатний генерувати і підсилювати електричні сигнали.
- 1907р. Німецький вчений Мейснер винайшов ламповий генератор синусоїдних коливань.
- 1913р. Російські вчені Паполексі і Бонч-Бруєвич незалежно один від одного виготовили перші електронні лампи в Росії.
- 1914р. Бонч-Бруєвич розробив лампову схему тригера, який в подальшому використовувався як основний елемент запам'ятовування двійкового цифрового коду.
- 1918р. Радянський інженер Лосєв винайшов можливість отримання підсилення за потужністю електричних коливань за допомогою напівпровідникового кристалічного діода.
- 1922р. Виділення електроніки в самостійну науку. В цей час побудовані: електричний мікроскоп, термоелектричний генератор, лампи з трьома сітками (пентоди), комбіновані лампи, передаючі та приймальні телевізійні трубки та інш.
- 30-ті роки XX ст. Англійські вчені Моучлі і Д. Еккерт завершили побудову першої ЕОМ ЕНІАК (ENIAC - Electronic Numerical Integrator and Computer - електронний цифровий інтегратор і обчислювач
- 1945 р.

- Містила > 18 тис. електронних ламп, 1,5 реле.
- 1948р. Американські вчені Д. Бардін і В. Браттейн побудували германієвий крапковий транзистор.
- 1952р. Під керівництвом академіка Лебедева в СРСР виготовлена перша електронна обчислювальна машина.
- 1955р. Басов і Прохоров (радянські вчені) побудували перший квантовий генератор - мазер.
- 1958 - 1960рр. Перші розробки в СРСР інтегральних мікросхем.
- 70-ті рр. Розробка великих інтегральних мікросхем (ВІС). Поява перших мікропроцесорів.
- 80-ті рр. ЗВІС (зверхвеликі інтегральні схеми), широке впровадження персональних ЕОМ.

В сільському господарстві зараз використовують електронну апаратуру термометри, вологоміри, вимірювачі жирності молока, товщини жирового пару тварин, лазерні системи для керування землекопальними машинами, системи керування рухом трактора по міжряддях, та ін.). Поряд з цим розвиваються і нові напрямки в використанні електроніки для сільськогосподарського виробництва. До них можна віднести автоматизацію технологічними процесами збиральних комбайнів та тваринних комплексів, регулювання мікроклімату в теплицях, боротьба із шкідниками в сільському господарстві і т.д.

За допомогою електронної техніки можна підвищити надійність сільськогосподарських машин, поліпшити використання тракторів, комбайнів, автомобілів. Контрольно-діагностичне обладнання на основі обчислювальної техніки, а також розвинена мережа диспетчерського зв'язку поліпшують оперативність і якість ремонту та обслуговування сільськогосподарської техніки, її зберігання.

Для сільського господарства розробляються різні прилади, в яких використовується сама сучасна електронна техніка - мікропроцесори та мікро-ЕОМ, ультразвукові установки, пристрої з використанням кріогенної техніки і т.д.

Тому сучасний технік-електрик сільського господарства повинен бути озброєний знаннями з електроніки, техніки зв'язку і вміти їх використовувати у своїй практичній роботі. Йому слід добре уявляти роль і місце електроніки в технічному процесі, знати історичні етапи розвитку радіоелектроніки, усвідомлювати величезні завдання, які ставляться перед нею.

Як вивчати електроніку

До навчального матеріалу потрібно відноситися диференційовано. В курсі предмету є матеріал, про який за тими чи іншими причинами достатньо мати лише *загальну уяву*. До такого матеріалу можна віднести, наприклад, різні сторичні дані, відомості про роботи вчених і їх наукової біографії тощо.

Не підлягає сумніву також, що в будь-якому розділі і майже в кожній темі курсу є відомості, які необхідно *запам'ятати*. До таких відомостей відносяться сякі постійні величини (наприклад, швидкість світла, звуку), співвідношення між розмірностями, які виражені в різних одиницях виміру, умовні графічні означення тих чи інших приладів, найбільш вживані формули та ін.

Значне місце в навчальному предметі займає матеріал, який вимагає від студента перш за все *розуміння* (фізична суть явищ і процесів, які відбуваються електронних приладах, принципи побудови і призначення елементів нестройних схем, переваги і недоліки схемних розв'язків і т. п.)

Нарешті, майбутній технік-електрик повинен оволодіти *вміннями і навиками*, характерними для спеціаліста - зборка і дослідження схем, робота з вимірювальною апаратурою, виконання технічних розрахунків, грамотне використання довідникової літератури і т. п.

Слід пам'ятати, що головна задача навчання - навчитися самостійно і творчо працювати.

Прочитавши текст, постарайтесь виділити головне із прочитаного і скласти перелік слів або словосполучень, які несуть найбільше смислове навантаження і в найбільшій мірі відображають суть викладених відомостей. Такі слова називають *ключовими*. Ключові слова допомагають зосередитися і мислити саме головне із прочитаного. Також гарний ефект дають *опорні конспекти* (опорний конспект - це скорочений виклад навчального матеріалу в словесній формі або графічному зображенні, в якому формули, елементи, логічно зв'язані між собою).

РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕОРІЇ

1.1 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕОРІЇ

1.1.1 Електрон та його властивості

Атом складається з позитивно зарядженого ядра та негативно заряджених електронів, які обертаються навколо ядра по орбітам.

Електрон - елементарна частка матерії з масою спокою $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг і елементарним негативним зарядом, абсолютне значення якого $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Ядро атома містить протони і нейтрони.

Маса протона приблизно в 1842 рази більша маси електрона. Заряд - позитивний, рівний за величиною заряду електрона.

Нейтрон має приблизно таку ж масу, але не має електричного заряду.

Кількість протонів, нейтронів і електронів в атомі залежить від типу хімічного елемента, складовою частиною якого він є.

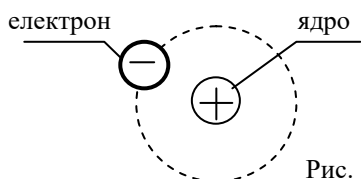


Рис. 1.1. Схема будови атома водню

Число електронів завжди дорівнює порядковому номеру елемента в періодичній системі елементів Менделєєва

Число електронів дорівнює числу протонів в ядрі - тому атом електрично-нейтральний. Згідно квантової теорії, електрони в атомі здійснюють рух не по будь-яким, а лише по дозволеним орбітам, на кожній із яких може знаходитись не більше двох електронів з протилежними спінами (*спін* - особистий момент кількості руху елементарних часток).

Електрони, які обертаються на ближніх до ядра орбітах, мають меншу повну енергію ніж електрони, які обертаються далі від ядра. Тому перехід електрона з однієї дозволеної орбіти, з відповідним енергетичним рівнем, на другу проходить із випусканням або поглинанням кванта енергії (*квант* - найменша можлива кількість енергії електромагнітного випромінювання з даною частотою коливань).

Електрони, розміщені на зовнішніх орбітах атомів називаються *валентними*. Вони визначають хімічну активність речовини.

Вільні електрони - електрони, які звільнилися від внутріатомних зв'язків. Вони пересуваються в середині речовини в різних напрямках і різними швидкостями. При наявності зовнішнього електричного поля хаотичний рух вільних електронів стає впорядкованим - виникає електричний струм.

Чим більше вільних електронів має речовина, тим вища її електропровідність. Цим і пояснюється поділ твердих тіл за їх здатністю проводити електричний струм на: *провідники*, *напівпровідники* і *діелектрики*.

Витрачаючи або набуваючи електрони, нейтральний атом стає зарядженим - *іоном*. Процес відриву або присднання електронів - *іонізація*.

Іони, які мають різнойменні заряди, притягуючись один до одного, становлять *молекули*.

У відповідності з *квантовою будовою речовини* електрони мають властивості не лише матеріальних часток (корпускул), але й хвильові властивості.

В основу квантової теорії входять:

1. **Гіпотеза Планка.** Енергія електронів в атомі може приймати лише визначені дискретні значення. Зміна енергії електронів може проходити лише скачкоподібно.

2. **Постулати Бора.**

2.1. Електрон в атомі може знаходитись в визначених стійких станах, які називаються стаціонарними. В цьому випадку атом не випромінює енергію.

2.2. Атом випромінює або поглинає енергію лише при переході із одного стаціонарного стану в інший. Величина кванту енергії пов'язана з частотою випромінювання співвідношенням

$$W = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

де ν - частота випромінювання

h - постійна Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·Гц⁻¹

2.3. Момент кількості руху електрона на стаціонарній орбіті повинен бути кратним числу $\frac{h}{2\pi}$.

3. **Гіпотеза де Бройля.** Електромагнітна енергія зарядженої частини, яка рухається по замкнутій орбіті не випромінюється тільки в тому випадку, якщо вздовж орбіти укладається ціле число хвиль (утворюється стояча хвиля).

Таким чином, при рухові по орбіті з радіусом r повинно виконуватись співвідношення

$$2 \cdot \pi \cdot r = n \cdot \lambda \quad (1.2)$$

де λ - довжина хвилі;

n - ціле число, $n = 1, 2, 3 \dots$

Довжину хвилі електрона, який має масу m_e і швидкість v знайдемо:

$$h\nu = h \frac{v}{\lambda} = \frac{m_e v^2}{2} \quad (1.3)$$

$$\lambda = \frac{2h}{m_e v} \quad (1.4)$$

Число n в співвідношенні (1.2) - головне квантове число. Воно визначає орбіту електрона, яку він може займати у відповідності з рівнем своєї енергії.

В твердому тілі (кристалі) сусідні атоми розміщені настільки близько один до одного, що між ними проходить взаємодія.

Взаємодія багатьох атомів викликає зміщення і розщеплення енергетичних рівнів електронів. Кожній орбіті атома відповідає строго визначена енергія електрона або дозволений енергетичний рівень. Рівні енергії, які не можуть мати електрони при переході з однієї орбіти на іншу, називаються забороненими.

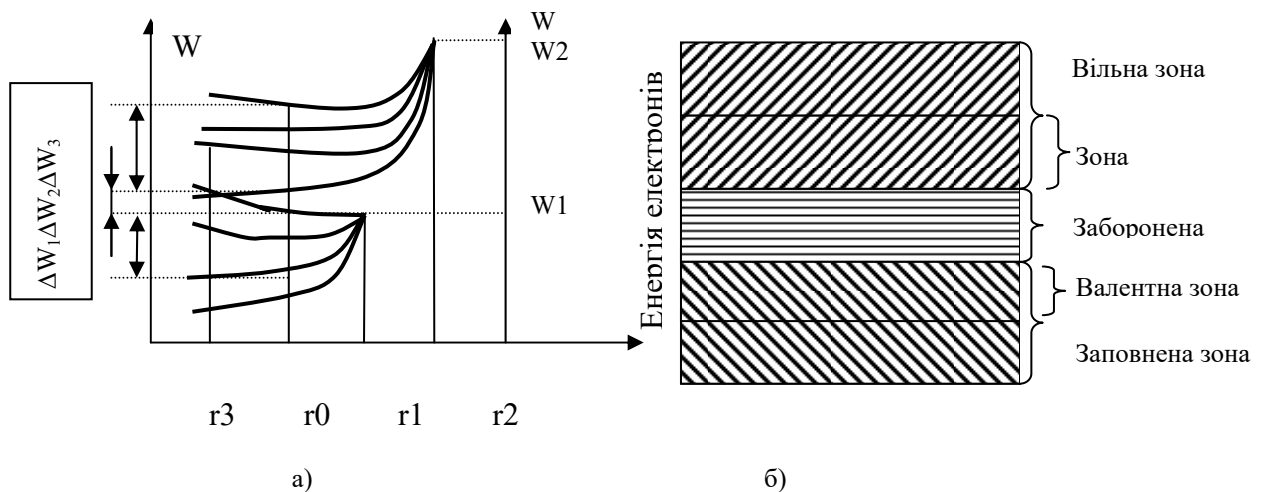


Рис. 1.2. Енергетичні зони твердого тіла

При об'єднанні в твердому тілі N однакових атомів, кожний рівень енергії розщеплюється на N близько розміщених один до одного енергетичних рівнів, які становлять енергетичну зону.

На рисунку 1.2. показано розщеплення енергетичних рівнів W_1 і W_2 електронів в одиничному атомі при утворенні системи із шести однакових атомів ($N = 6$). При достатньо великій відстані r між атомами вони майже не впливають один на одного. При зближенні томів до відстані $r = r_2$ проходить розщеплення енергетичного рівня W_2 на шість дискретних значень. Подальше зменшення віддалі до величини $r = r_1$ супроводжується розщепленням W_1 . При деякому значенні $r = r_0$ в системі утворюється дві сукупності декретних енергетичних станів, які лежать в інтервалі між ΔW_1 і ΔW_2 , і називаються енергетичними зонами. При $r = r_0$ - заборонена зона. При подальшому зближенні атомів настає перекриття енергетичних зон ΔW_1 і ΔW_2 (заповнюється заборонена зона ΔW_3). Утворюється заповнена зона.

Сукупність енергетичних рівнів валентних електронів утворюють валентну зону.

Слід пам'ятати, що поняття "енергетичний рівень" або "енергетична зона" характеризує тільки енергетичний стан електрона.

Основні властивості електрона:

1. Електрон - електрично заряджена частка, яка має негативний заряд $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, масу $m_e = 1,109 \cdot 10^{-31}$ кг, питомий заряд $\frac{e}{m_e} = 1,759 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.
2. Електрони відштовхуються один від одного.
3. В електричному Полі електрони зазнають впливу сили і самі можуть утворювати електричне поле.
4. Володіють високою рухливістю.
5. Впорядкований рух електронів створює електричний струм. Потік електронів створює магнітне поле.
6. Знаходячись у русі, електрон має кінетичну енергію, яка дорівнює $W_k = \frac{m_e \cdot v^2}{2}$
7. При зіткненні електронів з будь-яким тілом їх кінетична енергія перетворюється в тепло.

1.1.2 Робота виходу електронів. Електронна емісія

При температурі абсолютного нуля ($T = 0^0\text{K}$) і відсутності других джерел збудження електрони в атомах будь-якої речовини займають рівні з найменшою енергією.

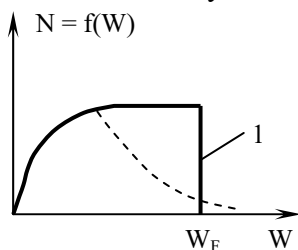


Рис. 1.3. Графік розподілення електронів за величинами енергії в зоні провідності

Із графіка видно, що при температурі абсолютного нуля немає електронів, які мають енергію, більшу W_F (рівень Фермі).

Величина W_F залежить від фізичних властивостей матеріалу:

$$W_F = \frac{h^2}{8m_e} \left(\frac{3N}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1.5)$$

де h - постійна Планка,

m_e - маса електрона,

N - число вільних електронів в 1 см^3 провідника. В металах $N \approx 10^{22} \dots 10^{23}$.

Енергія Фермі W_F має досить велике значення. Чому ж немає виходу електронів за поверхню металу?

По-перше. Ті електрони, які виходять за межу провідника, втрачають більшу частину своєї енергії і накопичуються на поверхні металу. Між цими електронами та додатними іонами, які знаходяться всередині металу біля його поверхні, утворюється електричне поле, ж направлене від провідника до шару електронів. Дія подвійного електричного шару на електрони, які намагаються залишити межі металу, є гальмівною, т.я. електронам приходится літати в напрямку електричних силових ліній і віддавати енергію полю.

По-друге. Метал, який залишився без частини електронів, заряджається позитивно і, таким чином, між ним і електронами виникає електричне поле, яке закриває вихід нових електронів.

Таким чином, для відриву від поверхні провідника електрони повинні затратити роботу проелектричних сил, які повертають їх назад:

$$W_a = W_F + W_0, \quad (1.6)$$

Вихід електронів можливий також із напівпровідників та діелектриків. Але при цьому робота витрачається не лише на подолання гальмових електричних сил, але й на збудження електронів, які переходять із валентної зони в зону провідності.

Таким чином, якщо електронам металів або напівпровідників повідомити із зовні додаткову енергію, то вихід їх із тіла стає можливим. Процес надання електронам додаткової енергії для їх виходу з речовини називається електронною емісією.

В залежності від способу повідомлення електронам додаткової енергії електронна емісія буває:

- *термоелектронна* - при якій додаткова енергія повідомляється в результаті нагріву катода;
- *фотоелектронна* - під дією електромагнітного випромінювання;
- *електростатична* - сильне електричне поле біля поверхні речовини створює сили, які допомагають електрону вийти за її межі.

1.1.3 Рух електронів в електричних та магнітних полях

Електрон в електричному полі. На електрон, який поміщений в електричне поле з напруженістю E , діє сила, яка дорівнює:

$$F = -eE, \quad (1.7)$$

де E - напруженість поля в місці знаходження заряду;

e - заряд електрона.

Знак “-” показує, що внаслідок негативного заряду електрона сила має напрям протилежний напрямку вектора напруженості електричного поля.

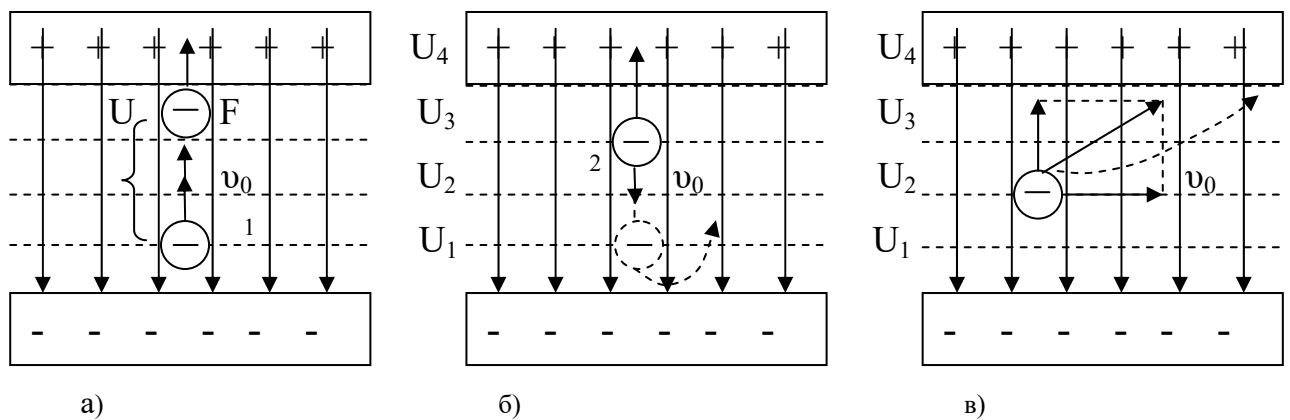


Рис. 1.4. Рух електрона в прискорюючому (а), гальмівному (б) і поперечному (в) електричних полях

На рисунку 1.4,а показане однорідне електричне поле, яке побудоване між двома паралельними пластинами достатньо великої протяжності. Під дією сили F електрон рухається назустріч електричному полю (переміщується в сторону точок з більш високим потенціалом). Поле в даному випадку *прискорююче*.

Робота, яку поле затрачає на переміщення заряду із однієї точки в іншу, визначається за формулою:

$$A = eU = e(U_3 - U_1), \quad (1.8)$$

де U - різниця потенціалів між точками 1 і 2,

e - заряд електрона.

Ця робота витрачається на повідомлення електрону кінетичної енергії:

$$W_k = \frac{m_e(v^2 - v_0^2)}{2} \quad (1.9)$$

де v_0 і v – швидкість руху електрона в точках 1 і 2. Прирівнявши рівності (1.8) і (1.9), отримуємо:

$$\frac{m_e(v^2 - v_0^2)}{2} = eU \quad (1.10)$$

Визначимо кінцеву швидкість електрона в прискорюючому електричному полі при нульовій початковій швидкості ($v_0 = 0$).

Із виразу (1.10) отримаємо:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_e}U} \quad (1.11)$$

Якщо підставити в (1.11) значення заряду і маси електрону, можна отримати вираз для швидкості електрону (км/с):

$$v \approx 600\sqrt{U} \quad (1.12)$$

Таким чином, швидкість, яку отримує електрон при рухові в прискорюючому електричному полі, залежить лише від пройденої ним різниці потенціалів.

Із формули (1.12) видно, що швидкості електронів, навіть при порівняно невеликій різниці потенціалів, получаются значними. Наприклад, при $U=100$ В отримуємо $v = 6000$ км/с. При такій великій швидкості всі процеси в приладах, пов'язані з рухом електронів, протікають дуже швидко. Наприклад, час, необхідний для пролітання електронів між електродами в електронній лампі, складає доли мікросекунди. Саме тому робота більшості електронних приладів може вважатись безінерційною.

Розглянемо рух електрона, у якого початкова швидкість направлена проти сили, яка діє на електрон зі сторони електричного поля (рис.1.4,б). В цьому випадку електричне поле є для електрона гальмуючим. В той момент, коли електрон повністю витратить свою енергію, його швидкість буде дорівнювати нулю, і потім електрон почне рухатися в зворотному напрямі. Рух його в зворотньому напрямі є нічим іншим, як розглянутий вище рухом без початкової швидкості в прискорюючому полі. При такому русі електрону поле повертає йому ту енергію, яку він витратив при гальмуючому русі.

В розглянутих вище випадках напрям швидкості руху електрону було паралельним напрямку силових електричних ліній поля. Таке електричне поле називається *продольним*. Поле, направлене перпендикулярно вектору початкової швидкості електрону, називається *поперечним*. Коли електрон влітає в електричне поле з деякою початковою швидкістю v_0 і під прямим кутом до напрямку електричних силових ліній (рис.1.4, в), він здійснює одночасно два взаємоперпендикулярних рухи: прямолінійне рівномірне за інерцією із швидкістю v_0 та прямолінійне рівномірноприскорене із швидкістю v_1 . під дією цих двох взаємоперпендикулярних швидкостей електрон буде рухатися по траєкторії, яка являє собою параболу. Після виходу із електричного поля електрон буде рухатися за інерцією прямолінійно.

Існує подібність між законами руху електронів в електричному полі і законами світлової оптики. На основі такої аналогії науку, яка вивчає рух електронів в електричному полі, називають *електронною оптикою*.

Електрон в магнітному полі. Вплив магнітного поля на рухомий електрон можна розглядати за формулою:

$$F = Bev \sin \alpha \quad (1.13)$$

Із (1.13) видно, що електрон, який рухається вздовж силових ліній магнітного поля ($\alpha = 0$), не відчуває ніякого впливу поля ($F = B e v \sin \alpha = 0$) і продовжує рухатись з заданою йому швидкістю.

Якщо вектор початкової швидкості електрона перпендикулярний вектору магнітної індукції, тобто $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (рис. 1.5), то сила, яка діє на електрон,

$$F = Bev \sin \frac{\pi}{2} = Bev \quad (1.14)$$

Напрямок цієї сили визначається за правилом лівої руки.

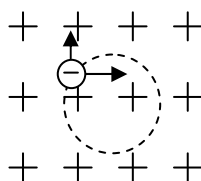


Рис. 1.5. Траєкторія руху електрона в магнітному полі

Сила F завжди перпендикулярна напрямку миттєвої швидкості v електрона і напрямку магнітних силових ліній поля. У відповідності з другим законом Ньютона ця сила повідомляє електрону з масою m_e прискорення, рівне $\frac{Bev}{m_e}$. Оскільки прискорення перпендикулярне

швидкості v , то електрон під дією цього нормального прискорення буде рухатися по колу, яке лежить в площині, перпендикулярній силовим лініям поля.

В загальному випадку початкова швидкість електрона може бути не перпендикулярна до магнітної індукції, тобто $\alpha < \frac{\pi}{2}$. В даному випадку траєкторію руху електрона визначають дві складові початкової швидкості: нормальна v_1 і дотична v_2 , перша із яких направлена перпендикулярно до силових ліній магнітного поля, а друга — паралельно їм. Під дією нормальної складової електрон рухається по колу, а під дією дотичної - переміщується вздовж силових ліній поля.

В результаті одночасної дії обох складових траєкторія руху електрона приймає вигляд спіралі.

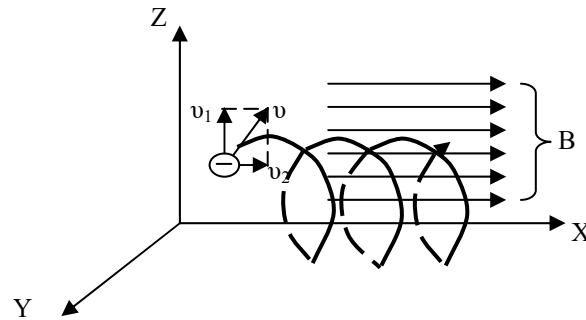


Рис.1.6. Траєкторія руху електрона в магнітному полі при $\alpha < \frac{\pi}{2}$

1.1.4 Електричний струм в газі

Сукупність явищ, обумовлених проходженням електричного струму через газ отримала назву електричного розряду в газі.

Іонізація газу. Іонізацією газу називають процес утворення в нейтральному газі іонів — позитивно або негативно заряджених атомів.

Розрізняють *поверхневу* і *об'ємну* іонізацію газу. Причиною поверхневої іонізації є емісія електронів з поверхні твердих тіл (катодів іонних приладів) за рахунок додаткової енергії, яка повідомляється атомам цих тіл при нагріванні (термоелектронна емісія), освітленні (поверхневий фотоефект), ударам швидкісних частинок (вторинна емісія) та ін. Атоми газу, взаємодіючи з позитивно зарядженою поверхнею катоду, який випромінює електрони, можуть перетворюватися в іони.

Однак основним видом іонізації газу є об'ємна іонізація, яка проходить в об'ємі газу. Частіше всього вона відбувається внаслідок співудару атомів газу з швидкісними частинками (електронами або іонами). Такий процес вибивання нових електронів і утворення додатних іонів називається іонізацією при співударі, або *ударною іонізацією*. Якщо отримані після іонізації вільні електрони мають достатню енергію, наприклад, отримавши її в прискорюючому електричному полі, то кожний з них може іонізувати новий атом і т. д. Таким чином, можливе лавиноподібне наростання кількості електронів і іонів.

Збудження атомів газу. Якщо на шляху вільного пробігу електрон не набуває енергії, достатньої для ударної іонізації, то при зіткненні з атомом проходить збудження нейтрального атома - переведення електрона на більш високий енергетичний рівень. Такий стан атома називається *збудженим*, а енергія, необхідна для його збудження, *енергією збудження*. В збудженому стані атом зазвичай знаходиться недовго, після чого переходить в нормальний стан. При такому переході атом віддає отриману ним раніше додаткову енергію в вигляді кванта електромагнітного випромінювання. Це випромінювання супроводжується свіченням газу, якщо випущені промені відносяться до видимої частини електромагнітного спектра.

Рекомбінація. Крім іонізації і збудження атомів, в газі проходить і зворотній процес утворення нейтральних атомів: рекомбінація позитивних і негативних іонів між собою або позитивних іонів і електронів, тобто повернення збуджених атомів в нормальний стан і розпад від'ємних іонів на нейтральні атоми і електрони.

Рекомбінація приводить до зменшення кількості заряджених частинок, тобто до деіонізації газу.

Зазвичай рекомбінація супроводжується виділенням променевої енергії. В більшості випадків при цьому спостерігається свічення газу.

Контрольні питання і вправи

1. Чому маса електрона відрізняється від маси іона?
2. Які критерії покладені в основу поділу речовин на провідники, напівпровідники та діелектрики?
3. Чому електрони, розташовані на зовнішніх орбітах атома, пов'язані з ядром слабше, ніж електрони, які знаходяться на ближчих до ядра орбітах?
4. В однорідному електричному полі електрон проходить різницю потенціалів 9 В. початкова швидкість дорівнює нулю. Визначити кінцеву швидкість електрона, який рухається в вакуумі, та його кінетичну енергію.
5. Як рухається електрон в електричному полі, якщо його початкова швидкість була направлена під кутом до вектора напруженості цього поля?
6. Коли траєкторією руху електрона в магнітному полі буде спіраль?
7. Яка різниця між поверхневою та об'ємною іонізацією?
8. Що супроводжує рекомбінацію іонів?

1.2. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

1.2.1 Фізичні властивості напівпровідників

З точки зору зонної теорії, до напівпровідників відносяться речовини, ширина забороненої зони яких не перебільшує 3 еВ.

Найважливішою властивістю напівпровідників є залежність їх електричних властивостей від зовнішніх умов: температури, освітлення, тиску і т. п.

Характерною особливістю напівпровідників є зменшення їх питомого опору із збільшенням температури.

Найбільш широке використання в напівпровідниковій техніці отримали германій, кремній, селен, а також напівпровідникові з'єднання типу арсенід галію, карбід кремнію, сульфід кадмію та інші.

Для напівпровідників характерна кристалічна будова, тобто закономірне і впорядковане розміщення їх атомів в просторі. В кристалах пов'язані між собою атоми розміщуються строго визначеним чином і на однакових відстанях один від одного, в результаті чого створюється решітка із атомів, яку прийнято називати *кристалічною решіткою твердого тіла*.

Між атомами кристалічної решітки існують зв'язки. Вони утворюються валентними електронами, які взаємодіють не лише з ядром свого атома, але й з сусідніми. В кристалах германію зв'язок між двома сусідніми атомами здійснюється двома валентними електронами - по одному від кожного атома. Такий зв'язок між атомами називається *двоелектронним* або *ковалентним*.

Кристалічна решітка, в якій кожний електрон зовнішньої орбіти зв'язаний ковалентними зв'язками з іншими атомами речовини -- ідеальна. В такому кристалі всі валентні електрони тісно пов'язані між собою і вільних електронів, які могли б приймати участь у переносі зарядів, немає. Таку кристалічну решітку мають всі хімічно-чисті бездомішкові напівпровідники при температурі абсолютного нуля (273°С), або (T=0°K). В цих умовах напівпровідники мають властивості ідеальних ізоляторів.

1.2.2 Власна провідність напівпровідників

Під дією зовнішніх факторів деякі валентні електрони атомів кристалічної решітки отримують енергію, достатню для вивільнення від ковалентних зв'язків.

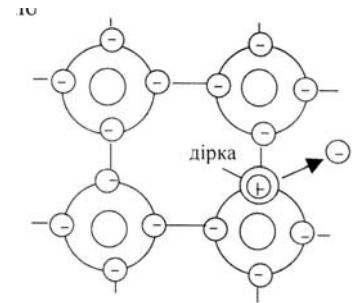
При звільненні електрону із ковалентного зв'язку в останньому виникає ніби вільне місце, яке має елементарний позитивний заряд. Таке звільнене в електронному зв'язку місце умовно назвали *діркою* (рис. 1.7), а процес утворення пари електрон-дірка отримав назву *-генерація зарядів*.

Дірка має позитивний заряд, тому вона може приєднати до себе електрон сусіднього заповненого ковалентного зв'язку. В результаті цього відновлюється один зв'язок (цей процес - рекомбінація) і порушується сусідній.

Концентрація дірок в ідеальній кристалічній решітці хімічно-чистого напівпровідника завжди дорівнює концентрації вільних електронів ($n_i = p_i$).

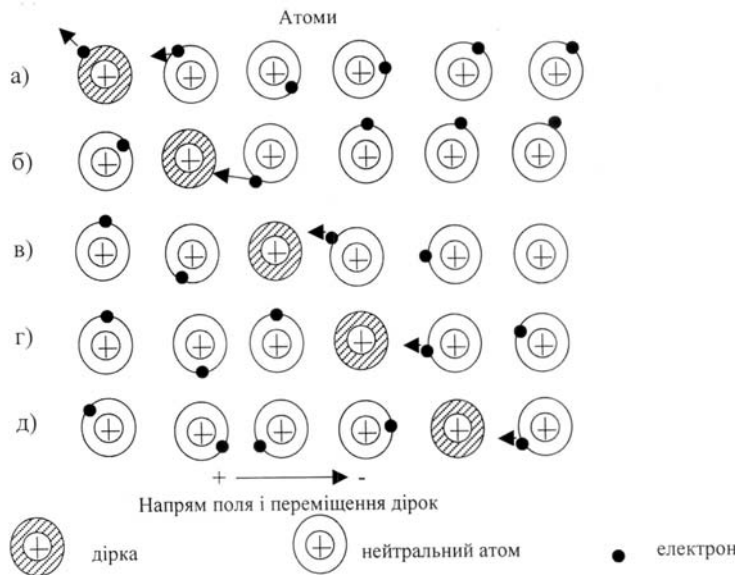
Електрична провідність чистого напівпровідника визначається кількістю власних носіїв n_i і p_i . Швидкість генерації носіїв (як і швидкість рекомбінації) визначається властивостями напівпровідника і його температурою. Швидкість рекомбінації, крім того, пропорційна концентрації електронів і дірок, так як чим більша кількість носіїв, тим вірогідніше, що їх зустріч завершиться рекомбінацією.

Рис. 1.7. Плошка схеми структури атомної решітки кристалу кремнію



При відсутності зовнішнього електричного поля електрони і дірки пересуваються в кристалі хаотично внаслідок теплового руху. В цьому випадку струм в напівпровіднику не виникає. Якщо ж на кристал діє електричне поле, рух дірок і електронів стає впорядкованим і в кристалі виникає електричний струм.

Щоб зрозуміти, як переміщуються дірки, розглянемо рис. 1.8, на якому зображено декілька одних і тих же атомів, розміщених вздовж напівпровідника, в різні моменти часу.



Таким чином, провідність напівпровідника зумовлена переміщенням як вільних електронів, так і дірок. В першому випадку носії зарядів негативні, в другому - позитивні.

Рис. 1.8. Принцип діркової провідності

Відповідно розрізняють два види провідності напівпровідників - *електронна або провідність типу n і діркова або провідність типу p*.

В хімічно-чистому кристалі напівпровідника кількість дірок завжди дорівнює кількості вільних електронів і електричний струм в ньому утворюється в результаті одночасного переносу зарядів обох знаків.

Така електронно-діркова провідність називається *власною провідністю напівпровідників*. При цьому загальний струм в напівпровіднику дорівнює сумі електронного і діркового струмів.

Висновок:

1. Питома провідність напівпровідника залежить від концентрації електронів і дірок та від їх рухливості.
2. Питома електропровідність залежить від типу речовини та її температури.

1.2.3 Домішкова провідність

Наявність домішок суттєво змінює провідність напівпровідників. В залежності від того, атоми якої речовини будуть введені в кристал, можна отримати перевагу надлишкових електронів або дірок.

Домішкова провідність – провідність, яка створена присутністю в кристалі напівпровідника домішків із атомів з іншою валентністю.

Домішки, які викликають в напівпровіднику збільшення вільних електронів, називаються *донорними*, дірок - *акцепторними*.

Напівпровідники, електропровідність яких підвищилась внаслідок утворення надлишку вільних електронів при введенні домішки, називаються напівпровідниками з *електронною провідністю (типу n)*, навпаки — *напівпровідники з дірковою провідністю (типу p)*.

Дрейфовий і дифузний струми в напівпровіднику

Струм в напівпровіднику з'являється як наслідок направленого руху носіїв заряду. Розрізняють два можливий випадки появи струму в напівпровіднику.

Струм, обумовлений зовнішнім електричним полем, називається *дрейфовим*.

Струм, який виникає в результаті дифузії носіїв із області, де їх концентрація підвищена, в напрямку області з більш низькою концентрацією, називається *дифузним*.

Нерівномірність концентрації може виникнути під дією світла, нагрівання, електричного поля і т.д.

1.2.4 Електронно-дірковий перехід

Припустимо, що є два домішкових напівпровідника: один р-типу, інший n-типу провідності. Концентрація носіїв в рівновазі $N_e = N_d$. Наблизимо їх до контакту (рис.1.9). Електрони із напівпровідника n-типу почнуть дифундувати в напівпровідник р-типу, і навпаки. В граничному р- шарі пройде рекомбінація дірок, а в граничному n- шарі - об'єднання електронами.

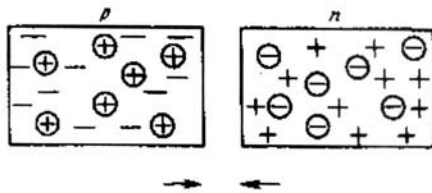


Рис.1.9. Зближення двох приміроків домішкових напівпровідників різного типу провідності при $N_e = N_d$; \oplus - дірка; \ominus - електрон; -, + - від'ємні і додатні іони

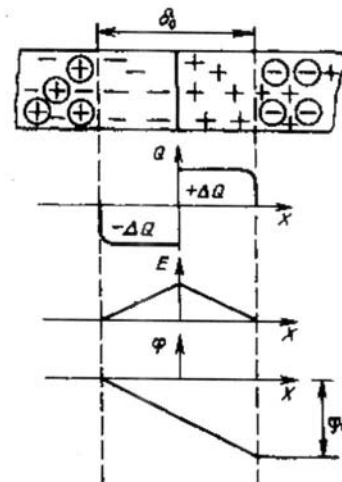


Рис. 1.10. Створення р-n переходу

Із двох граничних шарів утворюється шар δ_0 , який містить нерухомі додатні і від'ємні іони, які в свою чергу, утворюють додатній і від'ємний об'ємні заряди ($+\Delta Q$ $-\Delta Q$) (рис.1.10). Об'ємні заряди викликають утворення електричного поля E . Під дією електричного поля виникає контактна різниця потенціалів ϕ_k між межами шару δ_0 - Контактний шар δ_0 , об'єднаний носіями електричних зарядів, прийнято називати електричним переходом, р-n переходом або електронно-дірковим переходом.

Електричний перехід - перехідний шар в напівпровідниковому матеріалі між двома областями напівпровідника, одна з яких має провідність n-типу, а інша - р-типу, або різними значеннями питомої електропровідності.

Електронно-дірковий перехід – електричний перехід між двома областями напівпровідника з різними типами провідності.

Контактна різниця потенціалів різниця потенціалів, обумовлена власним електричним полем р-n переходу.

Слід відмітити, що електронно-дірковий перехід не можливо отримати простим дотиком напівпровідникових тіл з різною провідністю із-за наявності нерівностей і окисних покриттів дотичних поверхонь. Справжній р-n перехід отримують в одному монокристалі, в який особливими технологічними методами "впорскують" домішкові атоми.

1.2.5 Властивості р-п переходу

Визначною властивістю р-п переходу - *одностороння провідність*.

Якщо до напівпровідника прикласти електричну напругу, то в залежності від полярності цієї напруги, р-п перехід проявляє зовсім різні властивості.

Коли негативний полюс джерела (рис. 1.11, а) підімкнений до п-області кристалу, а позитивний - до р-області, зовнішнє електричне поле і поле р-п переходу направлені в протилежні сторони. Тому електричне поле р-п переходу виявиться в значній мірі послабленим, і тепер вже електрони із п - області зможуть проникати в р- область, а дірки із р-області в п- область. Таким чином, в колі живлення напівпровідника виникає електричний струм.

Полярність прикладеної напруги, при якій через напівпровідник протікає струм - *пряма полярність*.

Коли ж негативний полюс джерела живлення (рис. 1.11, б) підімкнений до р-області кристалу, а позитивний - до п-області, електричні поля джерела і р-п переходу співпадають. Сумарне поле збільшується і в ще більшій мірі буде перешкоджати руху електричних зарядів через р-п перехід. Якщо розглядати ідеальний випадок, електричного струму через перехід не буде. Така полярність - *зворотня*.

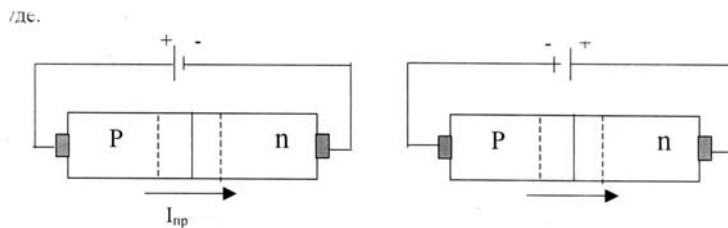


Рис. 1.11. Пряме (а) і зворотнє (б) підключення р-п переходу

Але в реальних умовах в НП, крім основних носіїв електричних зарядів - електронів і дірок, які утворюються при введенні домі шків, є і неосновні носії зарядів (їх значно менше) - електрони і дірки, які виникають внаслідок теплового руху атомів в кристалі. Частина цих електронів і дірок здатна проходити через р-п перехід при зворотній полярності прикладеної до напівпровідника напруги. В цьому випадку виникає *зворотній струм*, який набагато менший прямого.

Властивості електронно-діркового переходу наочно ілюструються його вольт-амперною характеристикою (рис.1.12), яка показує залежність струму через р-п перехід від величини і полярності прикладеної напруги.

Проаналізувавши ВАХ, можна зробити висновок, що р-п перехід володіє випрямними властивостями, тобто проводить струм в прямому напрямі і практично не проводить його в зворотному напрямі. При збільшенні зворотної напруги зворотній струм стає рівним струму насичення і в визначених межах залишається величиною практично постійною. Зазвичай він має величину порядку мікроампернавіть

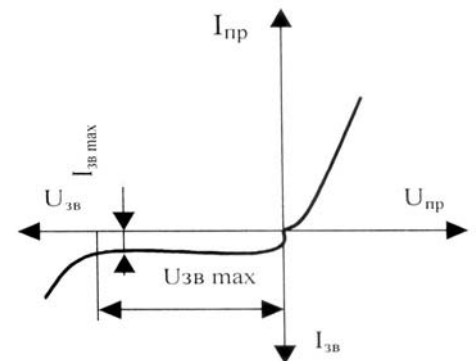


Рис.1.12. Вольт-амперна характеристика р-п переходу

У напівпровіднику $U_{зв} \gg U_{пр}$, а $I_{зв} \ll I_{пр}$, але при деякому збільшеному значенні $U_{зв}$ настає явище пробою р-п переходу і $I_{зв}$ різко збільшується.

Електричний пробій р-п переходу обумовлений тунельним ефектом. При цьому швидкість електронів досягає швидкості іонізації.

Тунельний пробій - електричний пробій переходу, викликаний тунельним ефектом, природа якого пов'язана з проходженням електронів в зону провідності без повідомлення їм необхідної енергії, яка відповідає ширині забороненої зони.

Електричний і тунельний пробій протікають одночасно, і якщо не обмежити струм через р-п перехід, то може наступити *тепловий пробій*, який виникає внаслідок виділення теплової потужності $P = U_{зв} \cdot I_{зв}$

В діапазоні зворотних напруг, які не перевищують напруги пробою, перехід проявляє *ємнісні властивості*, і поводить себе як конденсатор. Причому, ємність переходу обернено пропорційна прикладеній напрузі. Ця властивість широко використовується там, де виникає необхідність використання конденсаторів змінної ємності.

Властивості р-п переходу суттєво залежать від температури навколишнього середовища. При підвищенні температури зростає генерація пар носіїв заряду - електронів і дірок, тобто збільшується концентрація неосновних носіїв і власна провідність напівпровідника. Отже, при нагріванні (рис. 2.8) сильно зростає зворотній струм, зростання струму в прямому напрямі проходить набагато слабше. Це пояснюється тим, що прямий струм виникає в основному за рахунок домішкової провідності, але концентрація домішок від температури практично не залежить.

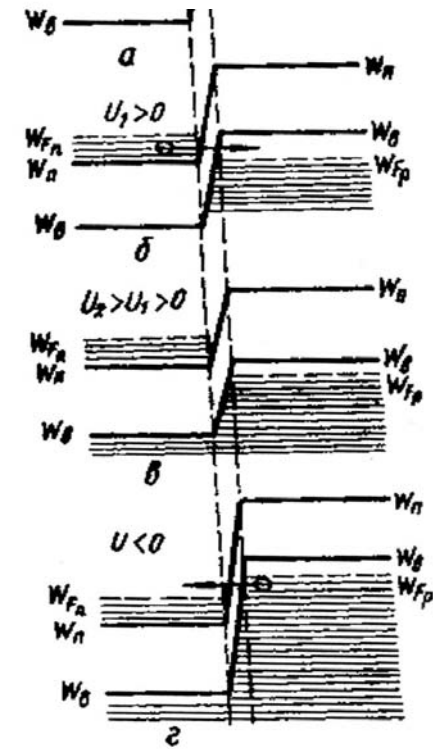
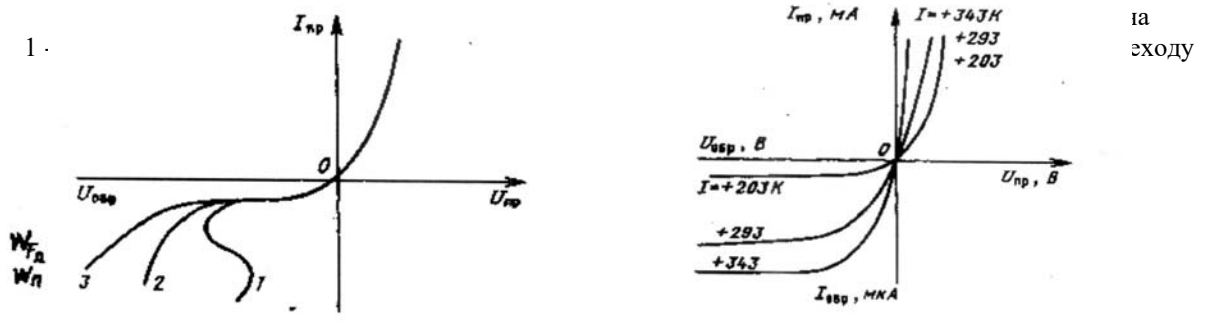


Рис.1.13. Енергетичні діаграми р-п переходу при тунельному ефекті

Для германієвих і кремнієвих р-п переходів зворотній струм зростає приблизно в 2-2,5 рази при підвищенні температури на кожні 10^0 С.

Властивості р-п переходу залежать також від частоти прикладеної напруги, це пояснюється наявністю власної ємності між шарами напівпровідника з різними типами провідності.

В 1958 р. японський вчений Лео Есаки відкрив явище тунельного ефекту.

Тунельний ефект заключається в тому, що електрони проходять через потенціальний бар'єр р-п переходу, не змінюючи своєї енергії. Для отримання тунельного ефекту використовується напівпровідниковий матеріал (германій, арсенід галію) з дуже великою концентрацією домішок (до 10^{21} домішкових атомів в 1 см^3), в той час як зазвичай концентрація домішок в напівпровідниках не перевищує 10^{15} см^{-3} .

Напівпровідники з таким високим вмістом домішків називаються виродженими, а їх властивості дуже близькі до властивостей металів.

Внаслідок великого вмісту домків в обох областях напівпровідникового кристалу ширина р-п переходу виявляється дуже малою (не більше $0,01 \text{ мкм}$), що приводить до значного підвищення напруженості електричного поля на переході (біля 10^8 В/м). В цих умовах є кінцева вірогідність того, що електрон, який рухається в сторону дуже вузького бар'єру, пройде крізь нього (як через "тунель") і займе вільний стан з такою ж енергією по іншу сторону від бар'єрного шару. Дане явище було названо тунельним ефектом.

Відомо, що збільшення концентрації донорних домішків зміщує рівень Фермі вгору, а збільшення концентрації акцепторних домішків - вниз відносно середини забороненої зони, при концентрації домішків порядку 10^{21} см^{-3} рівень Фермі напівпровідника n - типу розміщується всередині зони провідності, а рівень Фермі напівпровідника р-типу - всередині валентної зони.

Із рисунка 1.13 (а) видно, що при відсутності зовнішньої напруги рівні Фермі зони провідності і валентної зони співпадають, можливості переходу електронів через потенціальний бар'єр із одного шару в інший немає.

Якщо до р-п переходу прикласти невелику пряму напругу, то висота потенціального бар'єру і перекриття зон зменшується (рис. 1.13, б). Енергетична діаграма напівпровідника n-типу підніметься вгору, а напівпровідника р-типу опуститься вниз. При цьому рівні деяких електронів провідності n - області розмістяться проти вільних рівнів валентної зони р - області. Тим самим

створюються умови для тунельного переходу електронів і електронного напівпровідника в дірковий. Тому через р-n перехід тунельний струм, величина якого буде залежати від величини прикладеної прямої напруги. Слід відмітити, що при прямій напрузі через р-n перехід, крім тунельного струму, проходить і дифузний струм $I_{\text{диф}}$, який створюється переміщенням електронів і дірок провідності. Отже повний струм р-n переходу при тунельному ефекті складає

$$I = I_{\text{т.пр}} + I_{\text{диф}}$$

При подачі прямої напруги, яка перевищує певне значення тунельний струм починає різко спадати. При деякому значенні прямої напруги (рис 2 9 в) коли напруженість електричного поля в р-n переході різко знижується, тунельний струм припиняється, а р-n перехід набуває звичайні властивості, пов'язані з проходженням через нього дифузного струму.

При подачі на р-n перехід зворотної напруги (рис.2.9, г) енергетична діаграма напівпровідника n - типу опускається вниз, а напівпровідника р-типу - вгору. Ширина зони перекриття збільшується, що призводить до зростання зворотного тунельного струму, оскільки виникають умови для вільного тунельного переходу валентних електронів із р-області в зону провідності n-області. Величина зворотного струму залежить від величини зворотної напруги.

Одностороння провідність р-n переходу при тунельному ефекті повністю відсутня.

Контрольні питання і вправи

1. Назвіть основні специфічні властивості напівпровідників.
2. Що таке дірка?
3. Поясніть процес проходження струму в чистих напівпровідниках.
4. Від чого залежить електропровідність домішкових напівпровідників?
5. Що таке основні та неосновні носії зарядів?
6. Які струми можуть протікати в напівпровіднику?
7. Поясніть залежність питомої провідності напівпровідника від температури.
8. Дайте визначення р-n переходу.
9. Чому р-n перехід часто називають запираючим шаром?
10. Що таке повернений і неповернений електричний пробій р-n переходу?
11. як пояснити вплив температури на форму вольт амперної характеристики р-n переходу?
12. Чому прямий струм через р-n перехід набагато більший за зворотній?
13. Чим пояснюється ємнісна властивість р-n переходу?

2. ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

2.1. ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНІКИ

2.1.1. Резистори

Резистори – елементи електричного ланцюга, призначені для використання їх опору. За видом вольт-амперної характеристики розрізняють резистори:

- *лінійні* (постійного і змінного опору);
- *нелінійні* (за струмопровідний елемент використовують різні напівпровідникові матеріали).

В залежності від виду резистивного елементу резистори діляться на :

- *дротяні* (виготовляють із високоомного дроту (манганін, константан, ніхром та ін), намотаного на діелектричний корпус);
- *недротяні* (виготовляються із високоомної речовини (металу або вуглецевого з'єднання) шляхом напилювання його на ізоляційну основу, наприклад на керамічний стержень або трубку, на кінцях якого закріплені контакти). Такі резистори мають лінійну ВАХ і, як правило, використовуються як пасивні елементи в схемах електронних пристроїв.

За способом захисту резистивного елементу розрізняють резистори:

- *неізольовані*;
- *ізольовані (лаковані)*;
- *компаундовані*;
- *опресовані пластмасою*;
- *герметизовані*;
- *вакуумовані*.

В залежності від призначення резистори поділяють на :

- *загального призначення* (до таких резисторів не пред'являються підвищені вимоги по відношенню до точності їх виготовлення і стабільності параметрів);
- *спеціального призначення* (до них відносять резистори підвищеної стабільності, високочастотні, високомегаомні, а також резистори для мікромодулів та мікросхеім).

Основні параметри резисторів.

Номинальний опір – значення опору, який повинен мати резистор у відповідності з нормативною документацією. Фактичний опір кожного екземпляру резистора може відрізнитися від номінального, але не більше ніж на допустиме відхилення. Найбільш можливе відхилення виражають у відсотках.

Номинальна потужність – максимально допустима потужність, яка розсіюється на резисторі, при якій параметри резистора зберігаються у встановлених межах на протязі довгого часу.

Температурний коефіцієнт опору (ТКО) – відносна зміна опору резистора при зміні температури зовнішнього середовища на 1°C.

Електрична міцність – характеризується граничною напругою, при якій резистор може працювати на протязі строку служби без електричного пробою. Залежить від атмосферного тиску, температури і вологості повітря.

Рівень власних шумів.

Маркування резисторів.

Якщо рівень шумів резистора менший 1 мкВ/В, на ньому ставиться буква **А**.

Резистори постійного опору позначаються буквою **С**, змінного – **СП**.

Цифра, що стоїть після букв означає:

- 1 – вуглецевий; 2 – металоплівковий або металооксидний; 3 – плівковий композиційний; 4 – об'ємний композиційний; 5 – дротяний.

Після дефісу слідує номер розробки резистора.

Приклад: С2-10

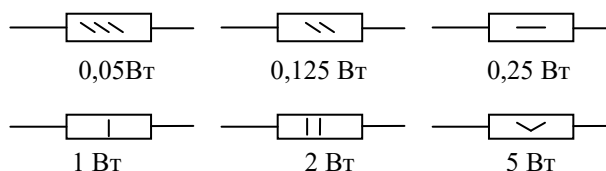
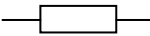

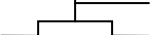


Рис. 2.1.1. Позначення номінальної потужності резистора

В схемах номінальну потужність вказують значками всередині умовного графічного зображення (рис. 2.1.1).

Умовні графічні зображення резисторів за можливістю зміни їх номінального опору:

- постійні 
- змінні 
- підстроювальні 

- ❖ Опір двох резисторів, один з яких має великий опір, а інший – малий, які з'єднані послідовно (паралельно), приблизно дорівнює більшому (меншому) з двох опорів.
- ❖ Опір однакових паралельно з'єднаних резисторів дорівнює 1/n-й частині опору одного з них.

2.1.2 Конденсатори

В першому наближенні *конденсатори* – це частотно залежні резистори.

Конденсатор – це радіоелемент, призначений для використання їх ємності.

Конденсатор – це пристрій, який має два виводи і властивість:

$$Q = C \cdot U \quad (2.1.1)$$

(конденсатор, який має ємність C фарад, до якого прикладена напруга U вольт, накопичує заряд Q кулон).

Якщо продиференціювати вираз, отримаємо

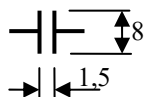
$$I = C \left(\frac{dU}{dt} \right) \quad (2.1.2)$$

Отже, конденсатор – це більш складний елемент ніж резистор: струм пропорційний не просто напрузі, а швидкості зміни напруги. Якщо напруга на конденсаторі, який має ємність 1 Ф , зміниться на 1 В за 1 с , то отримаємо струм 1 А .

Ємність, яка дорівнює 1 Ф , дуже велика і тому частіше мають справу з мкФ (мікрофарадами) і пФ (пікофарадами).

Промисловість випускає конденсатори різних форм і розмірів.

Найпростіший конденсатор складається з двох провідників (обкладинок), розміщених на невеликій відстані між собою. Щоб отримати більшу ємність, потрібні більша площа і менша відстань між провідниками. Зазвичай для цього один з провідників покривають тонким шаром ізолюючого матеріалу.



2.1.1. Умовне графічне зображення плоского конденсатора

Основні параметри конденсаторів.

Номінальна ємність

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l} \quad (1.2.3)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-3}$

ϵ – відносна діелектрична проникність, $\epsilon \geq 1$

S – площа електроду, мм^2

l – відстань між електродами, мм

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ)

$$\text{ТКЄ} = \frac{\Delta C \cdot 100}{C \cdot \Delta T} \quad (1.2.4)$$

де ΔC – зміна ємності при зміні температури на 1°C .

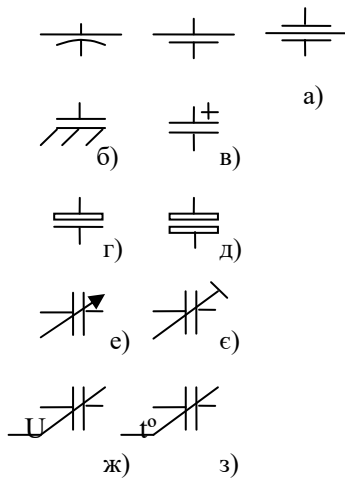
Номінальна напруга ($U_{\text{ном}}$) – максимально допустима напруга, при якій конденсатор може працювати довгий час без можливості електричного пробоя.

Значення номінальної напруги та ємності вказуються на корпусі конденсатора

Опір ізоляції ($R_{\text{із}}$) – електричний опір конденсатора постійному струму.

Тангенс Q – відношення активної складової потужності конденсатора до її реактивної складової при синусоїдальній напрузі визначеної частоти. Кут Q є доповненням до кута зсуву фаз ϕ між дійсним значенням напруги на конденсаторі і струмом, який проходить через нього.

Широке розповсюдження отримали такі типи конденсаторів: керамічні, електролітичні, слюдяні.



В загальному можна сказати, що для некритичних схем підходять керамічні і майнарові конденсатори; в схемах, де потрібна велика ємність, застосовуються танталові конденсатори, а для фільтрації в джерелах живлення використовують електролітичні конденсатори.

На рисунку 2.1.2 показані умовні графічні зображення різних типів конденсаторів.

Рис. 1.2.2. УГЗ конденсаторів: а) прохідні; б) опорний; в) поляризований; г) оксидний полярний; д) оксидний неполярний; е) змінної ємності; ж) вариконд; з) термоконденсатор

2.1.3 Котушки індуктивності. Трансформатори

Якщо порівняти індуктивність (рис.1.2.3) і конденсатор, то ми побачимо, що в індуктивності швидкість зміни струму залежить від прикладеної напруги, а в конденсаторі швидкість зміни напруги залежить від струму, що протікає.



Рис. 1.2.3. УГЗ індуктивності

Рівняння індуктивності МА наступний вигляд

$$U = L \left(\frac{dI}{dt} \right) \quad (1.2.4)$$

Напруга, прикладена до котушки індуктивності, викликає зростання струму, що протікає через неї, при чому зміна струму відбувається за лінійним законом; напруга величиною 1 В, прикладена до котушки і індуктивності 1 Гн, призводить до зростання струму через котушку зі швидкістю 1 А в 1с.

Умовно котушку індуктивності зображують у вигляді декількох витків дроту – таку конструкцію має найпростіша індуктивність. Інші конструкції включають осердя, на яке намотується дріт. Матеріалом для осердя найчастіше служить залізо (пластинки, прокатані із сплавів заліза або виготовлені методами порошкової металургії) або ферит, що являє собою крихкий непровідний магнітний матеріал чорного кольору. Осердя дозволяє збільшити індуктивність котушки за рахунок магнітних властивостей матеріалу осердя. Осердя може бути виготовленим у вигляді бруска, тора або може мати яку-небудь більш чудну форму, наприклад „горщика” (описати його словами не так просто: уявіть собі форму для випічки пірижків, яка рознімається пополам).

Котушки індуктивності знаходять найбільше застосування в радіочастотних схемах, де вони використовуються в якості високочастотних дроселів, і в резонансних схемах.

- ❖ По суті справи котушка індуктивності – це протилежність конденсатору.
- ❖ В колі змінного струму котушки індуктивності ведуть себе як резистори, опір яких зростає із збільшенням частоти.

Одиниці вимірювання індуктивності: Гн (Генрі); мілігенрі (мГн); мікрогенрі (мкГн).

На рисунку 1.2.4 представлені умовні графічні зображення котушок індуктивності.

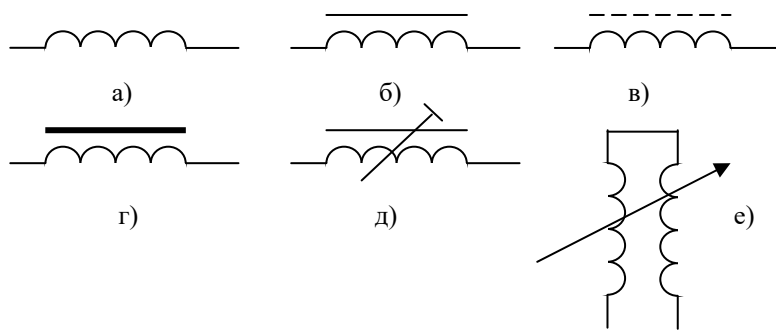


Рис. 1.2.4. УГЗ котушок індуктивності: а) без осердя; б) з осердям із немагнітного матеріалу; в) з магніто діелектричним осердям; г) з феромагнітним осердям; д) з підстроювальною індуктивністю е) варіометр

Трансформатор – це пристрій, який складається із двох пов’язаних між собою котушок індуктивності, які називаються первинною і вторинною обмотками трансформатора. Для вказання початку обмоток використовують крапку.

Мережений трансформатор – трансформатор живлення електронної апаратури, призначений для роботи від мережі змінного струму.

Вихідний трансформатор – служить для узгодження вихідного повного електричного опору каскаду електронної апаратури з повним опором навантаження.

Узгоджувальний трансформатор – служить для узгодження різних повних опорів електричних ланцюгів при передачі електричних сигналів від одного каскаду до іншого.

Імпульсний трансформатор – служить для передачі, формування, перетворення і запам’ятовування імпульсних сигналів.

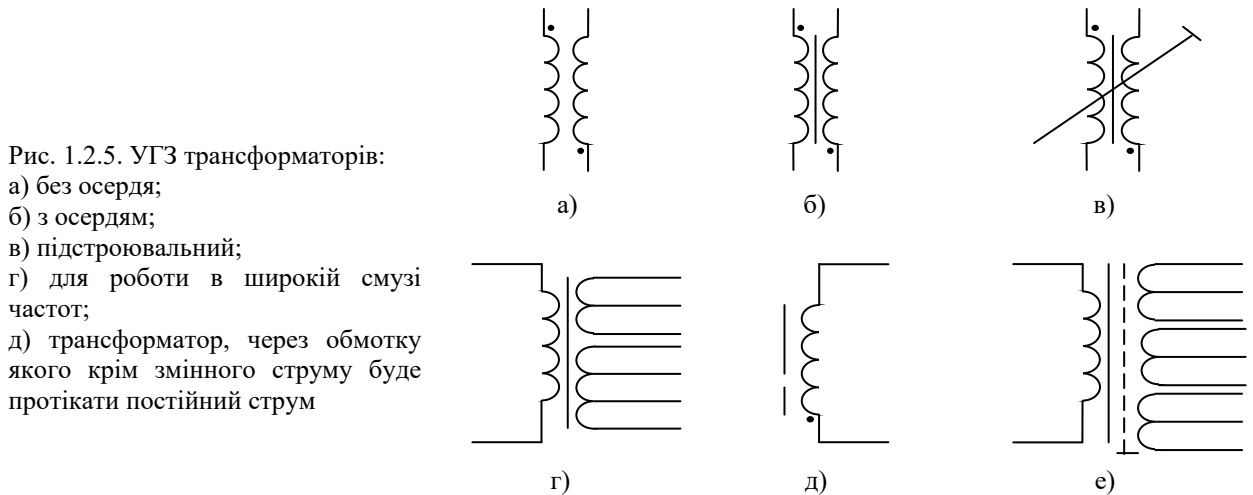


Рис. 1.2.5. УГЗ трансформаторів:
а) без осердя;
б) з осердям;
в) підстроювальний;
г) для роботи в широкій смузі частот;
д) трансформатор, через обмотку якого крім змінного струму буде протікати постійний струм

Трансформатор володіє досить високим коефіцієнтом корисної дії (потужність на його виході майже дорівнює потужності на вході); в зв’язку з цим підвищуючий трансформатор забезпечує ріст напруги при зменшенні струму. Трансформатор з відношенням числа витків обмоток рівним n змінює повний опір в n^2 раз. Якщо вторинна обмотка не навантажена, то в первинній протікає дуже невеликий струм.

В електронних приладах трансформатори виконують дві важливі функції: по-перше, вони перетворюють напругу змінного струму мережі до потрібного, зазвичай більш низького значення, яке можна використати в схемі, і, по-друге, вони „ізолюють” електронну схему від безпосереднього контакту з силовою мережею, так як обмотки трансформатора електричноізолювані між собою.

На рисунку 1.2.5. представлені умовні графічні зображення деяких видів трансформаторів.

2.1.4 Коливальні контури

Коливальний контур – найпростіша частотно-залежне коло, яке складається з котушки індуктивності L і конденсатора C .

Для отримання в контурі електричних коливань необхідно спочатку повідомити конденсатору початковий запас енергії, тобто зарядити його. Для цього в схемі (рис. 1.2.6) перемикач SA поставимо в положення 1, внаслідок чого конденсатор C зарядиться до напруги батареї U_m , а в електричному полі між обкладинками конденсатора запасеться енергія

$$W_C = \frac{CU_m^2}{2} \quad (1.2.5)$$

Якщо тепер поставимо перемикач в положення 2, то конденсатор стане замкненим на котушку і почне розряджатися. Через котушку пройде струм, який створить навколо неї магнітне поле. Напруга на конденсаторі при розряді зменшиться, а струм в котушці поступово буде зростати. Це означає, що енергія, що була накопичена в електричному полі конденсатора, поступово зменшується і перетворюється в енергію магнітного поля котушки. В той момент, коли струм розряду досягне максимального значення, енергія магнітного поля котушки буде дорівнювати

$$W_L = \frac{LI_m^2}{2} \quad (1.2.6)$$

В цей момент конденсатор повністю розрядиться і напруга на ньому впаде до нуля. Далі струм в контурі почне зменшуватися, що призведе до зменшення енергії магнітного поля котушки. При цьому за законом Ленца в котушці виникає ЕРС самоіндукції, яка підтримує струм, що зменшується.

Цей струм знову зарядить конденсатор, але полярність напруги на обкладинках виявиться протилежною порівняно з попереднім випадком. В процесі перезарядки конденсатора відбувається перехід енергії магнітного поля котушки в енергію електричного поля конденсатора. В той момент, коли струм впаде до нуля, напруга на конденсаторі досягне початкової величини. Після цього конденсатор почне розряджатися в протилежному напрямі і процес обміну енергією між конденсатором і котушкою буде повторюватися.

Характер зміни напруги на конденсаторі і струму в контурі ілюструє рис. 1.2.7.

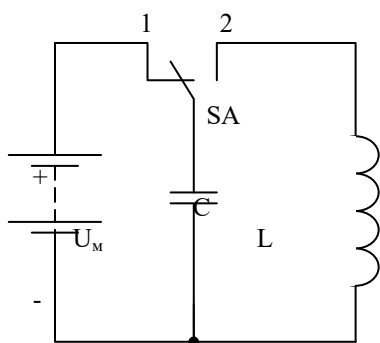


Рис. 1.2.6. Коливальний контур

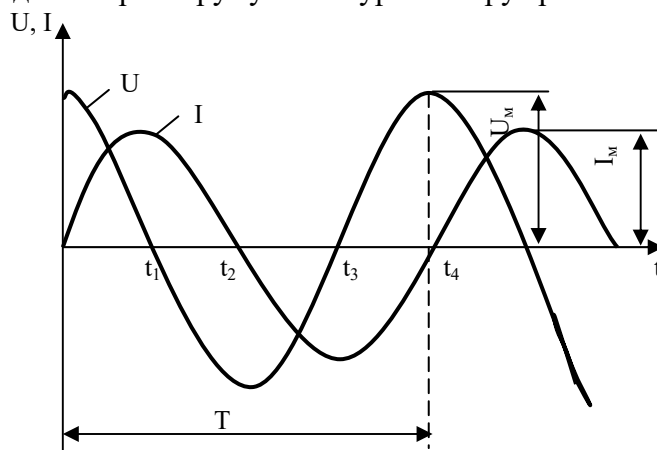


Рис. 1.2.7. Графіки напруги і струму в контурі

Таким чином, в контурі проходить періодичний коливальний процес переходу енергії електричного поля конденсатора в енергію магнітного поля котушки і навпаки. Такий процес називається *процесом електромагнітних коливань*.

- ❖ *Коливання, які проходять в контурі при відсутності в ньому джерела змінної ЕРС, називають **вільними коливаннями**.*
- ❖ *Частоту вільних коливань визначають величини L і C контуру таким чином, що чим більші ємність і індуктивність контуру, тим нижча частота його власних коливань.*

Період T_0 вільних коливань (час, на протязі якого здійснюється повний цикл обміну енергією) визначають за формулою

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{LC} \quad (1.2.7)$$

Число коливань в секунду називають частотою

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \quad (1.2.8)$$

Амплітудне значення струму в контурі

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{U_m}{\rho} \quad (1.2.9)$$

де $\rho = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - хвильовий опір контуру.
Кругова частота вільних коливань в контурі

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.2.10)$$

Процес вільних коливань в контурі міг би продовжуватись нескінченно довго, якби контур складався лише із ємності і індуктивності. Практично в будь-якому реальному контурі коливання достатньо швидко затухають, так як при кожному переході енергії із конденсатора в котушку і навпаки частина її витрачається на активний опір провідників, в діелектрику конденсатора, а також в результаті розсіювання електромагнітної енергії в навколишнє середовище. Тому процес вільних коливань в контурі є *затухаючим*.

Якщо контур підключити до генератора змінного струму, то при цьому в контурі будуть виникати незатухаючі коливання, які називаються *вимушеними*, так як їх частота задається частотою зовнішнього генератора.

Генератор змінного струму можна підімкнути до контуру двома способами: послідовно з елементами контуру L, C і R і паралельно їм. В першому випадку контур називають *послідовним*, а в другому – *паралельним*.

Послідовний коливальний контур

Необхідно відмітити, що хоча активний опір втрат R розподілений по всьому контуру, на рис. 1.2.8 він показаний як самостійний зосереджений елемент, до якого віднесені всі втрати енергії.

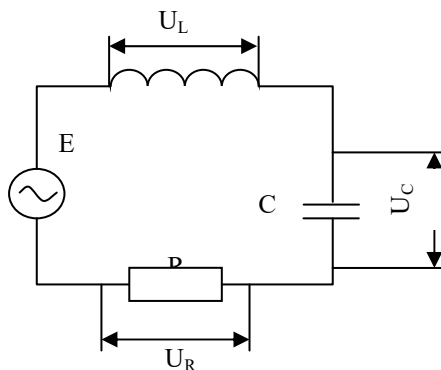


Рис. 1.2.8. Послідовний коливальний контур

Найбільшому значенню струму в контурі відповідає умова

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (1.2.11)$$

В цьому випадку струм в контурі

$$I_{\max} = \frac{E}{R} \quad (1.2.12)$$

Частота генератора, яка відповідає максимальному значенню струму в контурі

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{або} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.2.13)$$

Порівнюючи вирази 1.2.10 і 1.2.13, легко замітити, що частота генератора ω , яка відповідає максимальному значенню струму в контурі, співпадає з частотою власних коливань контуру ω_0 . Це явище називають **резонансом**.

- ❖ При резонансі послідовний контур є для генератора найменшим, чисто активним опором, який дорівнює за величиною опору контуру.
- ❖ При резонансі змінна напруга на конденсаторі і на котушці може в багато раз перевищувати за величиною прикладену до контуру E/RC .
- ❖ Резонанс в послідовному контурі називають **резонансом напруг**.

Паралельний коливальний контур

Схема підключення генератора до паралельного коливального контуру показана на рис. 1.2.9.

- ❖ Явище в паралельному контурі, при якому струм в нерозгалуженій частині кола має найменше значення, а по фазі співпадає з напругою генератора, називають **резонансом струмів**.
- ❖ В момент резонансу контур виявляє генератору найбільший і при цьому чисто активний за своїм характером опір.

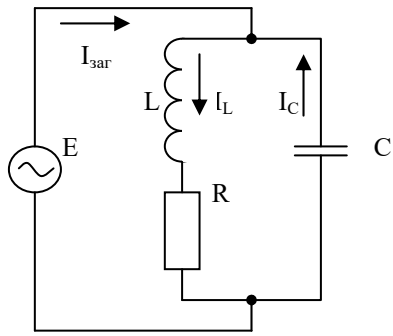


Рис. 1.2.8. Паралельний коливальний контур

Як і при резонансі напруг, умовою резонансу струмів є рівність $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, тобто резонанс струмів спостерігається в коливальному контурі тоді, коли частота генератора дорівнює частоті власних коливань контуру $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

- ❖ Резонансний опір паралельного контуру залежить від добротності контуру $Q = \frac{\rho}{R}$: чим вона вища, тим більший резонансний опір.
- ❖ При резонансі в паралельному контурі струм в кожній із його віток наближено в Q раз перевищує струм в нерозгалуженій частині кола.

В електронних схемах явище резонансу струмів використовується дуже часто. Практично в більшості випадків паралельний контур використовують як опір навантаження в вихідному колі підсилювального елемента вибіркового підсилювача. Сам підсилювальний елемент в цьому випадку може розглядатися як генератор, який має визначений внутрішній опір.

2.1.5 Напівпровідникові резистори

Напівпровідникові резистори являють собою широкий клас напівпровідникових приладів, принцип дії яких базується на властивостях напівпровідників змінювати свій опір під дією температури, електромагнітного випромінювання, прикладеної напруги та інших факторів.

До найбільш розповсюджених напівпровідникових резисторів відносяться: терморезистори, фоторезистори, варистори.

При вивченні цих приладів необхідно звернути увагу на дві найбільш суттєві особливості їх роботи:

- ❖ Залежність електричних характеристик і параметрів від дії неелектричних зовнішніх факторів (у терморезисторах і фото резисторах);
- ❖ Явну не лінійність вольт-амперних характеристики (особливо у терморезисторів і варисторів), яка дозволяє реалізувати за допомогою цих приладів досить своєрідні задачі.

Терморезистори

Терморезистори – прилади, опір яких суттєво змінюється при зміні температури.

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

В залежності від типу напівпровідникового матеріалу та габаритів чуттєвого елемента вихідний опір терморезисторів складає від декількох ом до десятків мегом.

Залежність $U_T = f(I)$ являє собою вольт-амперну характеристику терморезистора (рис.1.2.10) з трьома основними ділянками (ОА, АВ, ВС). На початковій ділянці ОА характеристика лінійна, так як при малих струмах потужність, яка виділяється в терморезисторі мала і практично не впливає на його температуру. На ділянці АВ лінійність характеристики порушується. Зі зростанням струму температура терморезистора підвищується, а його опір (внаслідок збільшення кількості електронів і дірок провідності в матеріалі напівпровідника) зменшується, при подальшому збільшенні струму на ділянці ВС зменшення опору стає настільки значним, що зростання струму призводить до зменшення напруги на терморезисторі. Наприкінці ділянки ВС вольт-амперна характеристика все більш наближується до горизонтальної лінії,

паралельної осі абсцис. Це і дозволяє використовувати деякі типи терморезисторів для стабілізації напруги.

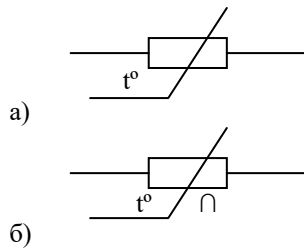


Рис.1.2.9. Умовні графічні зображення терморезисторів:
а) термістор, б) позистор

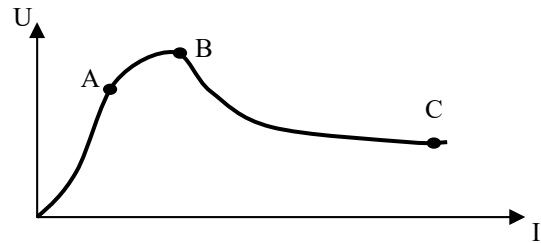


Рис.1.2.10. Вольт-амперна характеристика терморезистора

Крім вольт амперної характеристики, дуже важливою характеристикою терморезистора є залежність його опору від температури.

- ❖ Терморезистор, опір якого із збільшенням температури спадає, називається **термістором**.
- ❖ Терморезистор, опір якого із збільшенням температури зростає, називається **позистором**.

Типова температурна характеристика термістора показана на рис. .

Основні параметри терморезисторів:

номінальний (холодний) опір – опір робочого тіла терморезистора при температурі навколишнього середовища 20°C, Ом;

температурний коефіцієнт опору α_T , який відображає в відсотках зміну абсолютної величини опору робочого тіла терморезистора при зміні температури на 1°C. Зазвичай значення α_T для будь-якої температури в діапазоні 20-150 °C визначається із співвідношення

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2}, \quad (1.2.14)$$

де $B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}$ - коефіцієнт температурної чуттєвості, яка залежить від фізичних

властивостей матеріалу, К; T_1 – вихідна температура робочого тіла; T_2 – кінцева температура робочого тіла, для якого визначається значення α_T ; R_{T_1} і R_{T_2} - опори робочого тіла терморезистора при температурах відповідно T_1 і T_2 ;

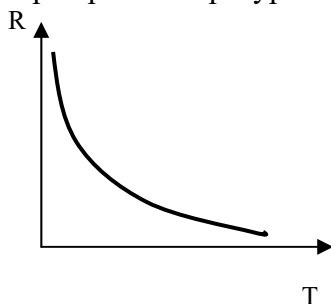


Рис. 1.2.11. Температурна характеристика термістора

найбільша потужність розсіювання – потужність, при якій терморезистор, що знаходиться при температурі 20 °C, розігрівається протікаючим струмом до максимальної робочої температури;

максимальна робоча температура – температура, при якій характеристики терморезистора залишаються стабільними тривалий час (на протязі вказаного строку служби);

постійна часу τ – відношення теплоємності С до коефіцієнта розсіювання b;

теплоємність С – кількість тепла, яке необхідно повідомити терморезистору, щоб підвищити температуру робочого тіла на 1 °C, Дж/°C;

коефіцієнт розсіювання – потужність, яка розсіюється терморезистором при різниці температур робочого тіла і навколишнього середовища в 1 °C, Вт/град.

- ❖ Термістори мають від'ємний температурний коефіцієнт, а позистори – додатний.

Фоторезистори

Фоторезистори – прилади, принцип дії яких базується на фоторезистивному ефекті – зміні опору напівпровідникового матеріалу під дією електромагнітного випромінювання.

Фоторезистори виготовляються на основі сульфїду кадмію, селенїду кадмію, сірчастого свинцю, а також полікристалічних шарів сірчастого та селенистого кадмію. Світло чуттєві елементи зазвичай поміщаються в пластмасовий або металевий корпус, а в окремих випадках, коли потрібні малі габарити, випускаються без корпусу. В коло вони вмикаються послідовно із джерелом напруги і опором навантаження.

Якщо резистор знаходиться в темноті, то через нього протікає *темновий струм*. При освітленні фото резистора, його опір спадає і через нього тече *світловий струм*. Різниця між світловим і темновим струмами – *фотострум провідності*.

Основними характеристиками фото резистора є:

вольт-амперна (характеризує залежність фотоструму при постійному світловому потокові або темного струму від прикладеної напруги), (рис.1.2.12,а);

світлова (характеризує залежність фотоструму від падаючого світлового потоку постійного спектрального складу), (рис.1.2.12,б);

спектральна (характеризує чуттєвість фото резистора при дії на нього потоку випромінювання постійної потужності визначеної довжини хвилі; визначається матеріалом, який використовується для виготовлення світлочутливого елемента; сірчато-кадмієві фоторезистори мають високу чуттєвість в видимій області спектру, селенисто-кадмієві – в червоній, а сірчато-свинцеві – в інфрачервоній), (рис.1.2.12, в);

частотна (характеризує чуттєвість фото резистора при дії на нього світлового потоку, який змінюється з визначеною частотою), (рис.1.2.12,г).

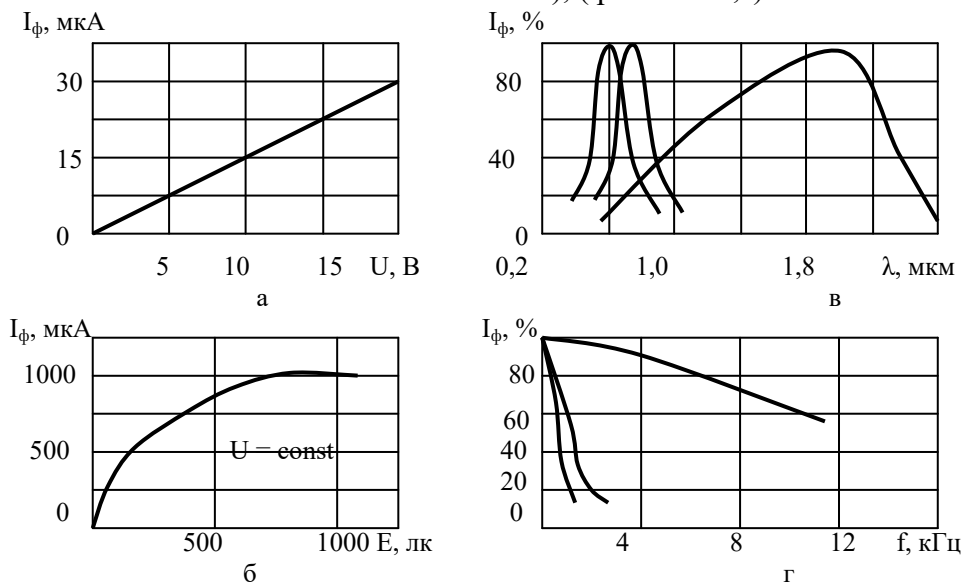


Рис. 1.2.12. Характеристики фото резисторів:

а) вольт-амперна; б) світлова (люкс амперна); в) спектральні; г) частотні

Основні параметри фоторезисторів: *Робоча напруга U_p , максимально допустима робоча напруга фото резистора U_{max} , темновий опір R_T , світловий опір R_C , кратність зміни опору K_R , допустима потужність розсіювання, загальний струм фото резистора, фотострум, питома чуттєвість, інтегральна чуттєвість, постійна часу.*

Варистори

Варистори – прилади, робота яких базується на ефекті зменшення опору напівпровідникового матеріалу при збільшенні прикладеної напруги.\

Так як вольт-амперна характеристика симетрична, варистор може бути використаний в колах і постійного, і змінного струму. Сучасні варистори використовуються в різноманітних електронних схемах: для захисту приладів і елементів схем від перенапруг; стабілізації напруги і струму; регулювання і перетворення електричних сигналів.

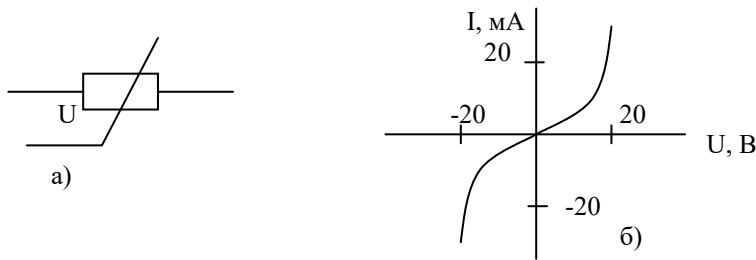


Рис.1.2.13. Умовне графічне зображення варистора (а), вольт-амперна характеристика (б)

Основні параметри варисторів:

статичний опір $R_{ст} = \frac{U}{I}$;

динамічний опір $R_{д} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$;

коефіцієнт нелінійності $\beta = \frac{R_{ст}}{R_{д}} = \frac{\Delta I U}{\Delta U I}$, (для сучасних варисторів величина β має значення

2...6 в залежності від типу і номінальної напруги варистора;

показник нелінійності $\alpha = \frac{1}{\beta}$;

в широкому діапазоні напруг і струмів вираз для вольт-амперної характеристики варистора може бути представлено у вигляді

$$I = BU^\beta \quad U = AI^\alpha$$

де А і В – постійні коефіцієнти, пов'язані між собою відношенням

$$B = A^{-\frac{1}{\alpha}} = A^{-\beta}$$

класифікаційна напруга, класифікаційний струм, температурний коефіцієнт струму, допустима потужність розсіювання.

Контрольні питання і вправи

1. Користуючись довідником, розшифруйте позначення і проведіть класифікацію вказаних приладів: СФ2-12, ФСК-П1, СН1-3, ТКП-450, СИ6-4Г, СФ3-8, ММТ-6, СТ3-23, СФ2-8, СТ5-1, Т8С2М, КМТ-4, СФ3-5, ТП6/2.
2. Визначіть, яку потужність буде розсіювати в середовище резистор з опором 1 Ом, під'єднаний до батареї автомобіля з напругою 1 В.
3. Візьмемо схему, яка працює від батареї з напругою 15 В. Доведіть, що незалежно від того, як буде ввімкнений в схему резистор, який має опір більше 1 кОм, потужність на ньому не перевищить ¼ Вт.
4. Струм 1 мА заряджає конденсатор ємністю 1 мкФ. Через який час напруга досягне 10 В?
5. Різниця потенціалів між обкладинками конденсатора ємністю 0,1 мкФ змінилася на 175 В. Визначіть зміну заряду конденсатора.
6. Поясніть фізичну суть температурного коефіцієнта опору терморезистора.
7. Визначіть коефіцієнт температурної чуттєвості терморезистора, якщо $T_1 = 290$ К, $T_2 = 310$ К, $R_{T1} = 1$ кОм, $R_{T2} = 200$ Ом.
8. Вкажіть основні особливості позистора.
9. Випишіть із довідника основні технічні параметри фото резисторів типу СФ2-1, СФ2-12, СФ3-8.
10. Розкажіть про застосування варисторів в електронних схемах.

2.2 Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковий діод – напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом і двома електричними виводами: анодом і катодом.

Служать НП діоди в основному для перетворення енергій і рідше – для підсилення електричних сигналів.

- ❖ Електрод, який під'єднаний до області з р-провідністю називають **анодом**, а електрод, який під'єднаний до області з n- провідністю називають **катодом**.
- ❖ Якщо додатній потенціал напруги прикласти до анода, а від'ємний - до катода, то таку напругу називають **прямою**, в протилежному випадку – **зворотною**.

Як перетворювачі енергій використовуються НП діоди: випрямні, імпульсні, стабілітрони, варикапи та інш.; як підсилювачі електричних сигналів за потужністю використовуються тунельні діоди.

В залежності від методу отримання електронно-діркового переходу НП діоди діляться на два типи: площинні та точкові.

У *точкових* діодів р-n перехід утворюється в місці контакту напівпровідникової пластини з вістря металеві голки (рис.2.2.1, а).

У *площинних* діодів р-n перехід утворюється на межі розділу двох шарів напівпровідника з електропровідністю різних типів (рис. 2.2.1, б)

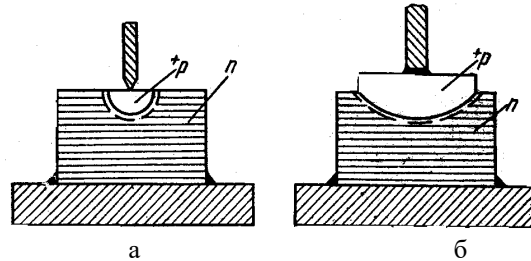


Рис. 2.2.1. Створення р-n переходу у НП діодів: а) точкових, б) площинних

За матеріалом виготовлення НП діоди бувають: кремнієві, германієві, селенові, з карбиду кремнію, арсеніду галію тощо.

2.2.1 Випрямні діоди

Випрямний діод – напівпровідниковий діод призначений для перетворення змінного струму в постійний.



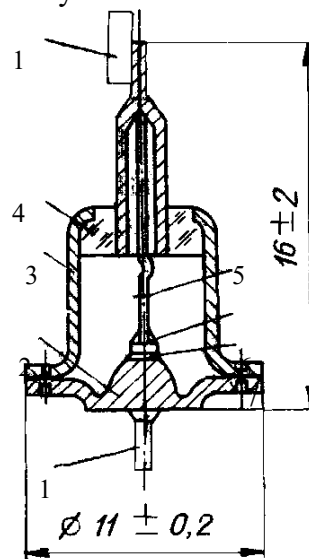
Рис. 2.2.2. Умовне позначення випрямного діоду

На умовному зображенні (рис. 2.2.2) напрям стрілки діода (так позначають анод) співпадає з напрямом струму. Зворотній струм для діодів загального призначення вимірюється в наноамперах і його, як правило, можна не брати до уваги до тих пір, поки напруга на діоді не досягне значення напруги пробією (цю напругу також називають піковою зворотною напругою).

Робота напівпровідникового випрямного діода базується на властивості р-n переходу пропускати струм лише в одному напрямі.

- 1- зовнішні виводи, 2 – кристалотримач,
- 3 – корпус,
- 4 – скляний ізолятор, 5- алюмінієвий дріт,
- 6 – кристал, 7 - припой

Рис.2.2.3. Будова сплавного малопотужного діода



Вольт-амперна характеристика (ВАХ) випрямного діода показує залежність струму, що протікає через діод, від значення і полярності прикладеної до нього напруги (рис. 2.2.4).

- ❖ Чим крутіша і ближча до вертикальної осі пряма вітка ВАХ і і ближче до горизонтальної осі зворотна вітка, тим кращі випрямні властивості діода.

Нормальна робота діода в якості елемента з односторонньою провідністю можлива лише в режимах, коли обернена напруга не перевищує пробивної. Найчастіше падіння напруги на діоді, обумовлене прямим струмом через нього, складає від 0,5 до 0,8 В. Таким падінням напруги можна знехтувати, і тоді діод можна розглядати як провідник, який пропускає струм лише в одному напрямі.

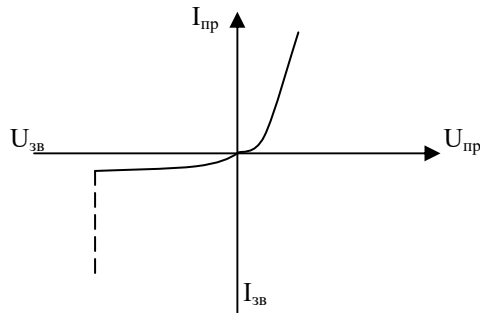


Рис. 2.2.4. ВАХ випрямного діода

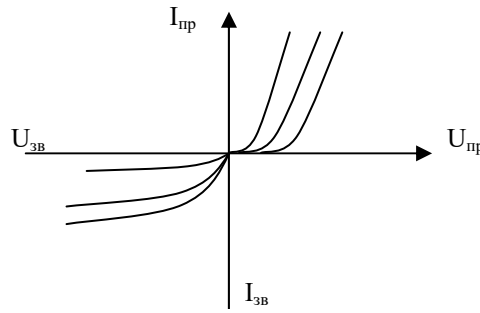


Рис. 2.2.5. Вплив температури на ВАХ випрямного діода:

- 1 - при підвищеній температурі
- 2 - при нормальній температурі
- 3 - при пониженій температурі

Слід відмітити два моменти:

- ❖ діод не підчиняється закону Ома;
- ❖ схему, яка містить діоди, не можна замінити еквівалентною.

Струми діодів залежать від температури (рис. 2.2.5). якщо через діод протікає прямий струм, то при зміні температури падіння напруги змінюється приблизно на 2 мВ/°С. При збільшенні температури зворотний струм збільшується у 2 рази у германієвих і в 2,5 – у кремнієвих на кожні 10°С.

В залежності від максимально допустимого середнього значення прямого струму випрямні діоди діляться на діоди малої (для випрямлення струмів до 300 мА), середньої (для випрямлення струмів від 300 мА до 10 А), великої (для випрямлення струмів від 10 А до 1000 А) потужності.

Промисловістю випускаються германієві і кремнієві діоди. Переваги кремнієвих діодів: малі зворотні струми, можливість використання при більш високих температурах навколишнього середовища і великих зворотних напругах; переваги германієвих діодів: мале падіння напруги при пропусканні прямого струму (0,3-0,6 В у германієвих порівняно з 0,8-1,2 В у кремнієвих).

Максимальна зворотна допустима напруга малопотужних випрямних діодів лежить в діапазоні від десятків вольт до 1200 В. На більш високі напруги промисловістю випускаються випрямні стовпи, які використовують послідовне з'єднання діодів (рис. 2.2.6).

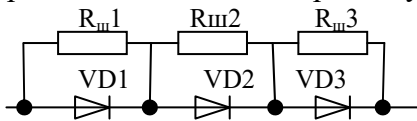


Рис. 2.2.6. Послідовне з'єднання НП діодів

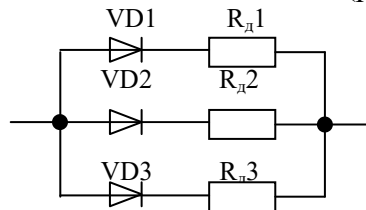


Рис. 2.2.7. Паралельне з'єднання випрямних діодів

При послідовному з'єднанні діоди шунтуються резисторами однакового опору для того, щоб зрівняти падіння зворотних напруг на діодах послідовного ланцюга. Опір шунтуючого резистора вибирається великим, щоб виключити великі втрати потужності на ньому.

Паралельне ввімкнення випрямних діодів (рис. 2.2.7) виконується для збільшення допустимих значень випрямленого струму. Оскільки із-за технологічних відхилень є значний розкид значень прямих опорів переходів, то, вставивши в кожен із паралельних гілок по одному додатковому резистору $R_{д}$, можна зрівноважити прямі струми в паралельних вітках.

До основних стандартизованих параметрів випрямних діодів відносять: середній прямий струм $I_{пр.ср}$, максимально допустимий середній прямий струм $I_{пр.ср. Макс}$, середній випрямлений струм $I_{вп.ср}$, максимально допустимий середній випрямлений струм $I_{вп.ср. Макс}$, постійна пряма

напруга $U_{пр}$, середня пряма напруга $U_{пр.ср}$, постійна зворотна напруга $U_{зв}$, максимально допустима постійна зворотна напруга $U_{зв.макс}$, максимально допустима імпульсна зворотна напруга $U_{зв.і.макс}$, постійний зворотний струм $I_{зв}$, середній зворотний струм $I_{зв.ср}$.

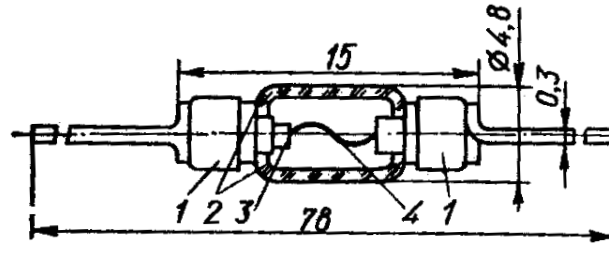
2.2.2. Високочастотні та імпульсні діоди

Високочастотні діоди – прилади універсального призначення: вони можуть бути використані для випрямлення, детектування та інших нелінійних перетворювань електричних сигналів в діапазоні частот до 600 МГц.



Рис. 2.2.8. Умовне графічне зображення високо- та імпульсного діодів

Високочастотні діоди виготовляються, як правило, із германію або кремнію і мають точкову структуру.



1 – виводи, 2 – скляний балон, 3 – кристал германію, 4 – електрод із вольфрамового дроту

Рис.2.2.9. Конструкція точкового високо- та імпульсного діода

Ємність р-п переходу $C > 1\text{пФ}$, що забезпечує їх високу ефективність на високих частотах.

Високочастотні діоди можуть використовуватись в схемах детектування, в якості обмежувачів, нелінійних опорів, комутаційних елементів і т.п.

До високо- та імпульсних діодів належать діоди Шоттки. На відміну від звичайних точкових діодів, у яких контакт здійснюється притиском металевої голки, у діодів Шоттки контакт являє собою тонку плівку металу (золото, нікель, алюміній, платина, вольфрам, молібден, ванадій та ін.). У таких діодів бар'єрна ємність не перевищує 0,01 пФ, робочий діапазон $f = 5...250$ ГГц, тривалість перемикання становить $\tau_{тр} \leq 1$ нс, зворотні струми не перевищують декількох міліампер, а зворотні напруги знаходяться в інтервалі 10...1000 В.

Імпульсні діоди призначені для роботи в швидкодіючих імпульсних схемах з часом перемикання 1 нс та менше.

Під дією вхідного імпульсу додатної полярності (рис. 2.2.10, а) через діод протікає прямий струм, величина якого визначається амплітудою імпульсу, опором навантаження і опором відкритого діода. Якщо на діод, через який протікає прямий струм, подати зворотну напругу так, щоб його закрити, то діод закривається не миттєво (рис.2.2.10, б).

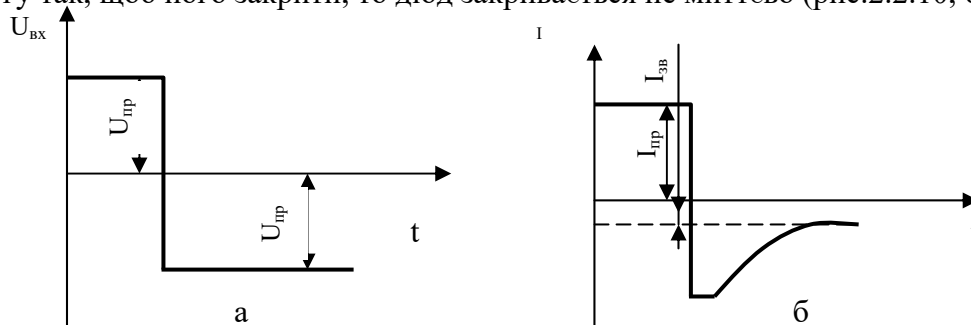


Рис. 2.2.10 . Осцилограми вхідної напруги (а) і струму (б) імпульсного діода

Основною характеристикою імпульсних діодів є *перехідна характеристика* (рис.2.2.10, б). Вона відображує процес відновлення зворотного струму і зворотної напруги діода при дії на нього імпульсної напруги зворотної полярності.

Основні параметри імпульсних діодів: час відновлення зворотної напруги τ_v , заряд перемикання $Q_{пм}$, загальна ємність C_d , імпульсна пряма напруга $U_{пр.і}$, імпульсний прямий струм $I_{пр.і}$.

2.2.3 Стабілітрони

Стабілітрони – площинні кремнієві діоди, які працюють на зворотній вітці вольт-амперної характеристики р-n переходу.

При ввімкненні їх в зворотному напрямку і при визначеній напрузі на переході останній „пробивається” і, не дивлячись на збільшення струму через р-n перехід, напруга не змінюється.

Стабілітрони призначені для стабілізації рівня напруги при зміні струму, що протікає через діод.



Рис. 2.2.11. Умовні графічні зображення стабілітронів: а) звичайного, б) двостороннього

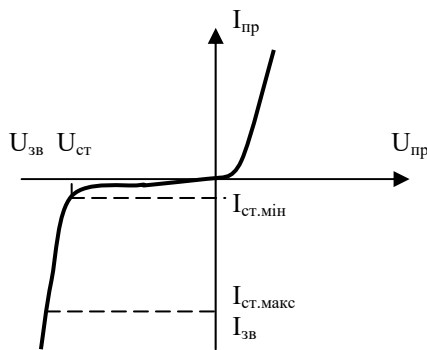
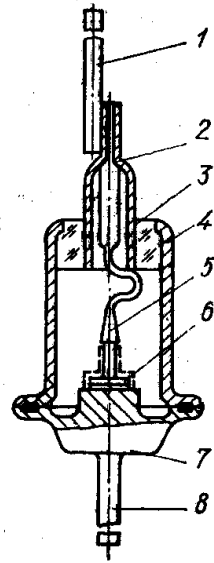


Рис. 2.2.12. Вольт-амперна характеристика стабілітрона



1, 8 – зовнішні виводи, 2 – трубка, 3 – ізолятор, 4 – корпус, 5 – внутрішній вивід, 6 – кристал з переходом, 7 – кристалотримач

Рис.2.2.13. Конструкція кремнієвого стабілітрона

В стабілітроні робочою є пробійна частина ВАХ в області зворотних напруг. Оскільки електричний пробій настає при порівняно низькій зворотній напрузі, потужність, що виділяється в р-n переході, навіть при значних зворотних струмах буде невеликою, що застерігає р-n перехід від теплового пробою.

Підвищення гранично допустимого зворотного струму стабілітрона призводить до виходу пристрою з ладу.

Основні параметри:

напруга стабілізації $U_{ст}$ – напруга на стабілітроні в області стабілізації при номінальному значенні струму;

можливий розкид напруги стабілізації від номінального значення $U_{ст.ном}$;

диференційний опір стабілітрона $r_{ст}$ – відношення приросту напруги стабілізації до приросту струму в заданому діапазоні частот

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} \quad ; \quad (2.2.1)$$

температурний коефіцієнт напруги стабілізації $\alpha_{ст}$

$$\alpha_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}} \cdot \frac{100}{\Delta T} (\%/^{\circ}C) \quad (2.2.2)$$

Для стабілітронів з напругою до 5 В - $\alpha_{ст} < 0$, вище - $\alpha_{ст} > 0$.

2.2.4 Варикапи

Варикапи – напівпровідникові діоди спеціальної конструкції, ємність яких можна змінювати в значних межах.



Рис. 2.2.14. Умовне графічне зображення варикапа

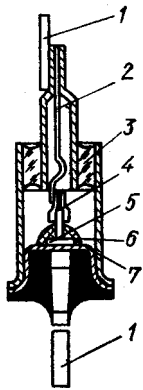
Із збільшенням зворотної напруги ємність р-п переходу зменшується за законом

$$C_d = C_0 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.2.3)$$

де C_d – ємність діода при зворотній напрузі U ;
 C_0 – ємність діода при нульовій зворотній напрузі;
 φ_k – контактний потенціал (десяти частини вольт);
 n – коефіцієнт, що залежить від типу варикапа, $n=2 \dots 3$.

❖ *Варикап, призначений для множення частоти сигналу – **варактор**.*

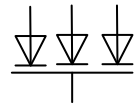
Варикапи використовують в пристроях автопідрегулювання частоти, генераторах і т.д.



1 – вивід, 2 – внутрішній вивід, 3- балон, 4 – алюмінієвий стовпчик, 5 – кристал кремнію, 6 – омичний контакт, 7 – позолочений кристалотримач

Рис.2.2.15. Конструкція варикапа

Як і конденсатори змінної ємності варикапи часто виготовляють у вигляді блоків (матриць) із спільним катодом і розділними анодами



Основна характеристика варикапа – залежність його ємності від величини зворотної напруги (рис. 2.2.16).

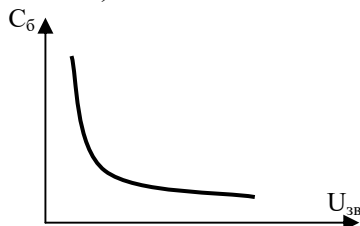


Рис. 2.2.16. Вольт-фарадна характеристика варикапа

коефіцієнт перекриття K_c

$$K_c = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \quad ; \quad (2.2.4)$$

добротність Q – відношення реактивного опору до повного опору втрат, виміряне на номінальній частоті при температурі 20°C;

температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ)

$$TKC = \frac{\Delta C}{\Delta T} \quad ; \quad (2.2.5)$$

максимальна допустима потужність.

2.2.5. Тунельні діоди

В 1857 році японський вчений Ясаки побачив, що при збільшенні концентрації домішок до $10^9 - 10^{20} \text{ см}^{-3}$, спостерігаються аномалії.

Принцип роботи тунельного діода базується на тунельному ефекті.

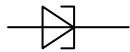


Рис. 2.2.17. Умовне графічне зображення тунельного діода

Вольт-амперна характеристика тунельного діода містить ділянку з від'ємним диференціальним опором

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (2.2.6)$$

що дозволяє використовувати діод в підсилювачах і генераторах електричних коливань, а також в різноманітних імпульсних пристроях.

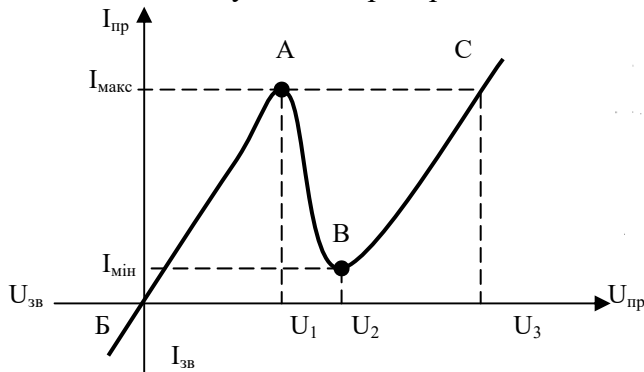
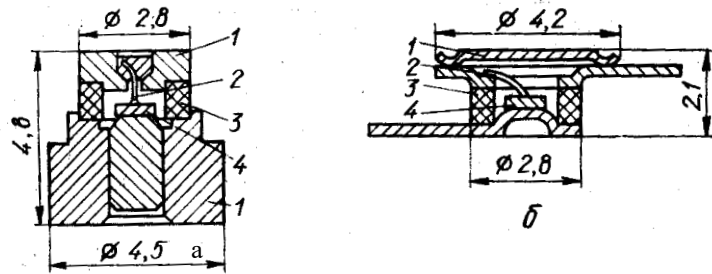


Рис. 2.2.18. Вольт-амперна характеристика тунельного діода



1—виводи, 2—контактний дриотик, 3—керамічна втулка, 4—кристал напівпровідника

Рис.2.2.19. Конструкція тунельних діодів

Якість діода визначають протяжність і крутизна падаючої ділянки АВ вольт-амперної характеристики (рис. 2.2.18).

Основні параметри: *піковий струм* $I_{\text{п}}$, *струм впадини* $I_{\text{вп}}$, *напруга піка* $U_{\text{п}}$, *напруга впадини* $U_{\text{в}}$, *напруга розтвору* $U_{\text{р}}$ (сумарна напруга на другій гілці, яка підіймається при $I_{\text{п}}$), *ємність діода* $C_{\text{д}}$ (сумарна ємність переходу і корпусу діода при заданій напрузі зміщення).

За призначенням тунельні діоди діляться на: підсилювальні, генераторні, перемикаючі.

2.2.6 Фотодіоди

Фотодіод – фотогальванічний приймач випромінювання без внутрішнього підсилення, фоточуттєвий елемент якого містить структуру напівпровідникового діода. Характеризуються малими масою та розмірами, великим строком служби, назькою напругою живлення, економічністю та високою чуттєвістю.

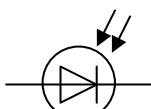
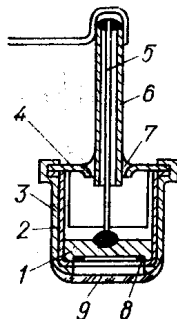


Рис. 2.2.20. Умовне графічне зображення фотодіода



1 – кристал германію з р-п переходом, 2 – кристалотримач, 3 – металевий корпус, 4 – кільце, 5 – вивід, 6 – металева трубка, 7 – скляний ізолятор, 8 – олов'яне кільце, 9 – скляне вікно

Рис.2.2.21. Конструкція фотодіода

Фотодіод виконаний так, що його р-п перехід однією стороною звернений до скляного вікна, через яке поступає світло, і захищений від дії світла з інших сторін.

Підключається фотодіод на зворотні напруги. Коли діод не освітлений, в колі проходить зворотний струм (темновий) невеликої величини (10-20 мкА для германієвих і 1-2 мкА для кремнієвих діодів).

При освітленні фотодіода з'являється додаткова кількість електронів і дірок, внаслідок чого збільшується перехід неосновних носіїв зарядів, що призводить до збільшення струму в колі.

- ❖ Фотодіод можна вмикати в схеми:
- ❖ з зовнішнім джерелом живлення (фотодіодний режим)
- ❖ без зовнішнього джерела живлення (вентильний режим)

Основні характеристики фотодіода (рис. 2.2.22).

Вольтамперна характеристика визначає залежність струму фотодіода від напруги на ньому при постійній величині світлового потоку (рис. 2.2.22, а): $I_d = f(U_d)$ при $\Phi = \text{const}$. Характерною особливістю робочої області вольт-амперних характеристик є практично повна незалежність струму фотодіода від прикладеної напруги. Такий режим настає при зворотніх напругах на діоді біля 1 В.

Світлова характеристика зображує залежність струму фотодіода від величини світлового потоку при постійній напрузі на фотодіоді: $I_d = f(\Phi)$ при $U_d = \text{const}$ (рис. 2.2.22, б).

Спектральна характеристика показує залежність спектральної чуттєвості від довжини хвилі падаючого на фотодіод світла.

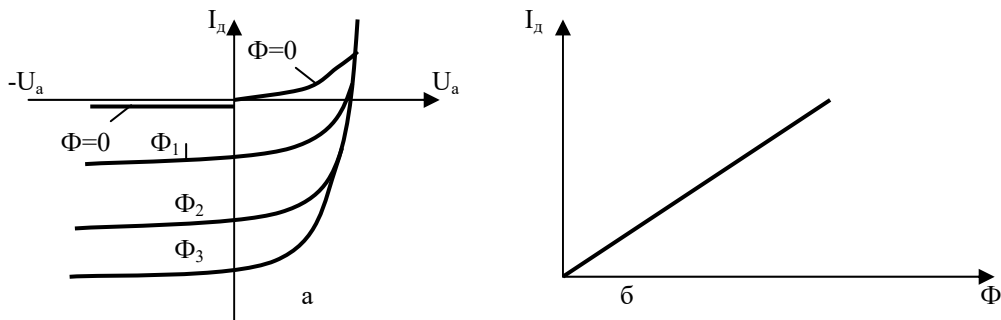
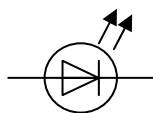


Рис. 2.2.22 . Характеристики фотодіода: а - вольтамперна, б - світлова

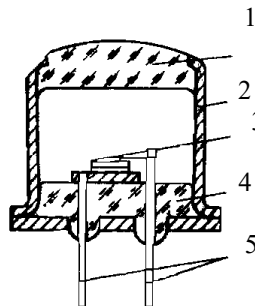
Параметри фотодіодів: *інтегральна чуттєвість $S_{\text{інт}}$, робоча напруга U_p , темновий струм I_T , довговічність.*

2.2.7 Світлодіоди

Світлодіод – випромінюючий напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом, призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії в енергію некогерентного світлового випромінювання.



2.2.23. Умовне графічне зображення світлодіода



1 – лінза, 2 – коваровий балон, 3 – напівпровідникова пластина з р-п переходом, 4 – ніжка, 5 - виводи

Рис. 2.2.24. Будова світлодіода

В залежності від ширини забороненої зони напівпровідника і особливостей рекомбінації носіїв заряду випромінювання може лежати в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах спектру. Найбільше розповсюдження отримали світлодіоди, які випромінюють жовте, червоне і зелене світло. Створені також зразки світлодіодів із світлом, що перебудовується.

Конструкція типового світлодіода, який використовується в якості джерела випромінювання, показана на рис. 2.2.24. Кристал напівпровідника з відповідними виводами поміщують в коваровий або керамічний балон, верхня частина якого закінчується скляною (або із епоксидної смоли) лінзою. За допомогою лінзи випромінювання набуває заданий напрямок.

Основні параметри: *яскравість свічення діода V ($\text{кд}/\text{м}^2$) при максимально допустимому прямому струмі $I_{\text{пр, max}}$, мА, постійна пряма напруга $U_{\text{пр}}$, повна потужність випромінювання*

$P_{\text{повн}}$ максимально допустима зворотна напруга $U_{\text{зв.мах}}$, ширина діаграми направленості світлового випромінювання.

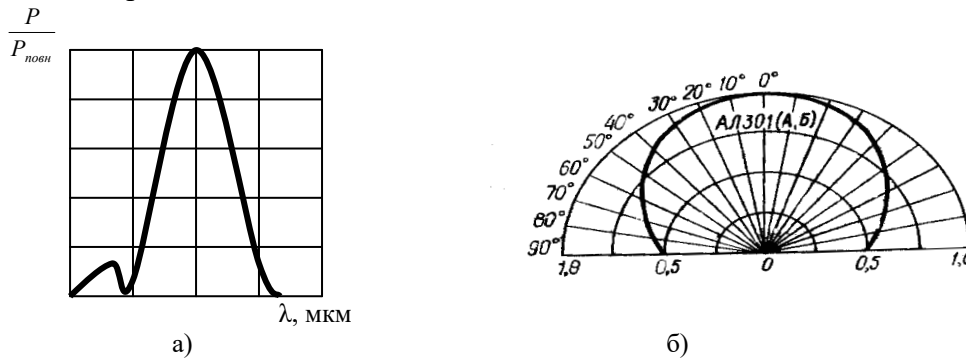


Рис. 2.2.25 Характеристики світлодіода: а) спектральна, б) направленості

Основні характеристики світлодіодів – *спектральна* (залежність відносної потужності випромінювання $\frac{P}{P_{\text{повн}}}$ від довжини хвилі, що випромінюється, при визначеній температурі середовища) і *характеристика направленості* (визначає величину інтенсивності світлового випромінювання в залежності від напрямку випромінювання).

2.2.8 Маркування діодів

❖ Для маркування діодів використовуються шість символів без будь-яких розділових знаків.

Перший елемент характеризує вихідний матеріал, з якого виготовлено прилад, позначається буквою:

К - кремній, або його з'єднання; **Г** – германій, або його з'єднання; **А** – з'єднання галію.

Для приладів, які використовуються в пристроях спеціального призначення, встановлені наступні позначення, де буквам відповідають цифри: К – 1, Г – 2, А – 3.

Другий елемент характеризує клас приладу, позначається буквою:

Д – діоди випрямні, універсальні, імпульсні;

Ц – випрямні стовпи і блоки;

А – діоди зверхвисокочастотні;

В – варикапи;

И – тунельні діоди;

Л – світлодіоди;

Г – генератори шуму,

Б – прилади з об'ємним ефектом,

К – стабілізатори струму,

С – стабілітрони і стабістори.

Третій елемент характеризує призначення приладу, позначається цифрою.

Четвертий і п'ятий елементи позначають порядковий номер розробки технологічного типу приладу, позначаються цифрами від 01 до 99.

Шостий елемент позначає ділення технологічного типу на параметричні групи, позначається буквою від А до Я.

Для стабілітронів маркування, починаючи з третього елементу, відрізняється:

Третій елемент визначає індекс потужності (цифра); *четвертий і п'ятий* – кодоване позначення мінімальної напруги стабілізації (цифри), *шостий* – послідовність розробки (буква).

Контрольні питання і вправи

1. Користуючись довідником, розшифруйте позначення таких типів напівпровідникових діодів:

1А401Б, КЛ104А, 2С447А, 2Д910В, АЛ102Г, 1И403А, 2В104Г, ГА501Ж, ГД507А, АИ201И, КЦ403Г, ФД-1.

2. Назвіть схеми ввімкнення випрямних діодів.
3. Чи можуть кремнієві стабілітрони працювати в режимі теплового пробою?
4. Якими параметрами характеризуються стабілітрони?
5. Поясніть фізичну суть основних параметрів кремнієвих стабілітронів.
6. Які вимоги ставляться до високочастотних діодів?
7. Якими параметрами характеризуються імпульсні діоди?
8. Яка основна характеристика варикапа?
9. В яких електронних схемах використовуються тунельні діоди?
10. Чи можна використовувати властивості тунельного діода, якщо до нього підведена пряма напруга?
11. Вкажіть можливості практичного застосування світлодіодів.
12. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідновибрати діод, умови роботи якого: прямий струм $I_{пр} = 10 \text{ А}$; напруга, що прикладається до діода $U_{зв} = 160 \text{ В}$.
13. Складіть перелік ключових слів до теми „Напівпровідникові діоди”.

2.3 ТРАНЗИСТОРИ. ТИРИСТОРИ

2.3.1 Класифікація транзисторів

Транзистор – електроперетворюючий напівпровідниковий прилад з одним або декількома електронними переходами, трьома або більше виводами, придатний для підсилення потужності.

Електронна промисловість випускає широкий асортимент транзисторів, застосування яких дозволяє створити економічну з живленням, малогабаритну і надійну апаратуру.

Найбільш розповсюджені транзистори мають два р-п переходи. В них використовуються носії зарядів обох полярностей. Такі транзистори називають *біполярними*. Особливу групу складають *польові*, або каналні, транзистори, які часто називають уніполярними, а також *одноперехідні* транзистори (двобазові діоди).

Специфічні функції в сучасній електронній апаратурі виконує фото транзистор, який поряд з перетворенням світлового сигналу в електричний здатен підсилити останній за потужністю.

Класифікують транзистори за вихідним матеріалом, потужності розсіювання, діапазону робочих частот, принципу дії і т.п. в залежності від вихідного матеріалу їх ділять на дві групи: германієві і кремнієві. Германієві транзистори працюють в інтервалі температур від -60 до +78...85°C, кремнієві – від -60 до +120...150°C. за діапазоном робочих частот їх ділять на транзистори низьких, середніх і високих частот, за потужністю – на класи транзисторів малої, середньої і великої потужності. Транзистори малої потужності ділять на шість груп: підсилювачі низьких і високих частот, мало шумні підсилювачі, перемикачі насичені, ненасичені і малострумові; транзистори великої потужності – на три групи: підсилювачі, генератори, перемикачі. За технологічною ознакою розрізняють транзистори сплавні, сплавно-дифузні, дифузно-сплавні, планарні, епітаксильні, конверсійні, епітаксильно-планарні.

Маркування транзисторів

1 елемент – вихідний матеріал:

Г – германій або його з'єднання;

К – кремній або його з'єднання;

А – з'єднання галію.

2 елемент – підклас приладу:

Т – біполярний;

П – польовий.

3 елемент – призначення приладу.

4-5 елементи – порядковий номер розробки.

6 елемент – ділення технологічного типу на параметричні групи (від А до Я).

Приклад: 2П303А – польовий транзистор, призначений для пристроїв спеціального застосування, кремнієвий, малої потужності, високочастотний, номер розробки 03, група А.

2.3.2 Будова та принцип роботи біполярних транзисторів

Біполярний транзистор – електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, що має чотиришарову структуру, два р-п переходи, три виводи та призначений для підсилення потужності.

- ❖ Транзистор називається біполярним, тому що в його роботі використовуються носії обох полярностей (електрони і дірки).
- ❖ Виводи транзистора названо у відповідності до напівпровідникових шарів: емітер, база, колектор.

Біполярний транзистор має два р-п переходи: один з них з'єднує базу з емітером (емітерний перехід), другий – базу з колектором (колекторний перехід).

- ❖ Про електропровідність бази судять за символом емітера: якщо стрілка направлено до бази, то емітер має провідність типу р, а база – n тип (транзистор р-п-р), і навпаки.

Роботу біполярного транзистора розглянемо на основі транзистора типу р-п-р.

Концентрація носіїв в базі значно менша ніж в емітері. Це призводить до того, що число дірок, інжектованих із емітера в базу, у багато раз перевищує кількість електронів, які рухаються в протилежному напрямку.

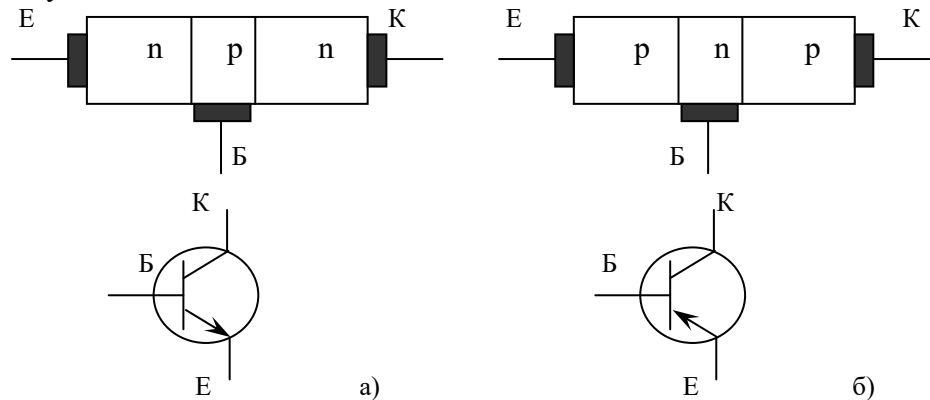


Рис. 2.3.1. Тришарові структури та умовні графічні зображення біполярних транзисторів:
а) п-р-п типу; б) р-п-р типу

Ефективність емітера оцінюється коефіцієнтом інжекції γ

$$I_E = I_{Ep} + I_{En} \quad (2.3.1)$$

Для транзистора типу р-п-р

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_{En}} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} = 1 + \frac{I_{Ep}}{I_{En}} \quad (2.3.2)$$

Дірки із емітерної області через емітерний перехід попадають в базу Б, ширина бази незначна, тому частина дірок рекомбінують з електронами бази, а основна маса переходить через колекторний перехід. Підходячи до колектора, дірки починають відчувати дію електричного поля колекторного переходу. Це поле для дірок є прискорюючим, тому вони швидко втягуються із бази в колектор і беруть участь у створенні *струму колектора* I_K ($I_K < I_E$). Ті дірки, які рекомбінують в області бази з електронами, беруть участь у створенні *струму бази* I_B

$$I_B = I_E - I_K \quad (2.3.3)$$

$$(2.3.4)$$

$$I_E = I_B + I_K$$

- ❖ Хоч електрони і дірки рухаються в різних напрямках, струми в колах транзистора проходять в одному напрямі, який співпадає з напрямком руху дірок.

В залежності від полярності напруг, прикладених до емітерного і колекторного переходів транзистора, розрізняють чотири режими його роботи:

1) **активний** режим (на емітерний перехід подана пряма напруга, а на колекторний – зворотна, це основний режим роботи транзистора; так як $U_K \gg U_T$, то струми в колах емітера і колектора майже рівні);

- 2) режим **відсічки** (до обох переходів відводять зворотну напругу, тому через них проходить лише зворотний струм – практично транзистор в режимі відсічки є закритим);
- 3) режим **насищення** (до обох переходів підводять пряму напругу, струм через них буде максимальним і транзистор буде повністю відкритим);
- 4) **інверсний** режим (до емітерного переходу підводиться зворотна напруга, а до колекторного – пряма; цей режим не відповідає нормальним умовам експлуатації транзистора).

Основні експлуатаційні параметри транзистора

Максимально допустима потужність $P_{K,max}$, яка розсіюється колектором, - це потужність струму колектора, яка перетворюється в тепло і безкорисно витрачається на нагрівання транзистора. При недостатньому тепло відведенні розігрів колекторного переходу може призвести до різкого збільшення струму I_K . Це в свою чергу призводить до зростання потужності, яка розсіюється на колекторі, і ще до більшого нагрівання колекторного переходу. Процес набуває лавиноподібного характеру, і транзистор безповоротно виходить з ладу.

Максимально допустимий струм колектора $I_{K,max}$ обмежується максимально допустимою потужністю, яка розсіюється колектором. Перевищення граничного значення струму колектора призводить до теплового пробоя колекторного переходу і виходу транзистора з ладу.

Максимально допустима напруга між колектором і загальним електродом транзистора ($U_{KE,max}$ або $U_{KB,max}$). Ця напруга визначається величиною пробивної напруги переходу. Крім того, вона залежить від потужності, струму колектора і температури навколишнього середовища.

Гранична частота підсилення за струмом (f_α або f_β) – частота, при якій коефіцієнт підсилення за струмом α чи β зменшується до 0,7 свого значення на низьких частотах.

2.3.3 Схеми ввімкнення транзистора

Існує чотири схеми ввімкнення транзистора: із спільною базою (рис. 2.3.2), із спільним емітером (рис. 2.3.3), із спільним колектором (рис.2.3.4).

Схема зі спільною базою

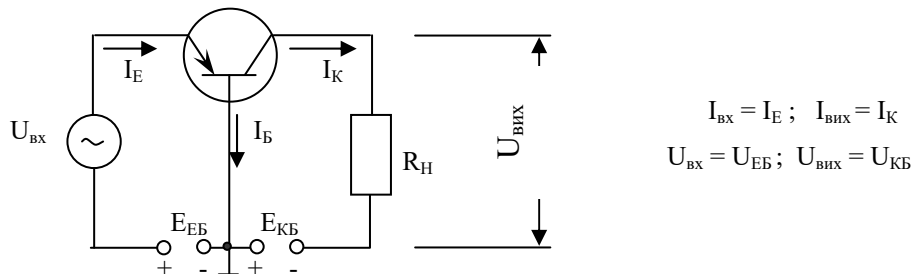


Рис. 2.3.2. Схема ввімкнення транзистора зі спільною базою

$$I_E + \Delta I_E = I_K + \Delta I_K + I_B + \Delta I_B \quad (2.3.5)$$

Диференційний коефіцієнт прямої передачі струму

$$\alpha = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \quad (2.3.6)$$

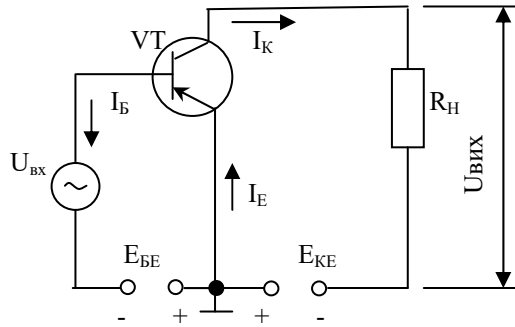
Вхідний опір

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta U_{EB}}{\Delta I_E} \approx r_E \quad (2.3.7)$$

Відмінна особливість схеми зі спільною базою:

- ❖ малий вхідний опір
- ❖ великий вихідний опір (найбільший із всіх схем ввімкнення)
- ❖ відсутність посилення за струмом

Схема зі спільним емітером



$$I_{вх} = I_B; \quad I_{вих} = I_K;$$

$$U_{вх} = U_{BE}; \quad U_{вих} = U_{KE}$$

Рис. 2.3.3. Схема ввімкнення транзистора із спільним емітером

Диференційний коефіцієнт прямої передачі струму

$$\beta = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \tag{2.3.8}$$

Так як $\Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_K$,

то

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E - \Delta I_K} = \frac{1}{\frac{\Delta I_E}{\Delta I_K} - 1}$$

Виходячи із формули 2.3.6

$$\frac{\Delta I_E}{\Delta I_K} = \frac{1}{\alpha},$$

отримаємо

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

$$\tag{2.3.9}$$

Відмінна особливість схеми зі спільним емітером:

- ❖ *В схемі із спільним емітером можна отримати коефіцієнт прямої передачі струму декілька десятків*
- ❖ *Вхідний опір набагато більший ніж в схемі із спільною базою*
- ❖ *Дана схема може живитися від одного джерела напруги*
- ❖ *Температурна стабільність гірша ніж у схемі із спільною базою*
- ❖ *Схема із спільним емітером є найбільш поширеною, тому що має найбільше підсилення за потужністю*

Схема зі спільним колектором

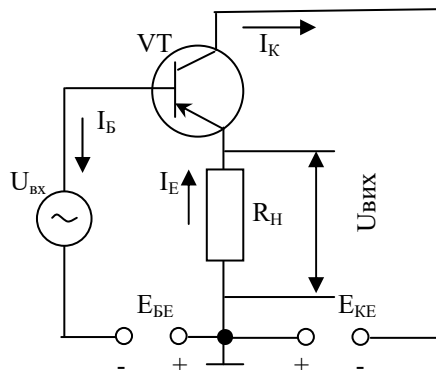


Рис. 2.3.4. Схема ввімкнення з спільним колектором

$$I_{вх} = I_B; \quad I_{вих} = I_E;$$

$$U_{вх} = U_{BK}; \quad U_{вих} = U_{KE}$$

$$\gamma = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B}$$

Проведемо перетворення

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_K$$

$$\gamma = \frac{\Delta I_B + \Delta I_K}{\Delta I_B} = 1 + \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = 1 + \beta$$

$$\gamma = 1 + \beta = \frac{1}{1 - \alpha}$$

$$\tag{2.3.10}$$

2.3.4 Еквівалентна схема заміщення, h – параметри транзистора

Для аналізу транзисторів і транзисторних схем в різних умовах їх експлуатації користуються еквівалентною Т-подібною схемою, яка заміняє транзистор.

При побудові еквівалентної схеми транзистора виходять із того, що емітерний і колекторний переходи, як і шар бази, мають визначені опори r_E , r_K , r_B . Тому найпростішою еквівалентною схемою транзистора повинно бути коло, яке складається із опорів r_E , r_K , r_B , з'єднаних між собою.

Схема із спільною базою

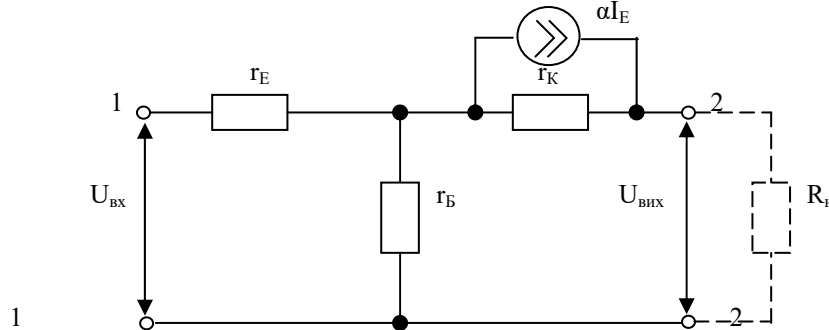


Рис. 2.3.5. Еквівалентна Т-подібна схема транзистора для схеми зі спільною базою

Для даної схеми $I_K \approx \alpha I_E$, так як паралельно r_K в еквівалентній схемі ввімкнено додатковий генератор, який виробляє струм αI_E .

Вхідна напруга визначається за формулою

$$U_{\text{вх}} = I_E r_E + I_B r_B = I_E r_E + I_E (1 - \alpha) r_B = I_E (r_E + (1 - \alpha) r_B) \quad (2.3.11)$$

Виходячи з формули 2.3.11, отримаємо значення для вхідного опору

$$R_{\text{вхБ}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_E} = r_E + (1 - \alpha) r_B \quad (2.3.12)$$

Так як r_E і r_B - невеликі, то $R_{\text{вхБ}}$ становить одиниці (десятки) Ом.

Схема із спільним емітером

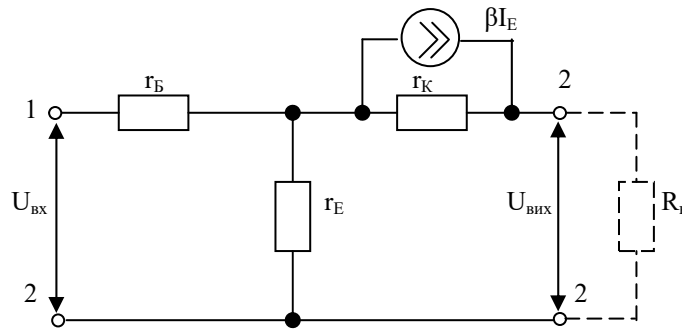


Рис. 2.3.6. Еквівалентна Т-подібна схема транзистора для схеми зі спільним емітером

В даній схемі для відображення реального підсилювального режиму роботи транзистора в вихідне коло ввімкнений додатковий генератор струму βI_B . Виходячи із вищевикладеного, отримаємо

$$U_{\text{вх}} = I_E r_E + I_B r_B$$

Тоді

$$R_{\text{вхЕ}} = \frac{I_E r_E + I_B r_B}{I_B} = (\beta + 1) r_E + r_B \quad (2.3.13)$$

Зрозуміло, що

$$R_{\text{вхЕ}} \gg R_{\text{вхБ}}$$

Схема із спільним колектором

В еквівалентній схемі на рис. 2.3.5, яка відображає властивості каскаду зі спільним колектором,

$$U_{\text{вх}} = I_B r_B + I_E (r_E + R_H),$$

$$R_{\text{вхК}} = \frac{I_B r_B + I_E (r_E + R_H)}{I_B} = r_B + (\beta + 1)(r_E + R_H) \quad (2.3.14)$$

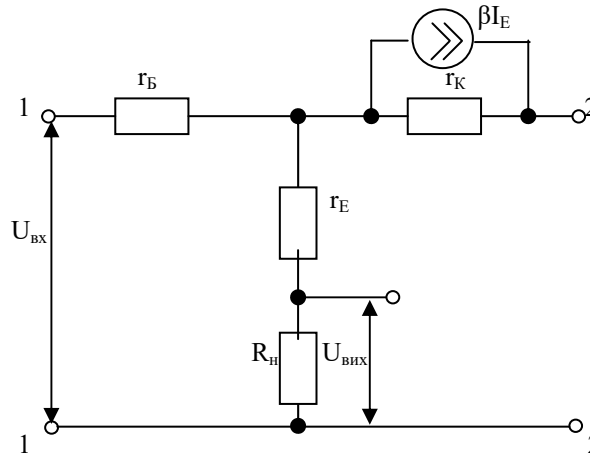


Рис. 2.3.5. Еквівалентна Т-подібна схема транзистора для схеми зі спільним колектором

Для визначення h - параметрів транзистора представимо активний чотириполюсник, всередині якого знаходиться схема із спільною базою.

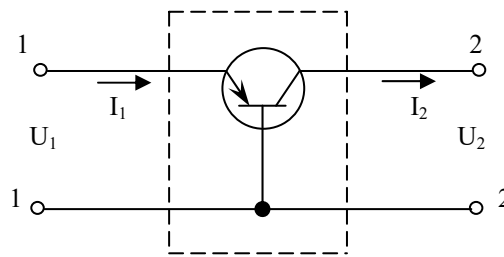


Рис. 2.3.6. Схема для визначення h - параметрів транзистора

U_1, U_2, I_1, I_2 – всі ці величини взаємопов'язані. За двома заданими з них можна визначити дві інші за статичними характеристиками (суть статичних характеристик буде розглянуто в наступному параграфі).

Нехай I_1 і U_2 - задані, то

$$\begin{cases} U_1 = f_1 (I_1, U_2) \\ I_2 = f_2 (I_1, U_2) \end{cases} \quad (2.3.15)$$

Продиференціювавши дану систему рівнянь, отримаємо

$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2$$

Позначимо

$$h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \quad h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2}$$

$$h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \quad h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2}$$

і проінтегруємо систему. Тоді вона прийме вигляд

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2 \\ I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2 \end{cases}$$

де $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ - h -параметри транзистора.

Кожен h -параметр транзистора має свою фізичну суть:

$$h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1}, \text{ при } U_2 = 0 \quad - \text{ величина вхідного опору}$$

$$h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2}, \text{ при } I_1 = 0 \quad - \text{ коефіцієнт зворотнього зв'язку (характеризує степiнь впливу вихідної напруги на вхідну)}$$

$$h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2}, \text{ при } U_1 = 0 \quad - \text{ коефіцієнт підсилення за струмом}$$

$$h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1}, \text{ при } U_1 = 0 \quad - \text{ вихідна провідність}$$

Статичні характеристики транзистора та визначення за ними h - параметрів

Статичні характеристики транзистора відображають співвідношення між струмами і напругами його виводів в статичному і квазістатичному (коли напруга мало змінюється) режимах.

У біполярного транзистора за незалежну змінну приймають струм, як параметр, який легко піддається регулюванню і вимірюванню.

Вольт-амперні характеристики містять інформацію про властивості транзистора у всіх режимах роботи при великих і малих сигналах, в тому числі і про зв'язки між параметрами. За вольт-амперними характеристиками можна визначити ряд параметрів, які не наводяться в довідниковій літературі, а також розрахувати кола зміщення, стабілізації режиму, оцінити роботу транзистора в широкому діапазоні імпульсних та постійних струмів, потужностей та напруг.

Найбільше розповсюдження отримали *вхідні* та *вихідні* статичні вольт-амперні характеристики для двох основних схем ввімкнення – з спільною базою та спільним емітером. *Вхідні характеристики* встановлюють залежність вхідного струму (струм бази або емітера) від напруги між базою і емітером при визначеній напрузі на колекторі. Вхідні характеристики транзистора (рис. 2.3.7) аналогічні характеристикам діода в прямому напрямі з експоненціальним зростанням струму при збільшенні напруги. При $U_K > 0$ вхідні характеристики мало залежать від напруги на колекторі. Для схеми з спільною базою вхідна характеристика являє собою залежність струму емітера від напруги між емітером і базою при постійній величині напруги між колектором і базою

$$I_E = f(U_{EB}) \text{ при } U_{KB} = \text{const} \quad (2.3.16)$$

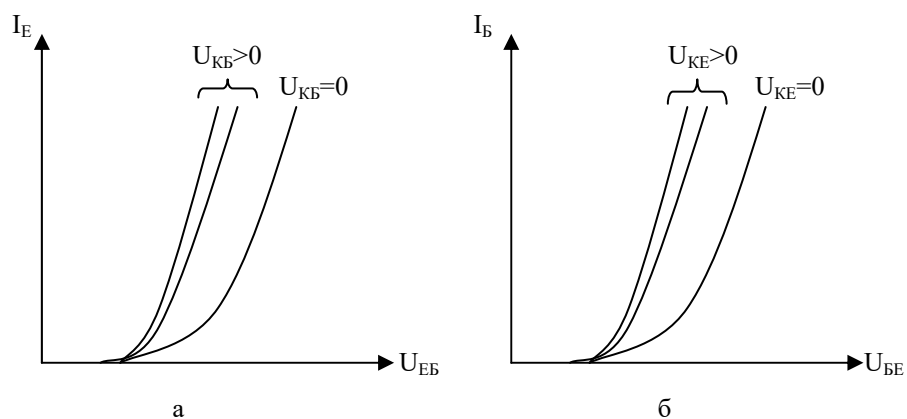


Рис. 2.3.7. Вхідні характеристики транзистора при ввімкненні: а) з СБ; б) з СЕ

Вихідні характеристики встановлюють залежність струму колектора від напруги на ньому при визначеному струмі бази або емітера (рис. 2.3.8) (в залежності від способу ввімкнення транзистора). Для схеми з спільною базою вони відображають

$$I_K = f(U_{KB}) \text{ при } I_E = \text{const} \quad (2.3.17)$$

Статичні характеристики транзистора будують за точками або отримують за допомогою спеціальних характериографів, які дозволяють уникнути сильного нагріву транзисторів. На даний час існує можливість досліджувати транзистор за допомогою комп'ютерів.

Визначення h – параметрів транзисторів відбувається за допомогою побудови характеристичних трикутників.

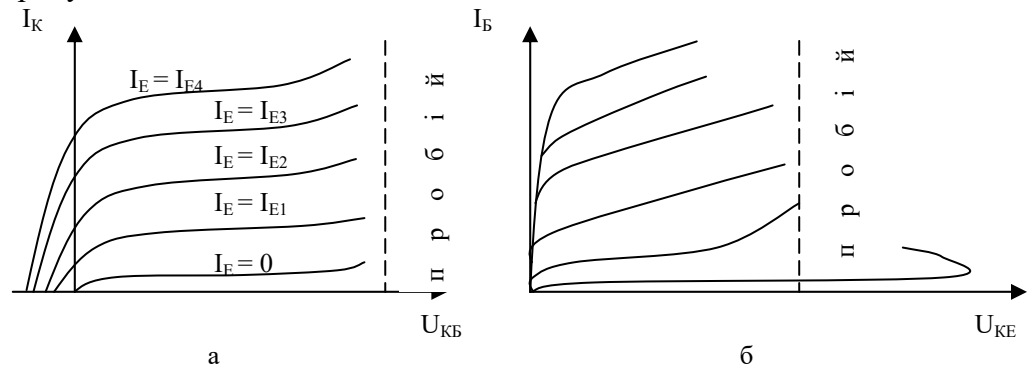


Рис. 2.3.8. Вихідні характеристики транзистора при ввімкненні: а) зі СБ; б) з СЕ

Розглянемо на прикладі транзистора, ввімкненого за схемою зі спільною базою. На вхідних характеристиках (рис. 2.3.9, а) будують характеристичний трикутник abc , із якого знаходимо

$$h_{11B} = \frac{\Delta U_{EB}}{\Delta I_E} \quad \text{при} \quad U_{KB} = 0$$

де $\Delta U_{EB} = bc \approx 0,06 \text{ В}$; $\Delta I_E = ab \approx 15 \text{ мА}$.

Отже,

$$h_{11B} \approx \frac{6 \cdot 10^{-2}}{15 \cdot 10^{-3}} \approx 4 \text{ Ом.}$$

Із цього ж трикутника визначаємо

$$h_{12B} = \frac{\Delta U_{EB}}{\Delta U_{KB}} \quad \text{при} \quad \Delta I_E = 0$$

де $\Delta U_{EB} = bc \approx 0,06 \text{ В}$; $\Delta U_{KB} = 5 - 0 = 5 \text{ В}$.

Отже,

$$h_{12B} \approx \frac{0,06}{5} \approx 0,012.$$

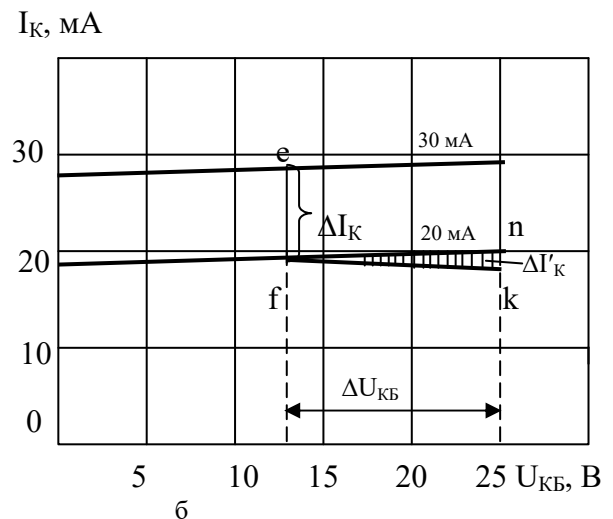
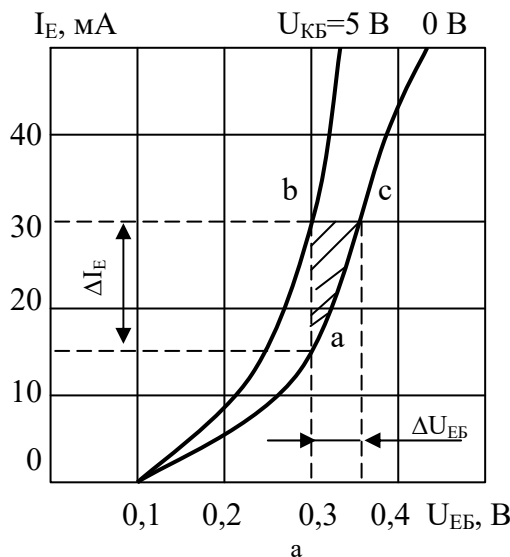


Рис. 2.3.9. Визначення h_B – параметрів транзистора за вхідними (а) та вихідними (б) характеристиками

Параметри h_{21B} і h_{22B} визначають за вихідними характеристиками (рис. 2.3.9, б). Побудувавши характеристичний трикутник fnk , знайдемо

$$h_{21B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \quad \text{при} \quad U_{KB} = 0;$$

$\Delta I_K = ef \approx 29 - 19,5 = 9,5 \text{ мА}$; $\Delta I_E = 30 - 20 = 10 \text{ мА}$;

$$h_{21Б} = \frac{9,5}{10} = 0,95;$$

$$h_{22Б} = \frac{\Delta I'_K}{\Delta U_{КБ}} \text{ при } \Delta I_E = 0;$$

$$\Delta I'_K = nk = 1 \text{ мА}; \quad \Delta U_{КБ} \approx fk \approx 12,5 \text{ В};$$

$$h_{22Б} = \frac{10^{-3}}{12,5} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ См.}$$

2.3.5 Температурні і частотні властивості транзистора

Діапазон робочих температур транзисторів, який визначається властивостями р-п переходів, такий самий, як і у напівпровідникових діодів. Особливо сильно на роботу транзисторів впливає нагрівання і менш суттєво – охолодження (до -60°C). Дослідження показують, що при нагріванні від 20 до 60°C параметри площинних транзисторів змінюються наступним чином: r_K падає приблизно у два рази, r_B – на 15-20 %, а r_E зростає на 15-20 %. Уяву про вплив нагріву на h – параметри дають графіки (рис. 2.3.10, а), побудовані для малопотужного площинного транзистора, ввімкненого за схемою зі спільною базою. Крім зміни значення основних параметрів транзистора, нагрівання викликає зміщення вихідних характеристик і зміну їх нахилу (рис. 2.3.10, б), що також порушує нормальну роботу приладу.

Найбільш часто для роботи при підвищених температурах застосовують кремнієві транзистори. Гранична робоча температура у цих приладів складає 125 „, 150°C . З цією ж метою використовується і ряд нових напівпровідникових матеріалів, із яких найбільший інтерес являє карбід кремнію. Прилади, виготовлені на карбіді кремнію, можуть працювати до температур 500 „, 600°C .

На частотні властивості транзисторів дуже впливають ємності р-п переходів. Із збільшенням частоти ємнісний опір зменшується і шунтуюча дія ємностей зростає. Тому Е-подібна еквівалентна схема транзистора на високих частотах, крім чисто активних опорів r_E , r_B і r_K , містить ємності C_E і C_K , які шунтують емітерний і колекторний переходи.

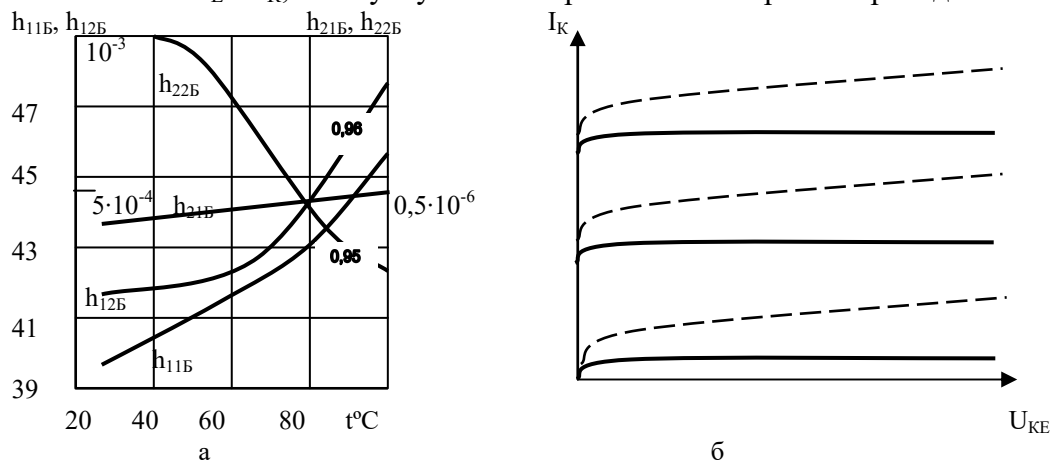


Рис. 2.3.10. Вплив температури на h - параметри малопотужного площинного транзистора (а) і форму його вихідних характеристик (б)

Другою причиною погіршення роботи транзистора на високих частотах є відставання по фазі змінного струму колектора від змінного струму емітера. Це обумовлено інерційністю процесу проходження носіїв заряду через базу від емітерного переходу до колекторного, а також процесів накопичення і розсмоктування зарядів в базі.

Оцінюючи частотні властивості транзистора, слід враховувати, що дифузія – процес хаотичний. Неосновні носії зарядів, інжектвані емітером в базу, пересуваються в ній різними шляхами. Тому носії, які одночасно ввійшли в область бази, досягають колекторного переходу в різний час. Таким чином, закон зміни струму колектора може не відповідати закону зміни струму емітера, що призводить до спотворення сигналу, що підсилюється.

Слід відмітити, що із збільшенням частоти коефіцієнт β зменшується значно сильніше ніж α .

2.3.6 Транзистор у режимі ключа

Найважливішими елементами сучасних схем автоматики і електронних обчислювальних машин є пристрої релейного типу. Їх головна особливість в тому, що під дією вхідного сигналу режим роботи таких пристроїв різко (скачкоподібно) змінюється. Це дозволяє здійснювати перемикання, або комутацію, різних електричних кіл схеми.

Перемикаючі пристрої релейного типу мають два стійкі положення, які можуть розглядатись як положення „ввімкнено” і „вимкнено”.

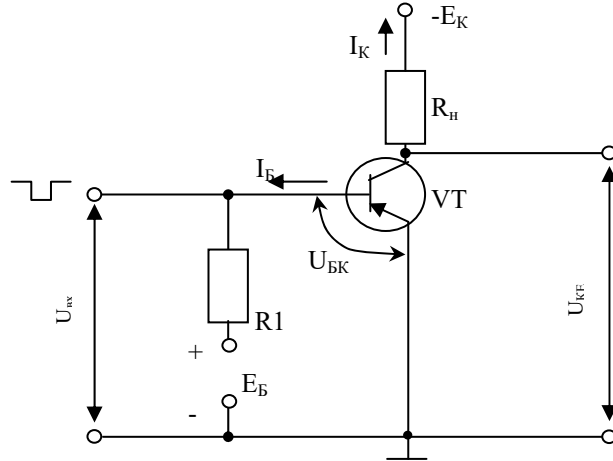


Рис. 2.3.11. Ключова схема транзистора

Транзистор є одним із найбільш розповсюджених елементів безконтактних перемикаючих пристроїв. Режим роботи транзистора в перемикаючому пристрої зазвичай називають *ключовим*. Цей режим характерний тим, що транзистор в процесі роботи періодично переходить із відкритого стану (режим насичення) в закритий (режим відсічки) і навпаки, що відповідає двом стійким станам перемикаючого пристрою.

На рис. 2.3.11 показана найпростіша схема ключа на транзисторі рnp, ввімкненого за схемою зі спільним емітером.

Закривання транзистора (режим відсічки) спостерігається в тому випадку, коли обидва р-п переходи (емітерний і колекторний) закриті. Для цього достатньо, щоб зворотні напруги на цих переходах були наближені до нуля (біля 0,05,,0,1 В). Із схеми (рис. 2.3.11) видно, що для закриття транзисторів типу рnp потрібно подати на його вхід таку напругу, щоб потенціал бази був вищим потенціалу емітера, тобто, щоб напруга U_{BE} між базою і емітером задовольняла нерівність $U_{BE} > 0$ (для транзисторів типу рnp ця нерівність буде зворотною).

Напруга U_{KE3} на колекторі закритого транзистора дорівнює

$$U_{KE3} = E_K - I_{KBВ} R_n$$

де $I_{KBВ}$ – зворотний струм колектора. Зазвичай $I_{KBВ} \cdot R_n \ll E_K$. Тому можна прийняти $U_{KE3} \approx E_K$.

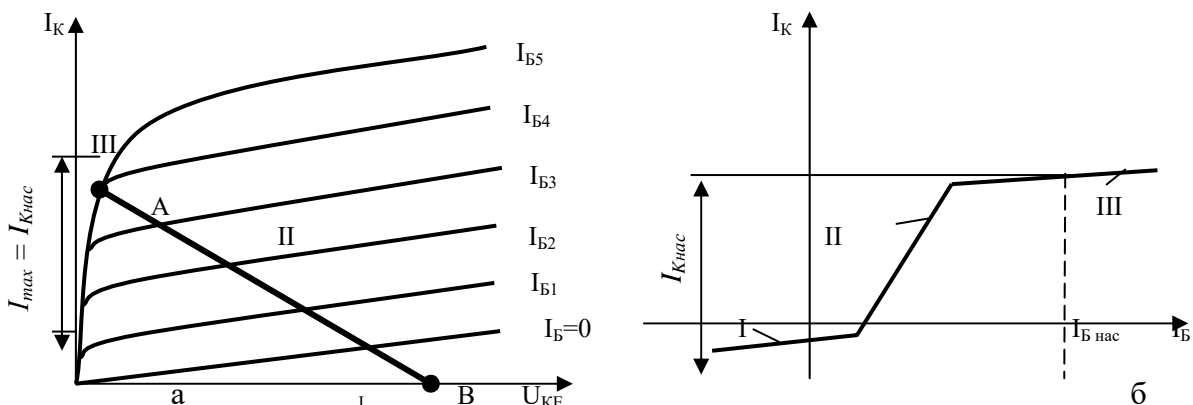


Рис. 2.3.12. Графічне пояснення роботи транзистора в ключовому режимі: I – режим відсічки; II – активний режим; III – режим насичення

В закритому стані транзистор може знаходитись необмежено довго. Вивести його із цього стійкого стану можна лише за рахунок зовнішніх дій, наприклад шляхом подання на вхід транзистора типу ррр запускою чого імпульсу від'ємної полярності.

Другим стійким станом є режим насичення відкритого транзистора. Насичення настає в тому випадку, коли обидва р-п переходи транзистора відкриті.

На рис. 2.3.12, а приведені вихідні статичні характеристики транзистора зі спільним емітером. В сімействі цих характеристик проведена навантажувальна пряма АВ, яка показує залежність струму колектора від напруги на колекторі при визначених значеннях E_K і R_n . Величина струму колектора визначається головним чином величиною струму бази: чим більший струм бази (вхідний струм), тим більший струм колектора. При деякому значенні струму бази $I_{B_{нас}} = I_{B4}$ колекторний струм досягає максимальної величини $I_{K_{макс}}$. Така величина колекторного струму відповідає робочій точці А на рис. 2.3.12,а. При подальшому збільшенні струму бази струм колектора практично залишається незмінним. Тому $I_{K_{макс}}$ отримав назву *струму насичення* і позначається $I_{K_{нас}}$. Величина струму насичення відкритого транзистора може бути знайдена за формулою

$$I_{K_{нас}} = \frac{E_K}{R_n} \quad (2.3.18)$$

Із рис. 2.3.12, а видно, що в області насичення (поблизу точки А) напруга між колектором і емітером, як і напруги між будь-якими іншими выводами транзистора, наближені до нуля.

На рис. 2.3.12, б показана залежність струму колектора I_K від струму бази I_B . Із цього рисунка видно, що характеристика $I_K = f(I_B)$ має злами на межах області закривання (відсічки) і насичення. Це допомагає більш чіткій роботі перемикаючого пристрою. Слід, однак, мати на увазі, що при переході транзистора із одного стійкого стану в інший можливі перехідні процеси, які спотворюють форму імпульсних струмів і напруг в колах транзистора.

2.3.7 Польові транзистори

Польовий транзистор – прилад, підсилюючі властивості якого обумовлені потоком основних носіїв, які протікають через провідний канал, і який керується електричним полем.

❖ *Польові транзистори, порівняно з біполярними, мають великі вхідний і вихідний опори ($R_{вх}$ практично безмежно великий).*

Принцип дії польових транзисторів теоретично був описаний в 1952 році (Шокли), але із-за складності технології виготовлення вони з'явилися значно пізніше.

Від способу виготовлення і електричних характеристик польові транзистори діляться на дві групи:

- з р-п переходами;
- з ізольованим затвором.
-

Польові транзистори з р-п переходами

Основним елементом таких транзисторів є пластина напівпровідника n-типу, на яку з обох сторін нанесені шари напівпровідника р-типу. На торці напівпровідникової пластини n-типу і на дві області р-типу нанесені металеві плівки, до яких припаяні омичні контакти, а два шари р-типу з'єднані між собою (рис. 2.3.13).

Тонкий шар напівпровідника типу n (або р), обмежований з двох сторін електронно-дірковими переходами – *канал*.

Ввімкнення каналу в електричне коло забезпечується за допомогою двох омичних електродів: *витік (В)*, *стік (С)*. Вивід, що під'єднаний до областей р-типу – *затвор (З)*.

Виводи витік, стік, затвор відповідають в перерахованому порядку емітеру, колектору, базі біполярного транзистора.

На рис. 2.3.14 представлені умовні графічні зображення польових транзисторів з р-п переходами.

В основі роботи польового транзистора лежить зміна площі поперечного перерізу провідного каналу. Коли напруга на р-п переходах дорівнює нулю, площа поперечного перерізу провідного каналу максимальна, а електричний опір між витоком і стоком мінімальний.

Величина струму в каналі залежить від напруги U_C , прикладеної між стоком і виток, опору навантаження і опору напівпровідникової пластинки між стоком і виток.

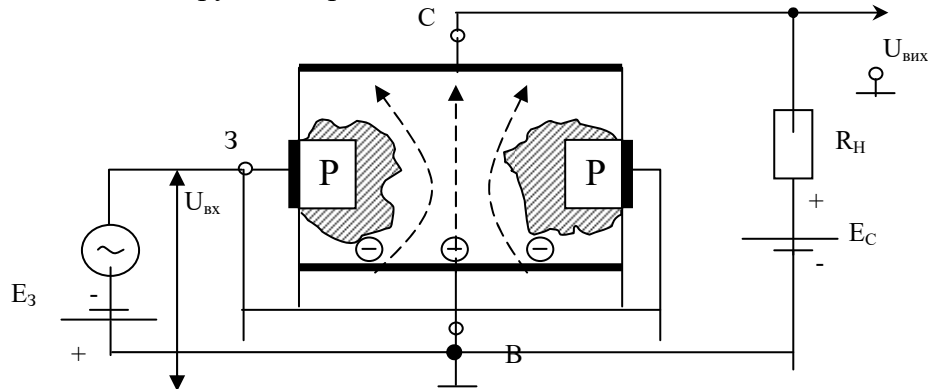


Рис. 2.3.13. Структура польового транзистора з р-п переходами

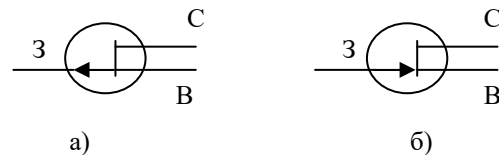


Рис. 2.3.14. Умовні графічні зображення польових транзисторів з р-п переходами:
а) р-каналом; б) n-каналом

При постійних U_C і R_H струм I_C залежить лише від площі поперечного перерізу каналу. E_3 утворює від'ємну напругу на затворі, що призводить до збільшення товщини р-п переходів і зменшенню перерізу струмопровідного каналу. Із зменшенням перерізу каналу підвищується опір між витком і знижується величина I_C . Підімкнувши послідовно з E_3 джерело змінної напруги $U_{вх}$, можна змінювати струм через канал за законом зміни $U_{вх}$. R_H допомагає підсилити вихідний сигнал.

На рис. 2.3.15,а показано приблизний вигляд сімейства вихідних (стоківих) вольт-амперних характеристик польового транзистора з р-п переходами $I_C = f(U_C)$ при $U_{ЗВ} = \text{const}$.

Залежність $I_C = f(U_{ЗВ})$ при $U_C = \text{const}$ отримала назву стокозатворної характеристики (рис. 2.3.15,б).

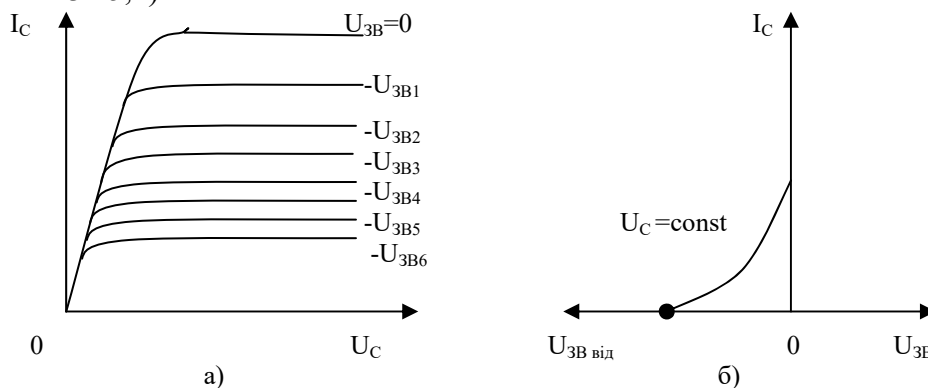


Рис. 2.3.15. Характеристики польового транзистора з р-п переходами:
а) вихідні (стоківі) характеристики; б) стокозатворна характеристика

Польові транзистори з ізолюваним затвором

Польові транзистори з ізолюваним затвором мають структуру *метал – діелектрик (окисел) – напівпровідник*. Тому їх часто називають МДП- або МОП-транзисторами. Принцип роботи цих приладів базується на ефекті поля в поверхневому шарі напівпровідника. На рис. 2.3.16. схематично показана конструкція такого транзистора. Основою приладу служить пластинка (під ложка) монокристалічного кремнію р-типу. Области виток і сток являють собою ділянки кремнію, сильно леговані домішкою n-типу. Відстань між витком і стоком приблизно 1 мкм. На цій ділянці розміщена вузька слабо легована смужка кремнію n-типу (канал). Затвором служить металева пластинка, ізолювана від каналу шаром діелектрика товщиною приблизно 0,1 мкм. В якості діелектрика може використовуватися вирошена при високій температурі плівка двоокису кремнію.

В залежності від полярності напруги, прикладеної до затвору (відносно стоку), канал може збіднюватись або збагачуватись носіями заряду (електронами). В залежності від цього існує 2 типи каналів: вбудований та індукований. При від'ємній напрузі на затворі електрони провідності виштовхуються із області каналу в об'єм напівпровідника підложки. При цьому канал збіднюється носіями заряду, що призводить до зменшення струму в каналі. Позитивна напруга на затворі допомагає втягуванню електронів провідності із підложки в канал. В цьому режимі, який отримав назву режиму збагачення, струм каналу зростає.

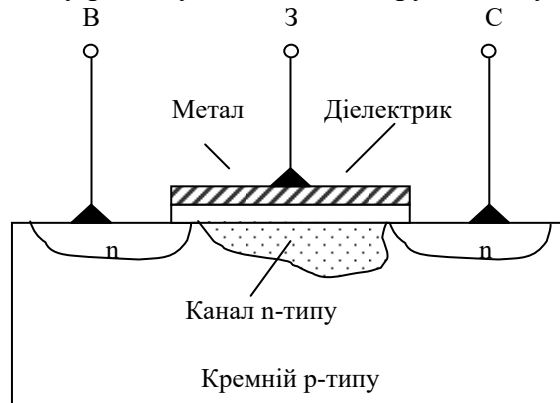


Рис. 2.3.16. Польовий транзистор з ізолюваним затвором

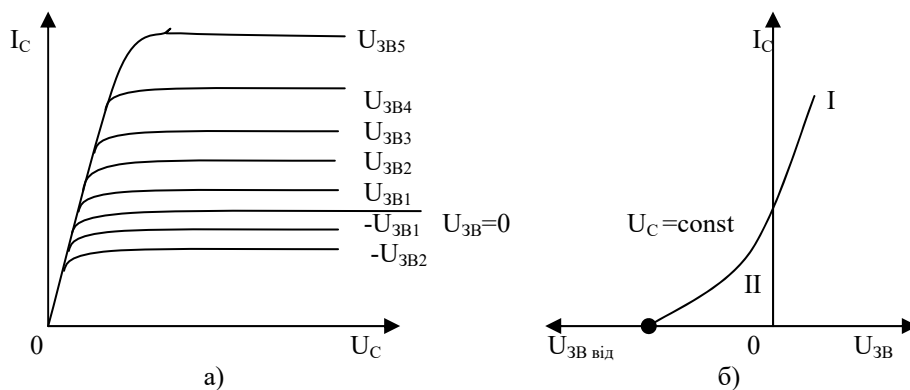


Рис. 2.3.17. Стокові (а) і стокозатворна (б) характеристики

польового транзистора з ізолюваним затвором: I – режим збагачення; II – режим збіднення

Таким чином, на відміну від польового транзистора з р-п переходами, транзистор з ізолюваним затвором може працювати з нульовою, від'ємною або додатною напругою на затворі.

Вихідні характеристики польового транзистора з ізолюваним затвором (рис. 2.3.17,а) мають такий же вигляд, як і характеристики транзистора з р-п переходами. Різниця лише в тому, що транзистори з р-п переходами можуть працювати лише в режимі збіднення (звуження) каналу, а транзистори типу МДП (або МОП) працюють як в режимі збіднення (при від'ємних напругах на затворі), так і в режимі збагачення (при додатних напругах на затворі). З цієї ж причини стокозатворна характеристика транзистора з ізолюваним затвором може захоплювати область позитивних напруг між затвором і витоком.

Основні параметри польових транзисторів.

Крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗВ}} \quad \text{при} \quad U_C = \text{const} \quad (2.3.19)$$

Напруга відсічки $U_{ЗВ \text{ від}}$ - зворотна напруга на затворі, при якій струмопровідний канал стане закритим.

Вхідний опір $R_{вх}$ між затвором і стоком

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{ЗВ \text{ max}}}{\Delta I_{З \text{ max}}} \quad (2.3.20)$$

Вихідний опір $R_{вих}$ (визначається в режимі насичення)

$$R_{вих} = \frac{\Delta U_C}{\Delta I_C} \quad \text{при} \quad U_{ЗВ} = \text{const} \quad (2.3.21)$$

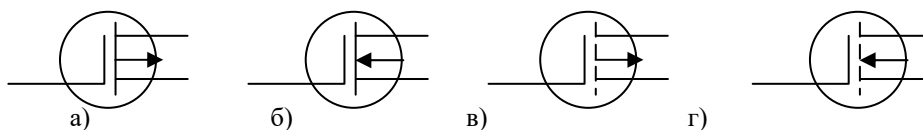


Рис. 2.3.18. Умовні графічні зображення польових транзисторів з ізолюваним затвором:

а) із встроєним р-каналом збідненого типу; б) із встроєним n-каналом збідненого типу; в) із індукованим р-каналом збагаченого типу; г) із індукованим n-каналом збагаченого типу

Переваги польових транзисторів:

- ❖ *високий вхідний опір*, який досягає в каналних транзисторах з р-п переходами величини 10^6 - 10^9 Ом, а в транзисторах з ізольованим затвором 10^{13} - 10^{15} Ом;
- ❖ *малий рівень власних шумів*, так як в польових транзисторів, на відміну від біполярних, в переносі струму беруть участь заряди лише одного знаку, що виключає появу рекомбінаційного шуму;
- ❖ *висока стійкість проти температурних і радіоактивних дій*;
- ❖ *висока щільність розміщення елементів при використанні приладів в інтегральних схемах*.

Характерні особливості польових транзисторів:

- ❖ *струм створюють основні носії зарядів*;
- ❖ *рух носіїв зарядів відбувається вздовж р-п переходів, а не через них, як у біполярних транзисторів*.

2.3.8 Одноперехідні (двобазові) транзистори

Одноперехідний транзистор (рис.2.3.19,а) являє собою монокристалічну пластинку кремнію n-типу з високим значенням питомого опору, на кінцях якої розміщені омичні контакти баз Б1 і Б2, а на боковій стороні – один емітерний р-п перехід.

Ділянки кристалу довжиною l_1 і l_2 (зазвичай $l_1 \ll l_2$) виконують функції баз приладу. Емітерний контакт зв'язку з зовнішнім виводом емітера Е.

Схема ввімкнення одноперехідного транзистора показана на рис. 2.3.19, б. До виводів баз Б1 і Б2 підводять напругу живлення $U_{Б1Б2}$, причому база Б2 має позитивний потенціал відносно бази Б1, яку зазвичай заземлюють. Під дією цієї напруги в кремнієвій пластинці виникає струм $I_{Б1Б2}$. Ділянка між базами Б1 і Б2 одноперехідного транзистора являє собою омичний опір в декілька кОм з лінійною вольт-амперною характеристикою. Тому напруга $U_{Б1Б2}$ розподіляється по базам пропорційно їх опорам, які залежать від довжин l_1 і l_2 . Ці напруги відповідно рівні $U_{ЕБ1}$ і $U_{ЕБ2}$. Полярність напруги $U_{ЕБ1}$ така, що в вихідному стані емітерний р-п перехід буде зміщений в зворотному напрямі і через нього пройде лише невеликий струм втрат $I_{ЕБ0}$ (рис. 2.3.20).

Цей же стан збережеться при подачі на емітер від'ємної напруги U_E або позитивної але, яка не перевищує величини напруги $U_{ЕБ1}$.

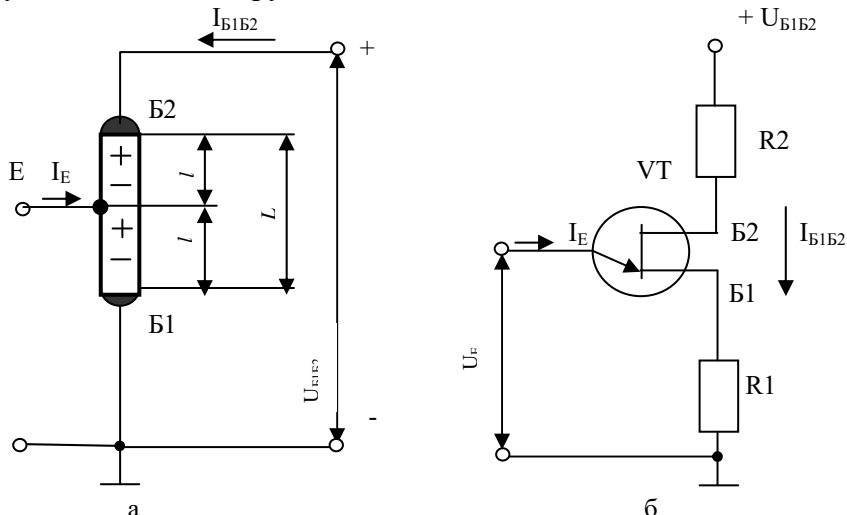


Рис. 2.3.19. Будова (а), схема ввімкнення (б) одноперехідного транзистора

Якщо ж напруга U_E перевищить напругу $U_{ЕБ1}$ на величину, достатню для відкриття емітерного р-п переходу (точка А на рис.2.3.20), то в кремнієву пластинку із емітера будуть інjektуватися дірки. Під дією електричного поля джерела $U_{Б1Б2}$ ці дірки будуть рухатися в напрямі до виводу бази Б1, утворюючи емітерний струм, що призведе до збільшення провідності на ділянці довжиною l_1 , або зменшенню до незначної величини опору на цій ділянці. В результаті внутрішнє падіння напруги $U_{ЕБ1}$ зменшиться, що допоможе подальшому відкриттю емітерного р-п переходу і збільшенню струму емітера і т.д. Т таким чином, процес зростання емітерного струму буде розвиватись лавиноподібно. З ростом емітерного струму опір емітерного

переходу знижується, а напруга U_E зменшується. Це відповідає появі у вольт-амперній характеристиці ділянки від'ємного опору приладу (ділянка АВ на рис.2.3.20).

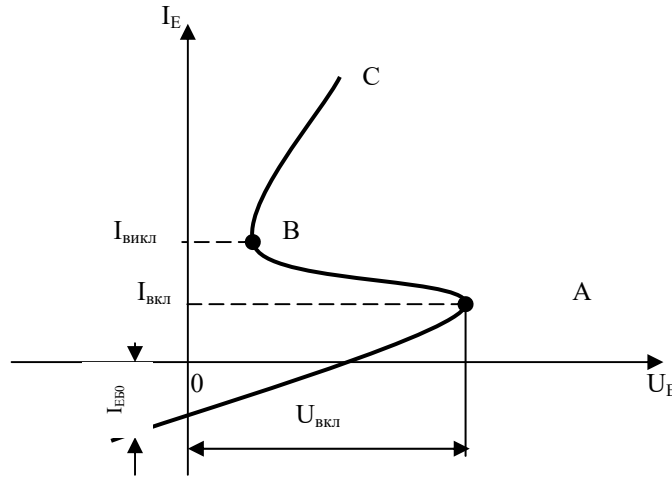


Рис. 2.3.20. Вольт-амперна характеристика одноперехідного транзистора

Подальше збільшення емітерного струму (ділянка ВС) пов'язано з підвищенням зовнішньої емітерної напруги.

Таким чином, вольт-амперна характеристика одноперехідного транзистора нагадує вольт-амперні характеристики тунельних діодів, що дозволяє використовувати даний прилад для побудови різних перемикаючих схем.

Переваги одноперехідних транзисторів:

- ❖ простота конструкції;
- ❖ стабільна напруга спрацювання;
- ❖ мале споживання струму в колі керування;
- ❖ можливості передачі порівняно потужних імпульсів і т.п.

2.3.9 Фототранзистори

Фото транзистор – фотогальванічний приймач випромінювання, фото чуттєвий елемент якого містить структуру транзистора, яка забезпечує внутрішнє підсилення.

Конструктивне оформлення одного із типових фототранзисторів (типу ФТ-1). Прилад складається із германієвої пластини, в яку із двох сторін співвісно впаяно навіски індію, які утворюють колектор і емітер. Пластинка германію припаяна олов'яним кільцем до кристалотримача, який в свою чергу приварений до ніжки. Колектор і емітер за допомогою тонких виводів з'єднані з провідниками, ізольованими від ніжки скляними ізоляторами. Базовий вивід приварений до ніжки. Весь фототранзистор поміщений в герметичний корпус, в якому є круглий отвір, закритий склом.

Двополюсна схема ввімкнення фототранзистора показана на рис.2.3.21,б. При такому ввімкненні вивід бази фототранзистора залишається вільним, тобто струм бази $I_B = 0$. при освітленні бази в ній з'являються вільні електрони і дірки. Для бази фото транзистора типу ррр дірки є неосновними носіями зарядів, тому вони втягуються полем колекторного переходу в колектор, збільшуючи струм в його колі. Основні носії зарядів (електрони), які залишилися в базі, створюють просторовий заряд, який понижує висоту потенціального бар'єру емітерного переходу. При цьому полегшується перехід дірок із емітера в базу, а потім, а потім в колектор, що приводить до ще більшого росту колекторного струму, який проходить через навантажувальний опір. Таким чином, навіть при невеликому світловому потокові, який падає на базу, струм колектора стає достатньо великим, що свідчить про високу чуттєвість фототранзистора.

Спочатку фототранзистори застосовувались виключно в розглянутій вище двополюсній схемі ввімкнення. Тому в деяких конструкціях фото транзисторів базовий вивід відсутній. Такий фото транзистор за своїми параметрами відрізняється від фото діода лише більшою інтегральною чуттєвістю. Фото транзистор, який має три виводи, являє додаткові можливості його використання, які базуються на тому, що, крім світлового сигналу, на його вхід можна подати

сигнал електричний.

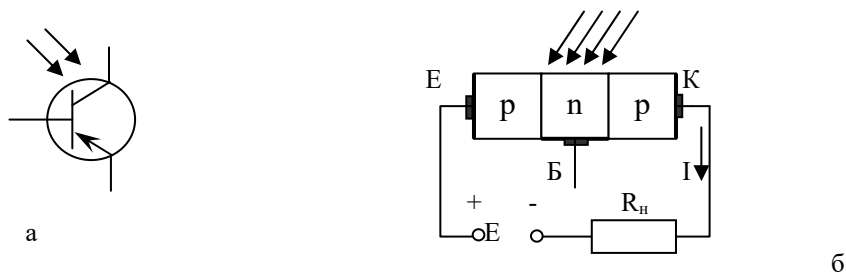


Рис. 2.3.21. Умовне графічне зображення (а), двополюсна схема ввімкнення (б) фототранзистора типу ррр

Оскільки конструкція фото транзистора в основному не відрізняється від конструкції звичайного біполярного транзистора, характеристики цих двох приладів також однакові, якщо на вхід фото транзистора подається лише електричний сигнал.

Основні параметри фототранзисторів:

темновий струм I_T – струм через затемнений фототранзистор при прикладеній робочій напрузі;

струм при освітленні I_C – струм через освітлений фототранзистор при прикладеній робочій напрузі;

інтегральна чуттєвість S_{int} – відношення струму через фототранзистор при прикладеній робочій напрузі до падаючого на нього світлового потоку;

найбільша потужність розсіювання $P_{роз,max}$ – допустима потужність, яка виділяється на приладі і допускає його експлуатацію протягом тривалого часу.

Фототранзистори використовуються в якості чутливих елементів в різних автоматичних пристроях, кіно фотоапаратурі, в пристроях введення і виведення інформації в обчислювальній техніці, для реєстрації ультрафіолетового і інфрачервоного випромінювання і т.п. Крім того вони з успіхом використовуються в оптоелектроніці.

2.3.10 Тиристори

Тиристор – напівпровідниковий прилад, який має чотирьохшарову структуру з трьома послідовними р-п переходами, характеризується двома стійкими станами в прямому напрямі і запираючими властивостями в зворотному напрямі.

Основні види тиристорів:

- *динистор* (діодний тиристор);
- *тринистор* (тріодний тиристор).

На рисунку 2.3.22 представлені умовні графічні зображення тиристорів.

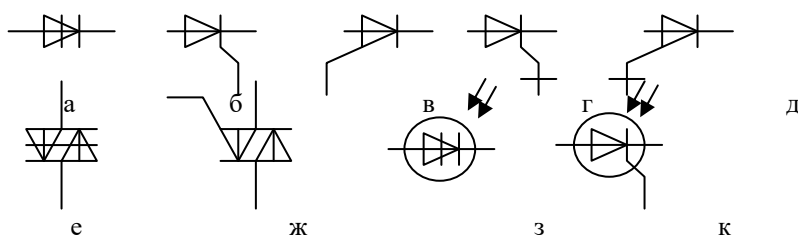


Рис. 2.3.22. Умовні графічні зображення тиристорів:

а – динистор; б – незапираємий тринистор з керуванням по катоду; в – незапираємий тринистор з керуванням по аноду; г – запираємий тринистор з керуванням по катоду; д – запираємий тринистор з керуванням по аноду; е – симетричний динистор; ж – симетричний тринистор; з – фотодинистор; д – фототринистор

Динистор має виводи від двох крайніх шарів.

❖ **Тринистор має виводи від двох крайніх шарів і від однієї внутрішньої (базової) області.**

Схематичне зображення чотирьохшарових структур динистора та тринистора показано на рис. 2.3.23. В цих структурах крайні області структури – відповідно р- і n- емітери, а області, які прилягають до середнього переходу – відповідно р- і n- бази. Емітерні електроди є силовими і

називаються катодом і анодом. Перехід П1 є емітерним або катодним, перехід П2 – колекторним; а перехід П3 – емітерним або анодним.

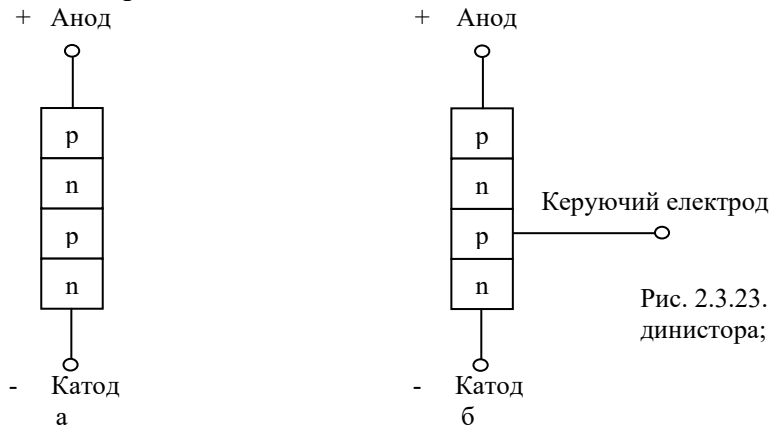


Рис. 2.3.23. Шарові структури тиристорів: а) динистора; б) тринистора

Для аналізу роботи тиристора чотирьохшарову структуру доцільно представити у вигляді двох транзисторів типів рnp і npn (рис. 2.3.24), причому колекторний струм транзистора рnp (VT1) одночасно є базовим струмом транзистора npn (VT2), колекторний струм транзистора VT2 – базовим струмом транзистора VT1. Таким чином

$$I_{B2} = I_{K1} \text{ і } I_{B1} = I_{K2}.$$

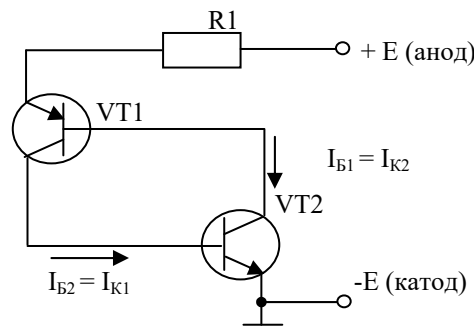


Рис. 2.3.24. Двотранзисторна схема заміщення тиристора

При збільшенні ЕРС джерела основні носії зарядів із емітера пересікають шар, де вони є неосновними, частково рекомбінуються в ньому. Не рекомбіновані носії проходять через колекторний перехід і з'являються в області, де вони є основними (в шарі бази VT2), знижують висоту потенціального бар'єра, допомагають переходу зарядів із другого емітера, що веде до збільшення (загального) струму приладу.

Невеликий приріст ΔI_{E1} викликає деякий приріст ΔI_{K1} , який, при поступанні в базу VT2, викликає приріст

$$\Delta I_{K2} = \Delta I_{B2} \beta_2 = \Delta I_{K1} \beta_2 \quad (2.3.22)$$

де β_2 – коефіцієнт підсилення за струмом VT2, який ввімкнений за схемою зі спільним емітером. В свою чергу I_{K1} збільшується в транзисторі VT1

$$\Delta I_{K1} = \Delta I_{K2} \beta_1 = \Delta I_{K1} \beta_1 \beta_2 \quad (2.3.23)$$

де β_1 – коефіцієнт підсилення за струмом VT1, який ввімкнений за схемою зі спільним емітером.

Далі процес продовжується і струм в контурі лавиноподібно зростає.

Перехід структури р-n-p-n із непровідного стану в провідний можна викликати не лише підвищенням напруги зовнішнього джерела, але й збільшенням струму в одному із еквівалентних транзисторів. Для цього в тиристорі від однієї бази роблять вихід (керуючий електрод). Змінюючи струм керуючого електроду можна регулювати напругу перемикання, а отже, керувати роботою приладу.

Типова вольт-амперна характеристика динистора приведена на рис.2.3.25. Вона може бути розбита на наступні області: ВБ – область малого додатнього опору, яка відповідає відкритому стану приладу; БА – область високого від'ємного опору; А – область поверненого пробую середнього р-n переходу; АО – непровідний стан (середній р-n перехід закритий

зовнішнім джерелом напруги; OC – область високого опору; від C і нижче – область лавинного неперверненого пробою.

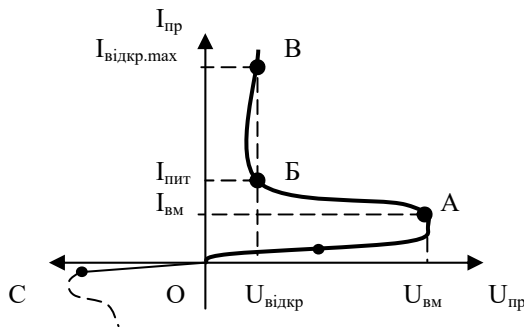


Рис. 2.3.25. Вольт-амперна характеристика динистора

Наявність у вольт-амперній характеристиці приладу ділянки з від'ємним опором дозволяє використовувати динистор в різних електронних схемах.

Динистор може знаходитись у двох стійких станах:

- ❖ перший стан характеризується малим струмом, що протікає через прилад, і великим падінням напруги на ньому (ділянка AO);
- ❖ другий стан характеризується великим струмом і малим падінням напруги (ділянка BB).

Наявність у вольт-амперній характеристиці приладу ділянки з від'ємним опором дозволяє використовувати динистор в різних електронних схемах.

Динистор може знаходитись у двох стійких станах:

- ❖ перший стан характеризується малим струмом, що протікає через прилад, і великим падінням напруги на ньому (ділянка AO);
- ❖ другий стан характеризується великим струмом і малим падінням напруги (ділянка BB).

Тринистори можна вмикати при напругах, менших напруги ввімкнення динистора. Для цього достатньо на одну із баз подати додаткову напругу таким чином, щоб створюване ним поле співпадало за напрямком з полем аноду на колекторному переході. Можна подати струм керування на другу базу, але для цього на керуючий електрод необхідно подавати напругу від'ємної полярності відносно аноду, тому й розрізняють тринистори з керуванням по катоду і з керуванням по аноду.

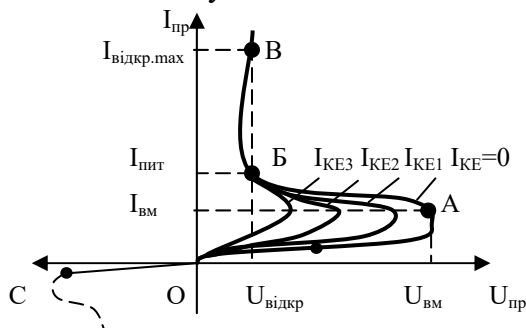


Рис. 2.3.26. Вольт-амперна характеристика динистора

$$I_{KE3} > I_{KE2} > I_{KE1} > I_{KE=0}$$

Вольт-амперна характеристика тринистора (рис.2.3.26) при $I_{KE}=0$ (струм керуючого електроду) подібна до вольт-амперної характеристики динистора.

Ріст I_{KE} призводить до зміщення вольт-амперної характеристики в сторону меншої напруги ввімкнення. При достатньо великому струмі керуючого електроду вольт-амперна характеристика тринистора вироджується у вольт-амперну характеристику звичайного опору.

Для вимкнення тринистора необхідно зменшувати струм через нього до значення, меншого ніж $I_{пит}$.

Маркування тиристорів

- ❖ Для маркування тиристорів використовуються шість символів без будь-яких розділових знаків.

Перший елемент характеризує вихідний матеріал, з якого виготовлено прилад, позначається буквою:

К - кремній, або його з'єднання; **Г** – германій, або його з'єднання; **А** – з'єднання галію.

Для приладів, які використовуються в пристроях спеціального призначення, встановлені наступні позначення, де буквам відповідають цифри: **К** – 1, **Г** – 2, **А** – 3.

Другий елемент характеризує підклас приладу, позначається буквою:

Н – динистори;

У – тринистори.

Третій елемент характеризує призначення приладу, позначається цифрою.

Четвертий і п'ятий елементи позначають порядковий номер розробки технологічного типу приладу, позначаються цифрами від 01 до 99.

Шостий елемент позначає ділення технологічного типу на параметричні групи, позначається буквою від А до Я.

Основні параметри тиристорів:

напруга ввімкнення $U_{вм}$ – напруга, при якій струм через прилад починає різко зростати;

струм ввімкнення $I_{вм}$ – струм, який протікає через прилад при прикладеній до нього напрузі ввімкнення;

струм утримання $I_{утр}$ – мінімальний основний струм, який необхідний для підтримання тиристора у відкритому стані при визначеному режимі в колі керуючого електроду;

напруга у відкритому стані $U_{відкр}$ – основна напруга при визначеному струмі в відкритому стані тиристора;

струм у закритому стані $I_{закр}$ – основний струм при визначеній напрузі у закритому стані тиристора;

зворотний струм $I_{зв}$ – анодний струм при визначеній зворотній напрузі;

загальна ємність $C_{заг}$ – ємність між основними електродами тиристора при визначеній напрузі в закритому стані;

постійний відкриваючий струм керуючого електроду $I_{KE.відкр.}$, імпульсний відкриваючий струм керуючого електроду $I_{KE.відкр.і}$, постійна відкриваюча напруга на керуючому електроді $U_{KE.відкр.}$, імпульсна відкриваюча напруга на керуючому електроді $U_{KE.відкр.і}$, час ввімкнення $t_{вм}$, час вимкнення $t_{вимкн}$ та ін.

Контрольні питання і вправи

1. Користуючись довідником, розшифруйте маркування і проведіть класифікацію наступних приладів (за типом, потужністю, частотою): 2У101А, ФТ-1, 1Т702А, 2П350Б, ГТ305А, ГТ806А, КТ911Т, 2Н102И, ФТГ-2, 1Т311Л, КП101Д.

2. Біполярний транзистор, який увімкнений за схемою зі спільним емітером має $K=49$. яке значення матиме коефіцієнт підсилення за струмом цього ж транзистора, якщо його увімкнути за схемою зі спільним колектором?

3. Визначити струм бази біполярного транзистора КТ815А, увімкненого за схемою зі спільним емітером, якщо у відкритому стані струм колектора 1,2 А, передаточний коефіцієнт за струмом 50.

4. Коефіцієнт передачі струму $\beta = 97$. Знайти величину коефіцієнта передачі струму α .

5. Як пояснити назву транзистора „біполярний“?

6. Розкажіть про переваги схеми ввімкнення транзистора із спільним емітером.

7. Поясніть побудову еквівалентних схем транзистора.

8. Знайдіть коефіцієнт передачі струму β , якщо $h_{21Б} = 0,95$.

9. В якій схемі ввімкнення коефіцієнт прямої передачі струму емітера сильніше залежить від частоти?

10. Яка схема відрізняється більшою температурною стабільністю?

11. Вкажіть основні переваги польових транзисторів над біполярними.

12. Чим відрізняються польові транзистори з р-п переходом від транзисторів з ізольованим затвором?

13. Поясніть принцип роботи і можливості практичного застосування одноперехідного транзистора.

14. Поясніть фізичну суть вольт-амперної характеристики тиристора.

15. Приведіть основні параметри приладів 2Н102А і 2У203А і поясніть їх.

2.4 ЕЛЕКТРОВАКУУМНІ ТА ІОННІ ПРИЛАДИ

Електровакуумний прилад – прилад, в якому провідність здійснюється електронами або іонами, які рухаються через вакуум або газ.

Електровакуумні прилади діляться на: електронно-керовані (діод, тріод, тетрод, пентод); газорозрядні (тиратрон, стабілітрон, індикатор тліючого розряду, неонна лампа); електронно-променеві (осцилографічна трубка, кінескоп, трубки спеціального призначення); на зовнішньому фотоєфекті (фотоелемент, фотоелектронний помножувач).

Ще не так давно електровакуумні електронно-керовані і газорозрядні прилади були основними приладами, які використовувалися в різних приладах автоматики, промислової електроніки, радіоелектроніки. Інтенсивний розвиток напівпровідникової електроніки, особливо мікроелектроніки, значно зменшив обсяги їх використання.

В даний час електронно-керовані і газорозрядні прилади використовують в розроблених раніше схемах і схемах електронних приладів, які знаходяться в експлуатації. У апаратурі, яка розробляється, їх використовують для підсилення, генерування і других перетворень сигналів значно більшої робочої частоти і потужності, ніж це можливо за допомогою напівпровідникових приладів.

2.4.1 Електронні лампи

Електронна лампа – електровакуумний прилад, який складається із металевого, металокерамічного або пластмасового балону, з якого викачане повітря, та розміщених в ньому електродів.

В залежності від призначення і типу лампи електродів може бути декілька, але в будь-якій лампі є два основних електроди: *катод* – джерело електронів і *анод* – приймач електронів. Рух електронів в вакуумі від одного електроду до іншого і зумовлює електричний струм в лампі.

Катоди є прямого і непрямого розжарення. Катоди непрямого розжарення зазвичай виконуються у вигляді трубки, всередині якої розміщена спіраль, яка називається ниткою розжарення. На неї подається напруга розжарення, вона розігріває катод для отримання термоелектронної емісії. Катоди прямого розжарення – це катоди, в яких напруга розжарення подається безпосередньо на катод. Аноди можуть бути різноманітної форми: у вигляді дисків, прямокутних пластин, циліндрів і т.п. під дією електронного бомбардування вони нагріваються до високих температур, тому для уникнення плавлення їх виготовляють із тугоплавких металів.

Електровакуумний діод

Електровакуумний діод є найпростішою електронною лампою (прототип напівпровідникового діода).

❖ *Основна властивість – пропускати струм в одному напрямі.*

Діоди бувають (рис.2.4.1) з катодом прямого і непрямого розжарення.

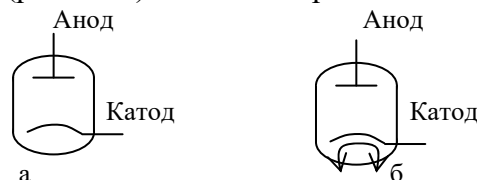


Рис. 2.4.1. Умовні графічні зображення електровакуумного діода:
а – з прямим розжаренням; б – з непрямым розжаренням

Діод пропускає струм лише тоді, коли на аноді діє додатна напруга (рис. 2.4.2). Якщо на анод лампи подана від'ємна напруга. То електричне поле перешкоджає руху електронів, які випромінюються катодом. Струм не проходить (лампа закрита). Відмінність електровакуумних діодів від напівпровідникових заключається в тому, що зворотній струм в них повністю відсутній.

Вольт-амперна характеристика електровакуумного діода характеризує залежність анодного струму від напруги на аноді при постійному значенні напруги розжарення (рис. 2.4.3)

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_p = \text{const.}$$

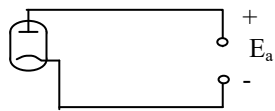


Рис. 2.4.2. Схема ввімкнення діода

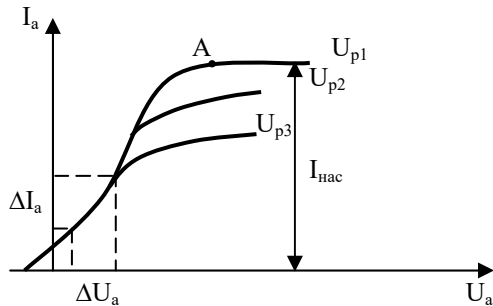


Рис. 2.4.3. Вольт-амперна характеристика діода

Точка А дає початок режиму насичення (катод вже не може виділити більше електронів, як би не збільшувалася напруга на аноді).

За вольт-амперною характеристикою можна визначити основні параметри діода:

крутизна характеристики
$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \quad (2.4.1)$$

внутрішній опір
$$R = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{1}{S} \quad (2.4.2)$$

допустима потужність розсіювання (показує, при якій потужності діод вийде з ладу із-за перегріву аноду)

$$P_a = U_a I_a \quad (2.4.3)$$

зворотна пробивна напруга $U_{зв}$ – зворотна напруга, при якій діод вийде з ладу в результаті пробою простору між катодом і анодом.

❖ Діоди, призначені для випрямлення струмів промислової частоти, називаються кенотронами.

Маркування електровакуумних приладів

Маркування електровакуумних діодів містить букву Ц і складається із 5 елементів:

1 елемент - позначається цифрою і характеризує значення U_p ;

2 елемент – тип електровакуумного приладу. Для діодів: Д – одинарний діод; Х – подвійний діод (тобто, який містить два діоди в одному корпусі із спільним розжаренням); С – високовольтний діод або кенотрон;

3, 4 елементи – порядковий номер розробки (позначається цифрами);

5 елемент – позначається буквою і характеризує особливості конструкції: С – в скляній колбі з пластмасовим цоколем (дуже старе виконання, не менш 24 мм – діаметр колби); П – пальчикові; Ж – типу „жолудь”; А – мініатюрні з гнучкими виводами і діаметром корпусу менше 6 мм; Б - мініатюрні з гнучкими виводами і діаметром корпусу менше 10 мм; К – в керамічному корпусі; відсутність 5-го елементу – це говорить про відсутність металевого корпусу.

Тріод

Тріод – трьохелектродний електровакуумний прилад, в якого крім аноду і катоду є ще один електрод, який називаються керуюча сітка.

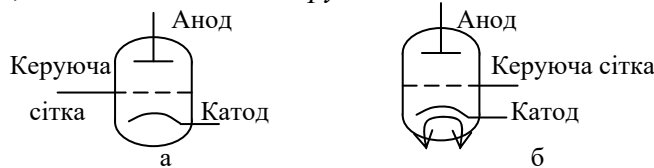


Рис. 2.4.4. Умовні графічні зображення електровакуумного тріода:
а – з прямим розжаренням; б – з непрямим розжаренням

Коли напруга на сітці дорівнює нулю $U_c = 0$, то сітка практично не впливає на роботу лампи, тоді тріод діє як діод. При від’ємній напрузі на сітці між сіткою і катодом виникає електричне поле, яке перешкоджає руху електронів і обмежує анодний струм (лампа закрита).

При додатній напрузі на сітці між катодом і сіткою створюється прискорююче електричне поле, яке допомагає рухові електронів, в результаті чого анодний струм збільшується.

- ❖ *Оскільки сітка розміщена до катоду ближче ніж анод, то порівняно малі зміни на сітці впливають на анодний струм сильніше, ніж в десятки разів більші зміни на аноді.*

Основними характеристиками триода є:
сітково-анодна (рис.2.4.5), яка показує залежність анодного струму від напруги на керуючій сітці при сталих значеннях напруги на аноді

$$I_a = f(U_c) \text{ при } U_a = \text{const};$$

сіткова(рис.2.4.5), яка показує залежність сіткового струму від напруги на керуючій сітці при сталих значеннях напруги на аноді;

анодна (рис.2.4.6), яка характеризує залежність анодного струму від напруги на аноді при сталих значеннях напруги на сітці

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_c = \text{const}.$$

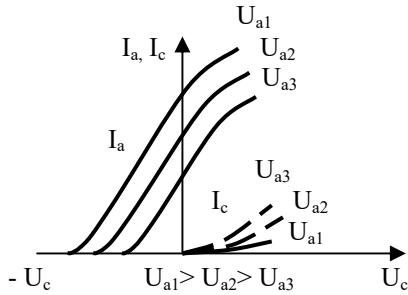


Рис. 2.3.5. Анодно-сіткова та сіткова характеристики триода

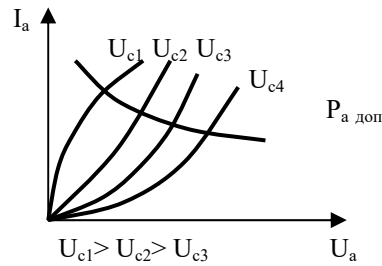


Рис. 2.3.5. Анодна характеристика триода

Основні параметри триода:

крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \quad (2.4.4)$$

внутрішній опір

$$R = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad \text{при } U_c = \text{const} \quad (2.4.5)$$

коефіцієнт підсилення

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad \text{при } I_a = \text{const} \quad (2.4.6)$$

Тетрод

Тетрод – чотирьохелектродний електровакуумний прилад, в якого крім аноду, катоду і керуючої сітки є ще один електрод, який розміщений між керуючою сіткою і анодом і називається *екрануючою сіткою*.



Рис. 2.4.5. Умовні графічні зображення електровакуумного тетрода:

а – з прямим розжаренням; б – з непрямым розжаренням

Екрануюча сітка виконується у вигляді дрітної спіралі з малим кроком витків, тобто її густота значно більша ніж в керуючої сітки і призначена для екранування, тобто захисту керуючої сітки і катоду від впливу електричного поля аноду. Являючись електростатичним екраном, цей четвертий електрод повинен бути не суцільним, а у вигляді сітки, щоб електрони з катоду попадали на анод.

Екрануюча сітка повинна прискорювати рух електронів до аноду, тому на неї подається постійна пряма напруга. Для підсилення екрануючої дії даної сітки зменшують крок її витків і

ставлять верхній і нижній металеві екрани, з'єднані з нею, які захищають керуючу сітку і катод від проникнення анодного поля зверху і знизу.

Для зменшення ємності між выводами анода і керуючої сітки один з них роблять в нижньому цоколі лампи, а інший – вверху балона.

На рисунку 2.4.6 представлені характеристики тетрода: анодно-сіткова (а) - $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$; анодна (б) - $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$.

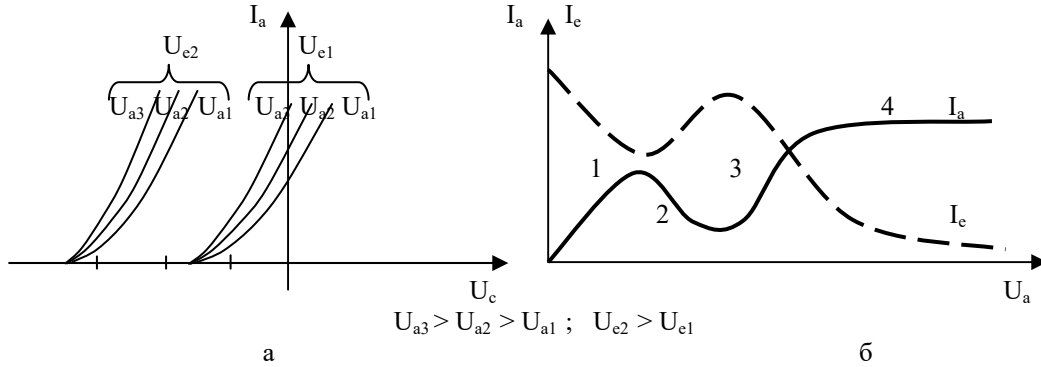


Рис. 2.4.6. Основні характеристики тетрода: анодно-сіткова (а) та анодна (б)

Якщо одночасно із анодною характеристикою знімати залежність струму екрануючої сітки I_e від анодної напруги U_a , то можна встановити наступне: при $U_a = 0$ всі електрони, які пройшли крізь керуючу сітку, попадають на екрануючу, яка має додатній потенціал, тому струм екрануючої сітки має максимальне значення, а $I_a = 0$. при збільшенні U_a струм аноду різко збільшується, а I_e зменшується, т.я. відбувається перерозподіл електронів між анодом і екрануючою сіткою (діл.1). При подальшому збільшенні U_a енергія електронів, які попадають на анод, стає достатньою, щоб викликати вторинну емісію з аноду. Вторинні електрони з аноду йдуть на екрануючу сітку (т.я. її потенціал вищий), і тому, струм аноду зменшується, а струм екрануючої сітки збільшується (діл.2). з наближенням U_a до U_e різниця потенціалів між екрануючою сіткою і анодом зменшується, послаблюється прискорююче поле для вторинних електронів, і все більше їх число повертається назад на анод. Анодний струм знову починає збільшуватися, а струм екрануючої сітки – зменшуватися (діл.3). При $U_a > U_e$, поле між екрануючою сіткою і анодом стає гальмуючим для вторинних електронів, вони повертаються на анод (діл.4).

Основні параметри тетрода:

крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \quad \text{при} \quad U_a = \text{const} \quad \text{і} \quad U_e = \text{const} \quad (2.4.7)$$

внутрішній опір

$$R = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad \text{при} \quad U_c = \text{const} \quad \text{і} \quad U_e = \text{const} \quad (2.4.8)$$

коефіцієнт підсилення

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad \text{при} \quad I_a = \text{const} \quad \text{і} \quad U_e = \text{const} \quad (2.4.9)$$

Пентод

Пентод – п'яти електродна лампа, що має ще одну (третю) сітку, яка розташована між анодом і екрануючою сіткою. Ця сітка називається захисною або антидинаatronною.

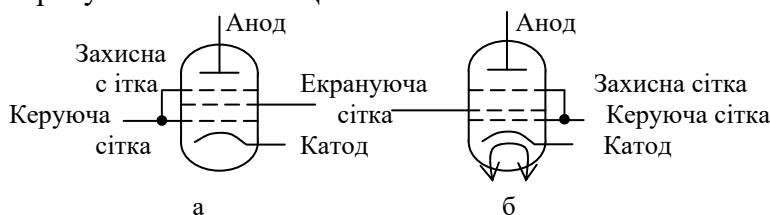


Рис. 2.4.7. Умовні графічні зображення електровакуумного пентода:

а – з прямим розжаренням; б – з непрямим розжаренням

Захисна (антидинаatronна) сітка з'єднується з катодом і по відношенню до анода має від'ємний потенціал. В просторі між цією сіткою і анодом створюється гальмуюче поле для

вторинних електронів, які вилітають з аноду. Вторинні електрони повертаються на анод. Таким чином виправляється динаatronний ефект.

❖ **Динаatronний ефект** – явище, при якому електрони, які попадають на анод, деколи самі вибивають з нього електрони. В тріоді ці електрони знову попадають на анод, тому вторинна електронна емісія не впливає на анодний струм. В тетроді частина вторинних електронів попадає на екрануючу сітку (в неї додатний потенціал), що викликає збільшення струму в колі сітки за рахунок послаблення анодного струму. В сигналі, що підсилюється, з'являються спотворення, а часто процес підсилення зовсім зривається.

На рисунку 2.4.8 представлені основні характеристики пентода: анодно-сіткова (а) - $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$; анодна (б) - $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$.

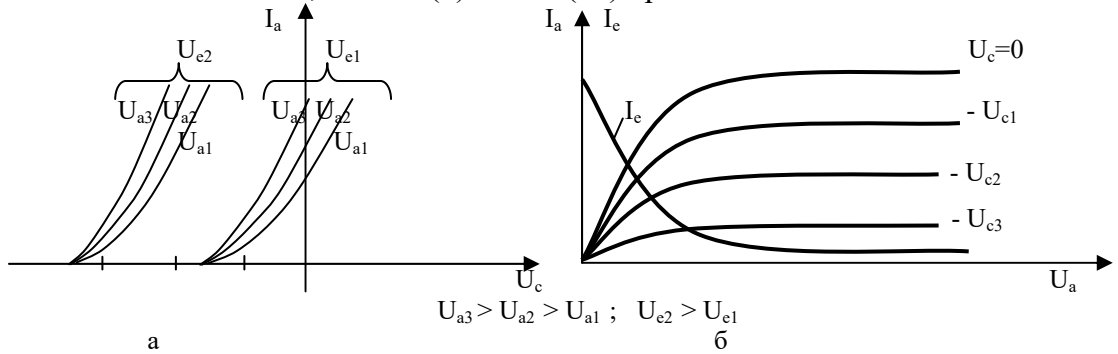


Рис. 2.4.6. Основні характеристики пентода: анодно-сіткова (а) та анодна (б)

Основні параметри пентода такі ж, як у тетрода. Коефіцієнт підсилення і внутрішній опір дуже великі, а крутизна характеристики майже така ж, як у тріодів.

2.4.2 Іонні прилади тліючого розряду

Іонні прилади виконують у вигляді герметичних балонів, всередині яких розміщені електроди. Балони заповнюються розрідженим інертним газом або парами ртуті.

На рис. 2.4.7 показана вольт-амперна характеристика електричного розряду в газі.

❖ **Особливість тліючого розряду** – автоматичне підтримання практично постійної напруги на електродах при зміні струму через прилад в досить широких межах.

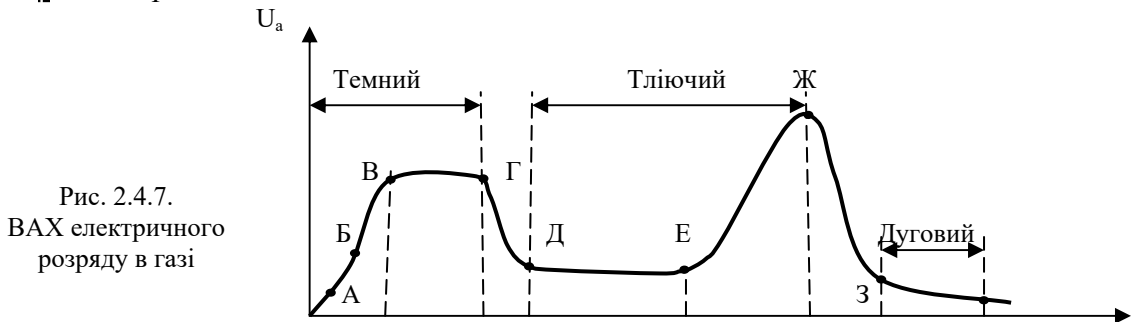


Рис. 2.4.7. ВАХ електричного розряду в газі

Неонова лампа

Неонова лампа – найпростіший іонний прилад, який складається з балону, заповненого розрідженим інертним газом (неоном), і закріплених всередині балону двох дискових або циліндричних електродів.

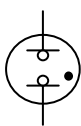


Рис. 2.4.8. Умовне графічне зображення неонові лампи

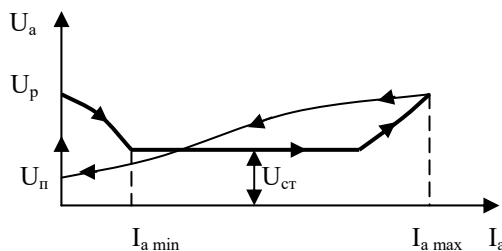


Рис. 2.4.9. ВАХ неонові лампи

Неонова лампа не має розжарювального катоду. Умовне графічне зображення неонові лампи представлено на рис.2.4.8, а її вольт-амперна характеристика – на рис.2.4.9.

- ❖ Якщо напруга, прикладена до лампи, менша напруги запалення, то в лампі розряд проходить, але він дуже слабкий і не має практичного значення. Якщо прикладена напруга більша або рівна нарузі запалення, в лампі виникає тліючий розряд, який супроводжується оранжево-червоним свіченням неону.

При збільшенні напруги живлення U_a швидко зростає при дуже малому струмові (рис.2.4.9). При $U_a = U_p$ виникає нормальний тліючий розряд у відповідності з вибраним баластним опором. В цей момент в колі з'являється струм, а напруга на лампі падає; на частині поверхні катоду з'являється п'ятно, що світиться. З подальшим збільшенням напруги живлення струм I_a зростає, а напруга $U_a = U_{ст}$ залишається постійною. Коли розряд переходить в аномальний, ріст струму супроводжується підвищенням напруги на лампі. При зменшенні напруги живлення струм і напруга на лампі зменшуються. Ця вітка не співпадає із зростаючою із-за інерційності процесів де іонізації.

Нормальний тліючий розряд застосовують в неонових лампах, які використовують для стабілізації або обмеження напруги, а аномальний – в лампах для індикації ввімкнення режиму або перевантаження апаратури, в цифрових і знакових індикаторах і індикаторних панелях, а також в газорозрядних джерелах світла.

- ❖ В полях високої частоти неонові лампи світяться без приєднання електродів до джерел живлення, т.я. ЕРС, необхідна для виникнення розряду в газі, утворюється електромагнітним полем високої частоти.

Тиратрон

Тиратрон – трьохелектродний іонний прилад тліючого розряду.

Назва тиратрон походить від грецького слова *thyra* (двері), що підкреслює можливість «відкривання» тиратрона за допомогою сітки, і слова «електрон». Сітка грає роль пускового пристрою. На неї подається додатна напруга, значно менша ніж на анод, і між нею і катодом встановлюється режим тихого розряду, за рахунок чого поблизу катоду утворюється область іонізованого газу.

До аноду прикладена висока напруга, але недостатня для того, щоб тиратрон відкрився. Тиратрон знаходиться на межі ввімкнення. Достатньо тепер подати на сітку запускаючий імпульс і між сіткою і катодом виникає тліючий розряд. Сітка в тиратроні має більш обмежену дію, ніж електронних електровакуумних триодах. В останніх, змінюючи напругу сітки, можна повністю керувати анодним струмом, тобто регулювати його від нуля до максимального значення. А в тиратроні за допомогою сітки можна лише відкрити тиратрон, але не можна змінювати анодний струм. Після виникнення розряду сітка втрачає керуючу дію.

Ряд тиратронів тліючого розряду випущено з двома сітками. В таких тиратронах керуючою сіткою є друга сітка, більш віддалена від катода. На першу сітку подається постійна додатна напруга, і в колі цієї сітки весь час існує дуже невеликий струм «підготовчого» розряду (одиниці або десятки мікроампер). На іншій сітці постійна позитивна напруга нижча, ніж на першій. Тому гальмує поле між сітками не допускає електрони до аноду. При подачі імпульсу додаткової позитивної напруги на другу сітку тиратрон відкривається, тобто електрони проникають через другу сітку, і в колі аноду виникає тліючий розряд.

Вітчизняні тиратрони тліючого розряду, як правило, мають зверх мініатюрне оформлення і наповнені неоном, або аргоном, або неоноаргоновою сумішшю. Вони можуть працювати при температурах навколишнього середовища від -60 до $+100^{\circ}\text{C}$.

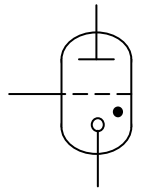


Рис. 2.4.10. Умовне графічне зображення тиратрона

2.5 ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

Швидкі темпи розвитку електроніки привели до створення **інтегральних схем** (ІС чи мікросхем). Така ІС може містити до 10000 елементів в 1 см^3 , що дає змогу реалізувати складні

функціональні схеми. У мікросхемах реалізують усі напівпровідникові елементи, а також резистори та конденсатори (використовується смість р-п-переходів). Технологічно не можна реалізувати тільки індуктивність, тому усі ІС виготовляють без індуктивності й відповідно без трансформаторів.

- ❖ **Мікросхема** – це мікроелектронний виріб, що має густину монтажу не менш п'яти елементів в одному кубічному сантиметрі об'єму, який займає схема, і розглядається як єдине ціле.
- ❖ **Інтегральна мікросхема** – мікросхема, всі або частина елементів якої нероздільно пов'язані і електрично з'єднані між собою так, що пристрій розглядається як єдине ціле.

За технологією виготовлення вони поділяються на напівпровідникові та гібридні.

- ❖ **Напівпровідникова ІМС** – це інтегральна мікросхема, елементи якої виконані в об'ємі і (або) на поверхні напівпровідникового матеріалу.
- ❖ **Гібридна ІМС** – це інтегральна мікросхема, частина елементів якої має самостійне конструктивне оформлення.

Функціональна можливість ІС визначається кількістю активних елементів (насамперед транзисторів). Для прикладу, на рис. 2.5.1 зображено електричну схему простої мікросхеми ОП 140УД1.

Тому ІС поділяють відповідно до кількості інтегрованих елементів (табл. 7).

Таблиця 2.5.1 **Класифікація інтегральних схем**

ІС	Кількість	Літерне
Проста	<10	ІС
Середня	10<100	СІС
Велика	100<1000	ВІС
Надвелика	>1000	НВІС

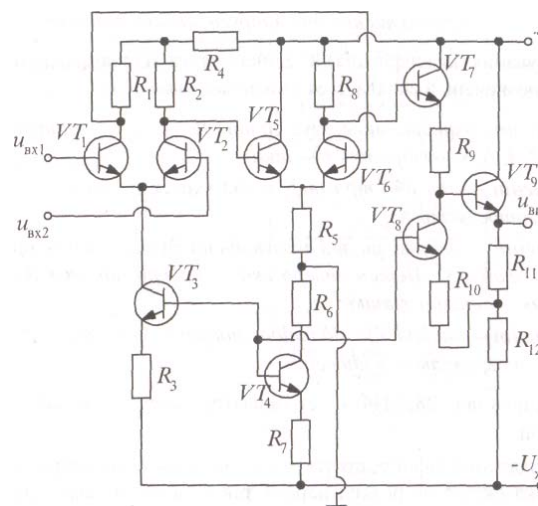


Рис. 2.5.1 . Електрична схема мікросхеми ОП 140УД1

ІС характеризуються механічною стійкістю, діапазоном робочих температур, надійністю (108 годин безперебійної роботи), малою споживаною потужністю (до 200 мВт). Крім того, залежно від функціонального призначення ІС, подаються такі параметри:

- **лінійно-імпульсні ІС** — коефіцієнт підсилення за напругою, вхідний і вихідний опори, максимальне значення вихідної напруги, межі частотного діапазону;
- **логічні ІС** — вхідна та вихідна напруги, швидкодійність.

Маркування (класифікація) ІС здійснюється відповідно до прийнятої системи позначень й складається з чотирьох елементів:

1-й елемент — цифра, що вказує на тип ІС (1, 5, 7) — напівпровідникові; 2, 4, 6, 8 — гібридні; 3 — інші);

2-й елемент — дві або три цифри, які вказують на номер серії ІС, що виготовляється;

3-й елемент — дві літери, які вказують на функціональне призначення ІС (табл.2.5.2). Перша літера вказує на призначення ІС, а друга уточнює її спеціалізацію;

4-й елемент — цифра, що відповідає порядковому номеру ІС, з функціональною ознакою у цій серії.

Наприклад: 283ЕН4 - - стабілізатор напруги на базі гібридної ІС 83 серії.

Як додаткова інформація п'ятим елементом позначення може бути літера, яка вказує на розкид параметрів ІС в межах серії, наприклад: 123НД6А — напівпровідникова ІС набір діодів

серії 23, типу А. Для безкорпусних ІС через дефіс подається цифра, яка вказує на конструктивні особливості мікросхеми (1 — з гнучкими выводами; 2 — з павукоподібними; 3 — з жорсткими выводами; 4 — з нерозділеними; 5 - выводами, наклеєними на плівці; 6 — без выводів). Наприклад: 140МФ8-3 - напівпровідникова ІС, фазовий модулятор, серії 40 з жорсткими выводами.

Для ІС широкого вжитку на початку умовного позначення ставиться літера К. Після неї може йти друга літера, яка вказує на тип корпусу мікросхеми (П — пластмасовий; К — керамічний; Б — без корпусу). Наприклад: КП140УД7 - напівпровідникова ІС у пластмасовому корпусі, операційний підсилювач, серії 40.

Таблиця 2.5.2 Функціональні ознаки інтегральних схем

Назва мікросхеми	Літерне позначення	Функціональне призначення	Літерне позначення
1	2	3	4
	А	Імпульси прямокутної форми	Г
		Імпульси спеціальної форми	Ф
Схема затримки	Б	Пасивна	М
		Активна	Р
Генератор сигналу	Г	Гармонійного сигналу	С
		Прямокутного сигналу	Г
		Лінійно-змінного сигналу	Л
		Сигналів спеціальної форми	Ф
Детектор	Д	Амплітудний	А
		Частотний	С
		Фазовий	Ф
Джерело живлення	Е	Випростувальне	Б
		Стабілізатор напруги	Н
		Стабілізатор струму	Т
Дискретний пристрій	І	Регістр	Р
		Суматор	М
		Лічильник	Е
		Шифратор	В
Комутатор	К	Дешифратор	Д
		Напруги	Н
Логічний елемент	Л	Струму	Т
		Елемент І-НЕ	А
		Елемент АБО-НЕ	Е
		Елемент І	І
		Елемент АБО	Л
		Елемент НЕ	Н
Модулятор	М	Елемент І-АБО	С
		Амплітудний	А
		Частотний	С
		Фазовий	Ф
Набір елементів	Н	Імпульсний	І
		Діоди	Д
		Транзистори	Т
		Резистори	Р
Перетворювач інформації	П	Конденсатори	Е
		Частоти	С
		Напруги	Н
		Код-аналог	А
Елемент	Р	Аналог-код	В
		Матриця нагронадживальна:	М

		<i>ПЗП</i>	<i>B</i>
<i>Схема порівняння</i>	<i>C</i>	<i>Амплітуди</i>	<i>A</i>
		<i>Часу</i>	<i>B</i>
		<i>Частоти</i>	<i>C</i>
		<i>Фази</i>	<i>Ф</i>
<i>Тригер</i>	<i>T</i>	<i>Типу Ж</i>	<i>B</i>
		<i>RS</i>	<i>P</i>
		<i>D</i>	<i>M</i>
		<i>T</i>	<i>T</i>

Продовження таблиці 2.5.2

<i>Підсилювач</i>	<i>У</i>	<i>Високої частоти</i>	<i>B</i>
		<i>Низької частоти</i>	<i>H</i>
		<i>Постійного струму</i>	<i>T</i>
		<i>Операційний</i>	<i>Д</i>
<i>Фільтр</i>		<i>Верхніх частот</i>	<i>B</i>
		<i>Нижніх частот</i>	<i>H</i>
		<i>Смуговий</i>	<i>E</i>
<i>Багатофункціональні схеми</i>	<i>Ч</i>	<i>Аналогові</i>	<i>A</i>
		<i>Цифрові</i>	<i>Л</i>

2.5.1 Конструктивні елементи гібридних інтегральних мікросхем

Гібридні ІС характеризуються тим, що пасивні елементи реалізують за допомогою плівок (золотих чи алюмінієвих), які наносяться на монолітну схему. При такій технології для ІС використовують МДН-транзистори, що дозволяє отримати їх швидкодію до 20 наносекунд.

В сучасних гібридних ІС пасивні елементи (резистори, конденсатори, контактні площадки і внутрішньосхемні з'єднання) виготовляють шляхом послідовного нанесення на основу плівок із різних матеріалів, а активні елементи (діоди, транзистори та ін.) виконують у вигляді окремих (дискретних) навісних деталей (в мініатюрному або без корпусному оформленні).

В залежності від товщини плівок розрізняють товсто плівкові (1...25 мкм) і тонко плівкові (до 1 мкм) гібридні мікросхеми. Суттєвим недоліком товсто плівкових мікросхем є нестабільність номінальних значень величин пасивних мікроелементів і відносно низька густина монтажу. Тонкі плівки забезпечують густину монтажу до 200 елементів/см³ і високу точність елементів.

- Основними конструктивними елементами гібридної ІМС є:
- основа, на якій розміщуються пасивні та активні елементи;
 - пасивна частина з планарним (в одній площині) розміщенням плівкових провідників, контактних площадок, резисторів і конденсаторів;
 - навісні без корпусні напівпровідникові прилади з гнучкими дротяними выводами або жорстко фіксованою системою выводів;
 - навісні мініатюрні пасивні елементи (конденсатори великих номіналів, трансформатори, дроселі), які застосовуються як виключення;
 - корпус для герметизації мікросхеми і закріплення її выводів.

2.5.2 Пасивні елементи

Основа. В якості матеріалу основи найбільш часто використовують скло та кераміку. Вибір цей обумовлений малою питомою електропровідністю, хімічною стійкістю і високою діелектричною густиною. Для забезпечення гарного зчеплення плівок з основою останні полірують, травлять в кислотах та промивають. Крім того, перед нанесенням плівок основи очищують шляхом іонного бомбардування безпосередньо в установці для напилення. Основа для нанесення гібридної ІМС являє собою чотирикутну пластину довжиною *l*, шириною *b* і товщиною *s*. Встановлені наступні розміри основ:

l, мм ... 48 48 24 16 16 12 6 4

b, мм ... 60 30 30 20 10 10 5 2,5

Товщина основ 0,6; 1,0; 1,6 мм з відхиленням 0,06 мм.

Провідники і контактні площадки. Провідники служать для з'єднання окремих елементів мікросхеми один з одним, а контактні площадки - для з'єднання плівкових і навісних елементів з провідниками, а також для зв'язку з зовнішніми виводами мікросхеми.

Основними вимогами до плівкових провідників і контактних площадок є: висока електрична провідність; гарна адгезія до основи і гарна здатність до пайки або зварки; малий перехідний опір між провідним шаром та іншими елементами мікросхеми; хімічна інертність по відношенню до інших шарів.

Для напилення провідників і контактних площадок рекомендуються золото, срібло, мідь, алюміній і нікель. Для покращення адгезії струмопровідних матеріалів до основи напилюють підшар хрому, титану, молібдену, заліза та ін.

В конструкції плівкової мікросхеми часто виникає необхідність перетину одного провідника іншим. Перетин являє собою, по суті, мікро конденсатор, так як між провідниками виникає паразитний ємнісний зв'язок. Для ізоляції між провідниками застосовується в більшості випадків моно окисел кремнію і халькогенідне скло. Кожен перетин повинен мати опір провідників не більше 0,8 Ом/см, а ємність не більше 2 пФ.

Контактним площадкам рекомендується надавати найбільш просту форму, наприклад Г-, Т- і П-подібну.

Резистори. Плівкові резистори виготовляють із матеріалів, що мають високий електричний опір і низький температурний коефіцієнт опору (ТКО): хрому, ніхрому, танталу, металокераміки, спеціальних провідних фарб на основі вуглецю та ін.

Зазвичай плівкові резистори мають прямокутну форму.

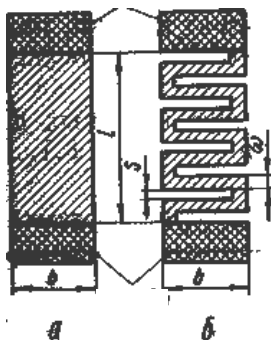


Рис. 2.5.2. Основні конфігурації плівкових резисторів

На рис. 2.5.2. показані дві основні конфігурації плівкових резисторів. Для отримання стабільних плівкових опорів товщина плівки береться 0,01 ... 1 мкм. Дуже тонкі плівки (0,005 мкм) значно змінюють свої параметри в процесі виготовлення і експлуатації схеми. Крім того, наступна дія повітря викликає поверхневе їх окислення, яке приводить до зменшення опору. В більш товстих плівках це окислення менше. Однак плівки товщиною більш 1 мкм не забезпечують достатньо міцного зчеплення з основою.

Діапазон номіналів плівкових резисторів ледить в межах 50 Ом ... 10 МОм.

В процесі наладки мікросхем в деяких випадках необхідно змінити номінал резистора. Для цього на резистивну плівку напилюють перемички, число і розміщення яких залежить від умов наладки.

Плівкові резистори можуть працювати при напругах до декількох сотень вольт на частотах до декількох сотень мегагерц.

Конденсатори. Плівкові конденсатори зазвичай складаються з трьох шарів: двох металевих обкладинок (електродів) та діелектричного шару між ними (рис.2.5.3).

В якості матеріалів для обкладинок частіше всього використовують алюміній, а також золото, срібло, тантал, мідь та ін. діелектриками служать моно окисел кремнію, германію, п'ятиокисел танталу, боросилікатне і алюмосилікатне скло і т.д.

Сучасні тонко плівкові конденсатори дозволяють отримувати ємність від одиниць пікофарад до мікрофарад на робочі напруги до 20 В. підганяти величину ємності можна механічно, використовуючи специфічний для плівкових схем процес – випалювання. За необхідності отримання великих ємностей використовують дискретні конденсатори.

Індуктивності. В тонкоплівкових схемах застосовують плівкові індуктивності у вигляді одношарової спіралі. В якості матеріалу спіралі зазвичай використовують золото, так як воно має

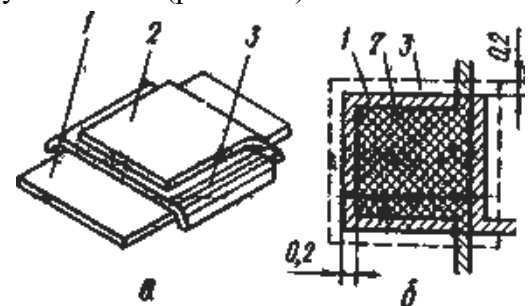


Рис.2.5.3. Плівковий конденсатор: а – загальний вигляд; б – креслення (1 – нижня обкладинка; 2 – верхні обкладинка; 3 – діелектрику)

гарну електропровідність. Такі спіралі мають дуже малу індуктивність (одиниці мкГн/см³). При виготовленні більших індуктивностей важко одночасно задовольнити дві протилежні вимоги – зменшити габарити і отримати високу добротність. Найбільш нормальна форма індуктивності – квадратна. Подібна індуктивність містить, наприклад, на 10 мкГн, містить 46 витків шириною 0,05 мм кожний при відстані між витками 0,1 мм; розмір котушки 15x15 мм. Оскільки виготовлення тонко плівкових індуктивностей пов'язано з великими труднощами, в тонко плівкових схемах застосовують головним чином дискретні мікро котушки індуктивності з осердям із порошкового заліза або із спеціальних феритів.

2.5.3 Активні елементи – безкорпусні напівпровідникові прилади

В активних інтегральних мікросхемах в якості активних елементів застосовують дискретні напівпровідникові прилади. За способом герметизації вони діляться на без корпусні та корпусні. Так як без корпусні прилади мають малі габарити і масу, застосування їх в гібридних інтегральних схемах слід рахувати найбільш цілісним і перспективним.

За способом монтажу в мікросхему без корпусні напівпровідникові прилади можна розділити на дві групи: прилади з гнучкими виводами і прилади з жорсткими об'ємними виводами.

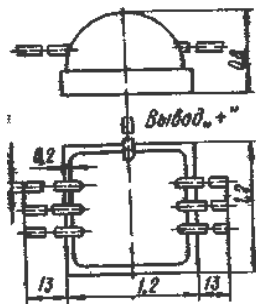


Рис. 2.5.4. Діодна матриця з гнучкими виводами

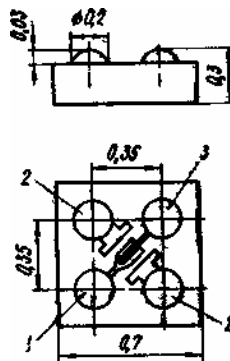


Рис. 2.5.5. Схема установки транзистора з жорсткими сферичними виводами:
1 – вивід бази;
2 – вивід колектора;
3 – вивід емітера

На рис. 2.5.4 показана одна із типових конструкцій без корпусного приладу (діодної матриці) з гнучкими виводами. Діаметр дріотяних виводів складає зазвичай 30-40 мкм. Виводи з контактними площадками під'єднуються різними методами, головними з яких є термокомпресійний і ультразвуковий. Метод термокомпресії базується на одночасній дії тепла і тиску на область контакту. Метод ультразвукового зварювання базується на одночасній дії коливань ультразвукової частоти, які збуджуються в деталях, що зварюються, і тиску в області зварювання. Вібращі високої частоти, руйнуючи плівку окиселу на поверхні розділу металів в області зварювання, сприяють підвищенню

якості зварного з'єднання.

Недолік конструкції без корпусних приладів є в важкості автоматизації процесів установки приладів в мікросхему. Тому при зборці активних елементів широко використовуються прилади з жорсткими виводами. Для них характерна відсутність з'єднувальних провідників, що дозволяє автоматизувати процес зварювання мікросхем і підвищити надійність виробів. На рис.2.5.5. схематично показана структура установки транзистора з жорсткими сферичними виводами. В якості матеріалу виводів застосовують мідь і срібло. Для уникнення дії зовнішніх факторів кристали напівпровідника в без корпусних приладах покривають спеціальним захисним покриттям (лаки, емалі, смоли, компаунди та ін.).

Контрольні питання і вправи

1. Чим відрізняються один від іншого визначення понять «мікросхема», «інтегральна мікросхема», «гібридна інтегральна мікросхема», «напівпровідникова інтегральна мікросхема», «велика інтегральна мікросхема»?
2. Назвіть основні конструктивні елементи гібридної ІМС.
3. Вкажіть вимоги до основ гібридних інтегральних мікросхем.
4. Які матеріали використовуються для створення провідників та контактних площадок гібридних інтегральних мікросхем?
5. Як виконуються резистори гібридних інтегральних мікросхем?
6. Як виготовляються котушки, дроселі і трансформатори в гібридних інтегральних мікросхемах?

2.6 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

2.6.1 Принцип виготовлення напівпровідникових ІМС

Напівпровідникові (монолітні) ІС виробляють на спільній для всіх елементів напівпровідниковій основі (рис. 2.5.6), переважно — це багато-кристальний кремній. При такій технології всі елементи формуються в одному технологічному циклі. Використання ІС дає змогу уникнути шкідливої роботи (паяння окремих елементів) й разом з тим забезпечити надійність схем. Основна перевага — це мала споживана потужність (до 200 мВт, а для логічних ІС — до 100 мкВт), а також висока тривалість роботи — до 10^8 годин. Крім того, досягається значне зменшення габаритів і вартості готової продукції.

Основний принцип отримання напівпровідникових ІМС заключається в тому, що вони створюються в єдиному технологічному циклі, тобто всі активні і пасивні елементи цих схем формуються одночасно на одній і тій же несучій конструкції – основі.

В основу створення напівпровідникових ІМС покладені груповий метод і планарна технологія. Суть групового методу є в тому (дискретна техніка), що на пластині напівпровідника одночасно виготовляється множина однотипних напівпровідникових приладів.

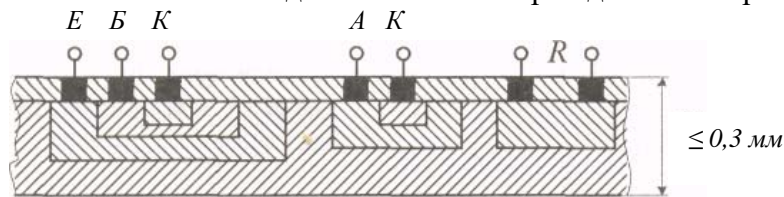


Рис. 2.5.6. Приклад структури напівпровідникової ІС

Далі пластина розрізається на сотні окремих кристалів, які містять по одному приладу даного типу. Отримані прилади поміщують в корпуси з зовнішніми виводами і в такому вигляді поступають до розробника апаратури. В інтегральній техніці на вихідній напівпровідниковій пластині одночасно виготовляються не окремі прилади, а цілі функціонально закінчені вузли, які складаються із транзисторів, діодів, конденсаторів та ін. ці елементи з'єднуються один з одним не провідниками і пайкою, а короткими тонкими металевими смужками, що напильються на поверхню пластини. Для цього комутаційні електроди всіх елементів виводяться на поверхню пластини і розміщуються в одній площині в одному плані. Таку можливість забезпечує спеціальна планарна технологія виготовлення напівпровідникових ІМС.

Напівпровідникові інтегральні схеми в основному виготовляються з кремнію.

Основними процесами створення компонентів напівпровідникових інтегральних схем є технологічні процеси створення р-п-переходів, за допомогою яких формуються як активні, так і пасивні компоненти інтегральних схем – транзистори, діоди, резистори, конденсатори і т.д. такими процесами є дифузія домішків в кремній і епітаксильне нарощення монокристалічних шарів кремнію на кремнієву основу, яка має протилежний тип провідності. У відповідності з цим за технологією виготовлення сучасні інтегральні схеми можна розділити на схеми, що виготовляються з застосування лише процесів дифузії, і схеми, при створенні яких використовуються як процеси дифузії, так і процеси епітаксильного нарощування.

Технологія виготовлення інтегральних схем першого типу отримала назву **планарної**, а другого типу – **епітаксильно-планарної**.

Особливий тип напівпровідникових інтегральних схем складають мікросхеми, виконані на так званій **сумісній** технології. В цьому випадку активні елементи виготовляються по планарній або планарно-епітаксильній технології в об'ємі напівпровідникового кристалу, а пасивні елементи – методами тонко плівкової технології на його поверхні.

2.6.2 Великі ІМС

Великою інтегральною схемою називається така схема, в корпусі якої на одній пластині (або в її об'ємі) міститься велика кількість (10^2 і більше) схемних комірок, з'єднаних між собою в складну функціональну схему.

Головна мета переходу до ВІС – отримання більш високих якісних показників і більшої надійності електронних пристроїв при менших затратах. Підвищення надійності ВІС обумовлено, головним чином, застосуванням більш якісних компонентів, зменшенням кількості зварних

з'єднань і кількості технологічних операцій. Наприклад, з'єднання кристал – вивід корпусу – друкований провідник – вивід корпусу – кристал замінюється в ВІС одним напилим на пластину тонко плівковим з'єднанням.

За технологічною ознакою розрізняють гібридні і напівпровідникові (монолітні) ВІС. Для побудови гібридних ВІС застосовують багатошарову товсто- і тонко плівкову розводку, яка дозволяє здійснити комутацію без корпусних інтегральних мікросхем і плівкових пасивних елементів. При виготовленні напівпровідникових ВІС застосовують базові кристали в вигляді матриць біполярних або польових транзисторів.

Контрольні питання і вправи

1. Які принципи покладені в основу створення напівпровідникових ІМС?
2. Як пояснити термін «планарна технолдогія» стосовно до виготовлення напівпровідникових ІМС?
3. Дайте характеристику сучасних ВІС.

2.7 ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

2.7.1 Елементна база мікроелектроніки – світловипромінювачі, фотоприймачі

Оптоелектроніка – один із найбільш розвинених напрямків в функціональній мікроелектроніці, оскільки оптичні і фотоелектричні явища достатньо добре вивчені, а технічні засоби, що базуються на цих явищах, довгий час використовуються в електроніці. Тим не менш, оптоелектроніка як самостійний науково-технічний напрямок виникла порівняно недавно, а її досягнення нерозривно пов'язані з розвитком сучасної мікроелектроніки.

Первинно оптоелектроніка вважалась порівняно вузькою галуззю електроніки, що вивчає лише напівпровідникові світловипромінювачі та фотоприймачі. Тепер в поняття «оптоелектроніка» включають такі напрямки, як лазерна техніка, волоконна оптика, голографія та ін.

Мікроелектронні світловипромінювачі були розглянуті в попередніх параграфах даного підручника. В даному параграфі ми розглянемо прилади, які працюють на основі фотоефекту – фотоелектричні прилади.

❖ **Фотоелектричний прилад** – перетворювач променевої енергії, під дією якої змінюються властивості робочого середовища, що міститься в приладі.

Під променевою розуміють енергію електромагнітного випромінювання широкого діапазону частот. Однак в більшості випадків фотоелектронні прилади є приймачами електромагнітних випромінювань оптичного діапазону, до якого відносяться ультрафіолетове, видиме і інфрачервоне випромінювання довжиною хвилі від $5 \cdot 10^{-9}$ до 10^{-3} м. Ультрафіолетови випромінювання лежить в діапазоні довжин хвиль $5 \cdot 10^{-9} \dots 4 \cdot 10^{-7}$, інфрачервоне – $7,6 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-3}$ м.

Розрізняють два види фотоефекту:

❖ **Внутрішній фотоефект** – збудження електронів речовини, тобто перехід їх на більш високий енергетичний рівень під дією випромінювання, дякуючи чому змінюється концентрація вільних носіїв зарядів, а отже, і електричні властивості речовини.

❖ **Зовнішній фотоефект** – це фотоелектронна емісія, тобто вихід електронів за межі поверхні речовини під дією випромінювання.

Внутрішній фотоефект спостерігається лише в напівпровідниках і діелектриках і проявляється у вигляді зміни електричної провідності в однорідних напівпровідниках або створення ЕРС в неоднорідних напівпровідниках (р-п структур). Напівпровідникові прилади з однорідною і неоднорідною структурами, в яких використовується внутрішній фотоефект, служать в якості фотоелектричних напівпровідникових приймачів випромінювання. Про такі прилади (фотодіод, фототранзистор, фото тиристор, фоторезистор) ми розповідали в попередніх розділах.

Фотоелектронна емісія в більшій чи меншій мірі може відбуватися в будь-якій речовині. Зовнішній фотоефект лежить в основі роботи електровакуумних фотоелектричних приладів –

електронних і газорозрядних фотоелементів, а також фотоелектронних помножувачів.

Оптоелектронні прилади складають собою групу напівпровідникових приладів; вони складаються із випромінювача і приймача електромагнітного випромінювання. В якості випромінювача зазвичай служить елемент, що перетворює електричну енергію в енергію електромагнітного випромінювання, а приймачем є фоточуттєвий елемент, що перетворює енергію електромагнітного випромінювання в електричну енергію.

Електровакуумні фотоелементи. Електровакуумний (електронний або іонний) фотоелемент являє собою діод, у якого на внутрішній поверхні скляного балону нанесений фотокатод у вигляді тонкого шару речовини, що імітує фотоелектрони. Анодом зазвичай є металеве кільце, яке не заважає попаданню світла на фотокатод. В електронних фотоелементах створений високий вакуум, а в іонних знаходиться інертний газ, наприклад аргон, під тиском в декілька сотень паска лей (декілька міліметрів ртутного стовпа). Катоди зазвичай застосовуються сурмяно-цезієві або срібляно-киснево-цезієві.

Будова електронного фотоелемента показана на рис.2.7.1, а; схема ввімкнення – на рис. 2.7.1,б.

В колі аноду А знаходиться джерело постійної напруги $E_a=150-200$ В і навантаження R. При освітленні фотоелемента його катод К починає емітувати електрони і в анодному колі виникає струм, пропорційний інтенсивності світлового потоку Φ . Струм прийнято називати фотострумом

$$I_{\Phi} = S \cdot \Phi, \quad (2.7.1)$$

де S – світлова чуттєвість фотокатода, мкА/лм;

Φ – світловий потік, лм.

При зміні світлового потоку Φ пропорційно змінюється фотострум I_{Φ} , а вихідна напруга

$$U_R = RI = SR\Phi, \quad (2.7.2)$$

Таким чином в фотоелементі здійснюється керування вихідною напругою за допомогою світла.

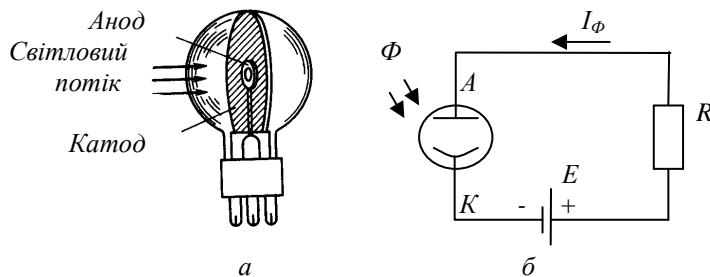


Рис. 2.7.1. Будова електровакуумного фотоелемента (а) і схема його ввімкнення (б)

Основними електричними параметрами фотоелементів є чуттєвість, максимально допустима анодна напруга і темновий струм.

Світлова чуттєвість фотокатода S характеризує фотострум в мікроамперах, що викликається світловим потоком в 1 лм. Для підвищення чуттєвості фотокатода його виготовляють із матеріалів, які мають малу роботу виходу електронів під дією квантів світла на поверхню фотокатода.

У відсутність потоку випромінювання через фотоелемент проходить невеликий темновий струм, його величина визначається головним чином термоелектронною емісією фотокатода (навколишньою температурою і напругою аноду).

Порівняно з електронним в газорозрядному фотоелементі світлова чуттєвість фотокатода збільшується майже в 10 раз за рахунок несамотійного газового розряду.

Властивості фотоелементів відображаються їх характеристиками. Анодні (вольт-амперні) характеристики електронного фотоелемента

$$I_{\Phi} = f(U_a) \text{ при } \Phi = const,$$

зображені на рис. 2.7.2,а, показують різко виражений режим насичення. У іонних фотоелементів такі характеристики спочатку йдуть майже та само, як у електронних фотоелементів, але при подальшому збільшенні анодної напруги внаслідок іонізації газу струм значно зростає (рис.2.7.2,б), що оцінюється коефіцієнтом газового підсилення, який може дорівнювати від 5 до 12.

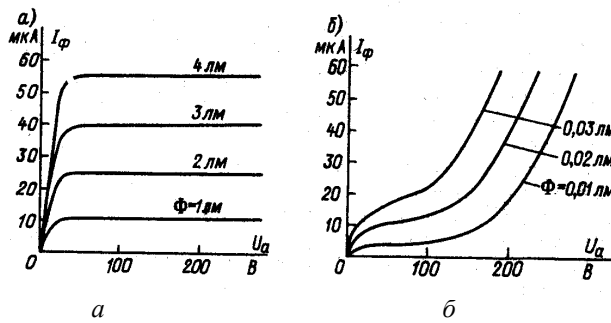


Рис.2.7.2. Анодні характеристики електронного (а) та іонного (б) фотоелементів

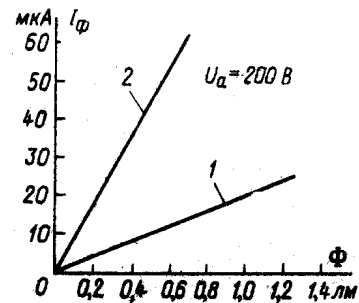


Рис. 2.7.3. Енергетичні характеристики електронного (1) та іонного (2) фотоелементів

Енергетичні характеристики електронної і іонної фотоелементів, які дають залежність $I_{\phi} = f(\Phi)$ при $U_a = \text{const}$, показані на рис 2.7.3.

Недоліками фотоелементів є неможливість мікромініатюризації і досить високі анодні напруги (десятки і сотні вольт). Тому в даний час ці фотоелементи в багатьох видах апаратури замінені напівпровідниковими приймачами випромінювання.

Фотоелектронні помножувачі. Фотоелектронний помножувач – електровакуумний прилад, в якому електронний фотоелемент доповнений пристроєм для підсилення фотоструму за рахунок вторинної електронної емісії.

Принцип роботи фотоелектричного помножувача показано на рис.2.7.4. Світловий потік Φ викликає вторинну емісію із фотокатоду ФК. Фотоелектрони під дією прискорюючого електричного поля направляються на електрод D_1 , що називається дінодом. Він має позитивний потенціал відносно катоду, тобто є анодом по відношенню до катоду і одночасно грає роль вторинно-електронного емітера. Дінод виробляється із металу з достатньо сильною і стійкою вторинною електронною емісією. Тому струм первинних електронів I_{ϕ} , що прямує з фотокатоду, вибиває із діноду D_1 вторинні електрони, кількість яких в σ раз більший кількості первинних електронів (σ – коефіцієнт вторинної емісії діноду, зазвичай дорівнює декільком одиницям). Таким чином, струм вторинних електронів з першого діноду $I_1 = \sigma I_{\phi}$. струм I_1 направляється на другий дінод, який має більш високий потенціал, ніж дінод D_1 . тоді із діноду D_2 за рахунок його вторинної емісії вилітає струм електронів I_2 , який в σ раз більший струму I_1 (для спрощення будемо вважати, що у всіх дінодів коефіцієнт вторинної емісії однаковий), тобто $I_2 = \sigma I_1 = \sigma^2 I_{\phi}$. в свою чергу струм I_2 направляється на третій дінод D_3 , у якого додатній потенціал ще вище, і від того діноду відходить струм електронів $I_3 = \sigma I_2 = \sigma^2 I_1 = \sigma^3 I_{\phi}$ і т.д.

З останнього, n-го, діноду D_n електронний струм I_n направляється на анод, і тоді струм аноду $I_a = \sigma^n I_{\phi}$. таким чином, теоретично коефіцієнт підсилення струму $k_i = \sigma^n$. Практично підсилення менше, так як не вдається всі вторинні електрони, вибиті із даного діноду, направити на наступний дінод. Щоб по можливості більша кількість вторинних електронів було використано, розроблені конструкції фотоелектронних помножувачів з різною формою електродів і різним їх взаємним розміщенням. Для фокусування потоку вторинних електронів з даного діноду на наступний застосовують, як правило, електричне поле.

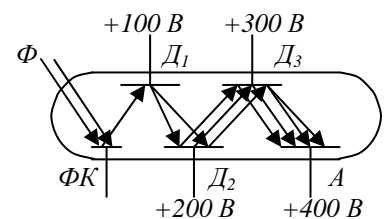


Рис. 2.7.4. Принцип будови та роботи фотоелектронного помножувача

Основними параметрами фотоелектронних помножувачів є область спектральної чутливості (діапазон довжин хвиль), в якій можна застосовувати даний фото помножувач, кількість ступенів множення, загальний коефіцієнт підсилення струму, напруга живлення, інтегральна чутливість, темновий струм.

Фотоелектронні помножувачі мають дуже малу інерційність і можуть працювати на досить високих частотах. Їх можна застосовувати для реєстрації світлових імпульсів, які слідує один за одним через наносекундні проміжки часу. Фото помножувачі застосовують в різних областях науки і техніки: в астрономії, для вимірювання малих світлових потоків, для спектрального аналізу і т.д.

2.7.2 Оптрони

Оптоелектроніка базується на електронно-оптичному принципі отримання, передачі, обробки і зберігання інформації, носієм якої є електричнонейтральний фотон. Суміщення в оптоелектронних функціональних пристроях двох способів обробки і передачі інформації – оптичного і електричного – дозволяє досягати величезної швидкодії, високої густини розміщення інформації, що зберігається, створення високоефективних засобів відображення інформації. Дуже важливою перевагою елементів оптоелектроніки є те, що вони оптично пов'язані, а електрично ізольовані між собою. Це забезпечує надійну співпрацю різних оптоелектронних кіл, сприяє однонаправленості передачі інформації. виготовлення напівпровідникових елементів оптоелектроніки – оптронів – сумісно з інтегральною технологією, тому їх створення може бути включено в єдиний технологічний цикл виробництва інтегральних мікросхем.

Найпростіший оптрон являє собою чотирьохполюсник (рис.2.7.5.), що складається з трьох елементів: джерела випромінювання (фото випромінювача) 1, світловоду 2 і приймача випромінювання (фотоприймача) 3, які заключні в герметичний світлонепроникний корпус.

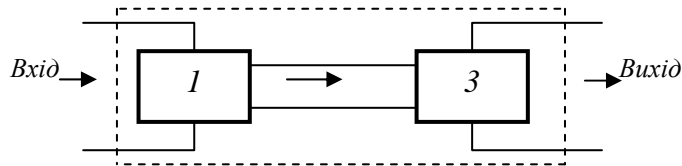


Рис. 2.7.5. Структурна схема оптрону

Поєднання фотовипромінювача і фотоприймача в оптроні отримало назву оптоелектронної пари. Найбільш розповсюдженими випромінювачами є світло діоди, виконані на основі арсеніду галію, фосфіду галію, фосфіду кремнію, карбіду кремнію та ін. Вони мають високу швидкість, мініатюрні і достатньо надійні в роботі. За своїми спектральними характеристиками світло діоди гарно узгоджуються з фотоприймачами, виконаними на основі кремнію. Оскільки схемотехнічні можливості оптрона визначаються головним чином характеристиками фотоприймача, цей елемент і дає назву оптрону в цілому. До основних різновидностей оптронів відносяться: резисторні (фотоприймач – фоторезистор); діодні (фотоприймач – фотодіод); транзисторні (фотоприймач – фото транзистор); тиристорні (фотоприймач – фототиристор).

Схематичне зображення вказаних оптронів показано на рис. 2.7.6.

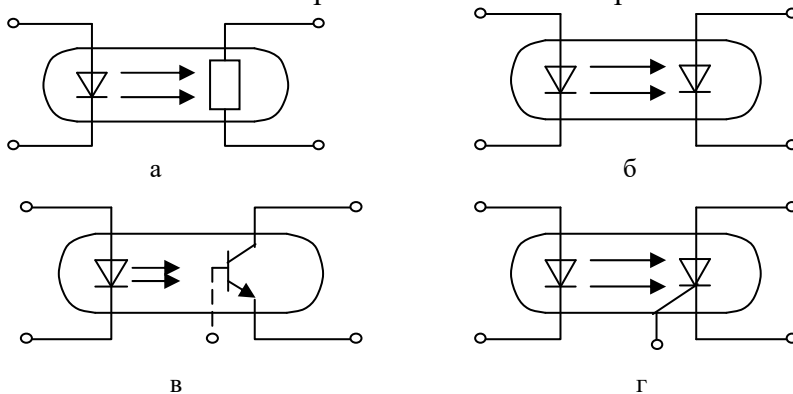


Рис. 2.7.6. Схематичні зображення оптронів: а – резисторного; б – діодного; в – транзисторного; г - тиристорного

В залежності від сукупності характеристик оптронної пари, що використовується, оптрон може виконувати різні функції в електронних колах: перемикання, підсилення, узгодження, перетворення, індикація та ін.

Недоліки оптронів:

- відносно велика споживана потужність, із-за того, що двічі відбувається перетворення енергії, причому ККД цих перетворень невеликий;
- значний вплив температури і радіації на властивості оптронів;
- погіршення параметрів з часом;
- порівняно високий рівень власних шумів;
- необхідність застосування гібридної технології замість більш зручної і досконалої планарної.

Всі ці недоліки поступово усуваються в процесі розвитку оптронної техніки.

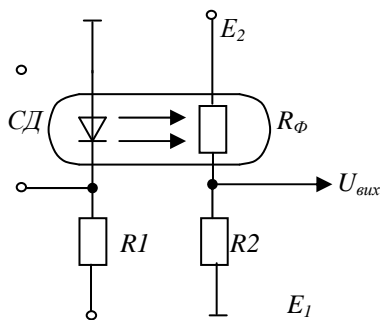


Рис. 2.7.7. Застосування оптронів

В якості прикладу технічного використання оптронів на рис.2.7.7. приведена схема, яка дозволяє реалізувати специфічні властивості цих приладів. Резисторний оптрон, ввімкнений за даною схемою, може бути використаний в якості керованого резистивного дільника напруги. Під дією входньої напруги змінюється прямий струм фотодіоду і його випромінювання. Відповідно змінюється і опір фото резистора, а отже, розподіл напруги джерела E_2 на фоторезисторі і вихідному (навантажувальному) резисторі R_2 .

Подібний керований резистор може бути використаний в різних електронних схемах, наприклад, для дистанційного керування коефіцієнтом підсилення в підсилювачах.

Оптоелектронні пристрої знаходять широке застосування в обчислювальній техніці (особливо голографічні пристрої).

Контрольні питання та вправи

1. Яка різниця між зовнішнім та внутрішнім фотоефектами?
2. Назвіть прилади, що працюють на основі внутрішнього фотоефекту, зовнішнього?
3. Що собою являє електровакуумний фотоелемент?
4. Чим відрізняється електровакуумний фотоелемент від іонного?
5. Що таке фотопомножувач? На чому базується його принцип дії?
6. Що собою являє оптоелектроніка?
7. Дайте визначення оптрону та отопарі.
8. Принцип дії оптрона?
9. Види оптронів?
10. Недоліки оптронів?

2.8 ПРИЛАДИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

2.8.1 Електронно-променеві трубки

Електронно-променеві прилади зазвичай мають форму трубки, витягнутої в напрямі електронного променя, який формується всередині неї, тому їх часто називають **електронно-променевими трубками (ЕПТ)**.

В залежності від способу фокусування і відхилення електронного променя розрізняють трубки:

- 1) з електростатичним керуванням (електростатичні), в яких електронний промінь фокусується і відхиляється електричним полем;
- 2) з електромагнітним керуванням (електромагнітні), в яких електронний промінь фокусується і відхиляється магнітним полем;
- 3) з комбінованою системою фокусування і відхилення електронного променя.

За функціональним призначенням ЕПТ діляться на такі основні групи:

- 1) *осцилографічні трубки*, які служать для спостереження та зняття осцилограм електричних сигналів. Ці трубки в основному застосовуються у вимірвальній техніці;
- 2) *індикаторні трубки*, призначені для реєстрації електричних сигналів в радіолокаційних і радіонавігаційних пристроях;
- 3) *кінескопи*, призначені для перетворення електричного телевізійного сигналу у видиме зображення;
- 4) *запам'ятовуючі трубки*, які використовуються для запису і зберігання інформації;
- 5) *знакодруючі трубки (карактрони)*, призначені для відтворення на екрані букв, цифр та інших знаків з наступною реєстрацією інформації фотографічним способом;
- 6) *електронно-оптичні перетворювачі (ЕОП)*, які використовуються для перетворення і підсилення оптичних зображень;

7) *електронно-променеві перемикачі*, призначені для комутації електричних кіл за допомогою електронного променя.

Особливу групу електронно-променевих приладів становлять *передаючі телевізійні трубки*, призначені для перетворення оптичного зображення в електричні телевізійні сигнали.

Електронно-променеві трубки з електростатичним керуванням. Будова і схема живлення осцилографічної електронно-променевої трубки з електростатичним фокусуванням і відхиленням електронного променя показані на рис.2.8.1.

Основними частинами трубки є:

- 1) *електронна гармата*, яка створює вузький електронний промінь, направлений вздовж вісі трубки;
- 2) *відхиляюча система*, призначена для зміни напрямку електронного променя;
- 3) *екран*, який має здатність світитися при бомбардуванні його електронами променя.

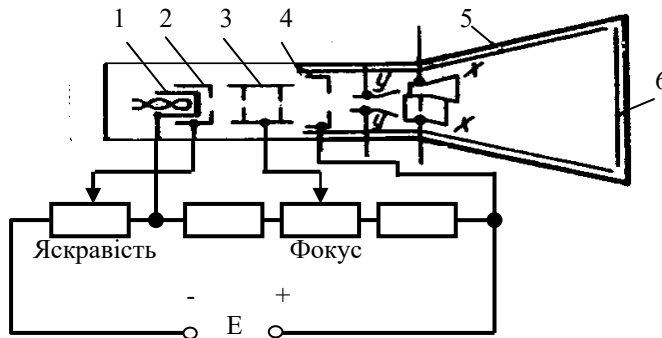


Рис. 2.8.1. Будова електронно-променевої трубки з електростатичним керуванням: 1 – катод; 2 – керуючий електрод (модулятор); 3 – перший анод; 4 – другий анод; 5 – аквадаг; 6 – екран

Для пояснення отримання зображення на екрані електронно-променевої трубки розглянемо наступне. Нехай є деяка синусоїдальна напруга $u_c = U_m \sin \omega t$. Якщо її підвести до вертикально відхиляючих (сигнальних) пластин, то під дією цієї напруги промінь буде переміщуватися вгору і вниз по екрану трубки, прокреслюючи вертикальну лінію. Для отримання на екрані зображення цієї синусоїди (замість вертикальної лінії), тобто для спостереження зміни напруги в часі, необхідно одночасно подати на горизонтально відхиляючі пластини напругу, яка відхиляє промінь в горизонтальному напрямі. Ця напруга зазвичай має пилкоподібну форму і називається *напругою розгортки*.

При одночасній подачі синусоїдальної напруги U_c , що досліджується, на сигнальні пластини YY і пилкоподібної напруги розгортки U_p на горизонтально відхиляючі пластини XX електронний промінь буде одночасно переміщуватися в вертикальному напрямі під дією U_c і в горизонтальному – під дією U_p . при цьому промінь буде прокреслювати на екрані розгорнуту в часі діаграму синусоїдальної напруги, що досліджується (рис.2.8.2).

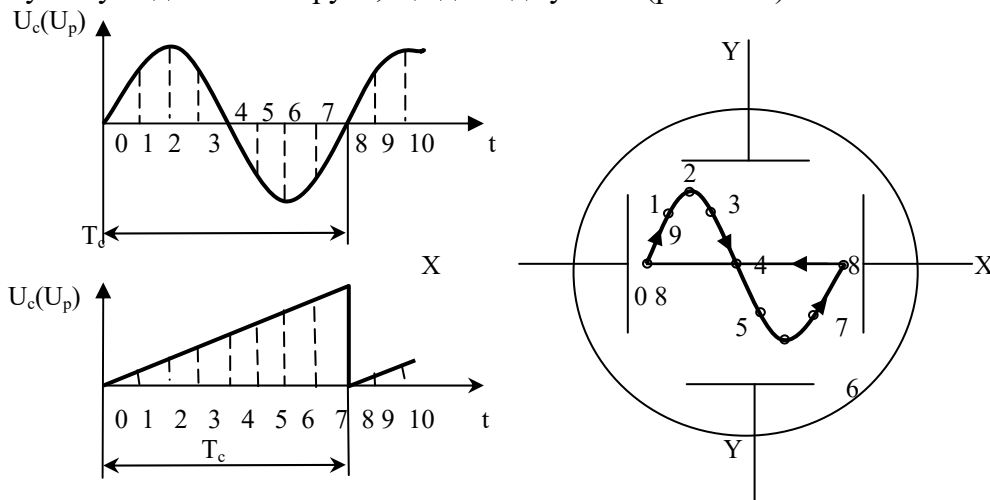


Рис. 2.8.2. Принцип отримання осцилограм синусоїдальної напруги, що досліджується

Основні параметри електронно-променевих трубок з електростатичним керуванням: *чуттєвість*, яка показує, на скільки міліметрів переміщується промінь по екрану при

зміні напруги на відхиляючих пластинах на 1 В (чуттєвість прийнято виражати в міліметрах на вольт);

яскравість свічення екрану – це сила світла, яке випромінюється на 1 м^2 поверхні екрану, що світиться, в напрямку спостерігача;

тривалість свічення – це час, необхідний для спадання від первісної величини до мінімального значення після закінчення електронного бомбардування екрану.

Електронно-променеві трубки з магнітним керуванням. Будова електронно-променевої трубки з магнітним фокусуванням і магнітним відхиленням показана на рис. 2.8.3.

Електронна гармата складається із катода К, модулятора М і анодів A_1 і A_2 (анод A_2 всередині балону з'єднаний з графітним покриттям – аквадагом). До фокусувальної котушки (ФК) підводиться постійна напруга, внаслідок чого через неї проходить постійний струм, який створює навколо котушки неоднорідне магнітне поле. Система відхилення складається із відхиляючих котушок (ВК), розміщених перпендикулярно одна одній і до вісі трубки. Ці котушки створюють магнітні поля, силові лінії яких взаємно перпендикулярні.

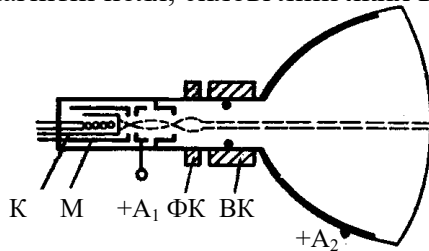


Рис. 2.8.3. Будова електро-променевої трубки з магнітним керуванням

Приймальна телевізійна трубка (*кінескоп*) являє собою скляну або метало скляну колбу, з якої викачане повітря. В горловині трубки міститься електронний прожектор, який складається із розжареного катода і системи аксиально-симетричних електродів, призначених для прискорення електронів і фокусування електронного променя.

Більшість кінескопів мають електростатичне фокусування і електромагнітне відхилення електронного променя. Відхилення електронного променя в кінескопах здійснюється пропусканням пилкоподібних струмів через стрічкові і кадрові відхиляючі котушки. Відхилення променя по горизонталі називається стрірковою розгорткою, а відхилення по вертикалі – кадровою розгорткою. При пропусканні пилкоподібних струмів через відхиляючі котушки на екрані трубки створюється *растр*, який складається із розміщених тісно одна до одної горизонтальних стрічок.

2.8.2 Буквенно-цифрові індикатори

В пристрої відображення інформації, поряд електронно-променевими трубками, знаходять широке застосування різноманітні індикатори, побудовані на різній фізичній основі. Можна виділити три етапи їх розвитку.

Перший етап розвитку характеризується невеликою кількістю фізичних явищ, що використовуються, відносно низькими значеннями ККД і яскравості. Великими габаритами, одноколірністю, високою керуючою напругою. Типовими представниками цього покоління є *газорозрядні і вакуумні* (розжарю вальні і електролюмінесцентні) індикатори, які все ще знаходять досить широке застосування в електронній апаратурі.

До типових представників *другого етапу розвитку* індикаторних приладів слід віднести *напівпровідникові* і індикатори *на рідких кристалах*, а також *багато розрядні люмінесцентні і плазмові моно дисплеї*. Ці прилади характеризуються високою яскравістю свічення, економічністю, підвищеною інформаційною ємністю, багатоколірністю, сумісністю з інтегральними мікросхемами.

Третій етап розвитку індикаторних приладів поки що можна намітити лише в найбільш загальному вигляді. Передбачається, що це будуть багатоколірні голографічні пристрої плоскої конструкції з достатньо великою (до 10^4 см^2) робочою площею, високою довговічністю і надійністю.

Газорозрядні індикатори. Буквенно-цифрові газорозрядні індикатори є іонними приладами тліючого розряду, в яких свічення газу в процесі іонізації використовується для оптичної індикації символів, що відображаються.

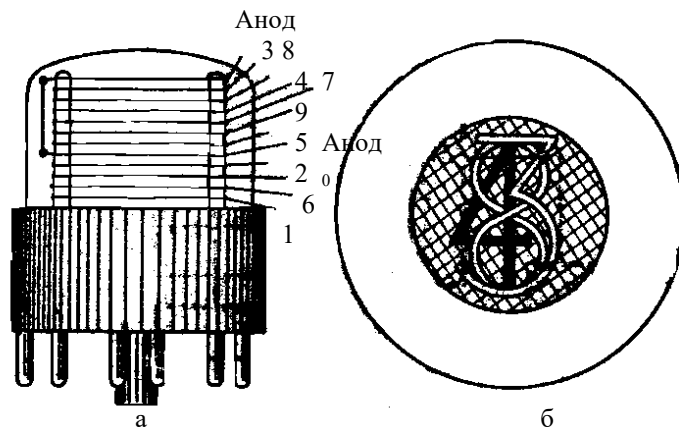


Рис. 2.8.4. Цифрова індикаторна лампа:
а – будова; б – вигляд зі сторони при ввімкненій цифрі

Цифрові і знакові газорозрядні індикатори (типу ИН-1, ИН-2, ИН-4 та ін.) конструктивно оформляються у вигляді скляного балону, заповненого неонем під тиском порядку $(4...5) \times 10^3$ Па. В балоні розміщені один або два сітчастих аноди і невелика кількість індикаторних дротяних катодів, виконаних у вигляді цифр (0...9), букв, символів та інших знаків (кома, мінус, плюс і т.д.). катоди індикатора мають самостійні виводи і розміщені один за одним на відстані біля 1 мм. Будова двоанодного цифрового індикатора показана на рис. 2.8.4,а. Подача напруги між анодом і вибраним катодом викликає тліючий розряд між цими електродами, в результаті чого символ починає світитися. Свічення спостерігається через балон приладу (рис.2.8.4,б).

Напруга живлення подається на анод відносно одного із катодів. Якщо напруга між анодом і одним із катодів буде дорівнювати напрузі запалу, в балоні спостерігається розряд. При катодна область відрізняється яскравим свіченням газу і у віконці добре проглядається відповідна цифра. Щоб висвітлити другу цифру, необхідно підімкнути інший катод за допомогою зовнішнього комутуючого пристрою.

Багаторозрядні плазмові дисплеї панельного типу. Один із варіантів такого індикатора представлений на рис.2.8.5.

Електронна частина індикатора створена двома металевими решітками (електродами), які формують зображення, які закріплюються на прозорих скляних пластинах. Пластини потім з'єднуються в гарячому стані, а створений плоска ємність вакуумується, заповнюється газом і герметизується. Екран являє собою керамічну мозаїчну пластину, в якій зроблено дуже багато отворів, які створюють ізольовані один від одного розрядні проміжки.

Проста плоска конструкція подібних індикаторів (їх товщина не перевищує декількох міліметрів) дозволяє створити на їх основі матричні екрани (плазмові панелі), які містять не менше $10^4...10^5$ елементарних газорозрядних комірок при роздільній здатності 10...20 лін/см. На екрані можуть висвітлюватись різні символи, образи і навіть картини.

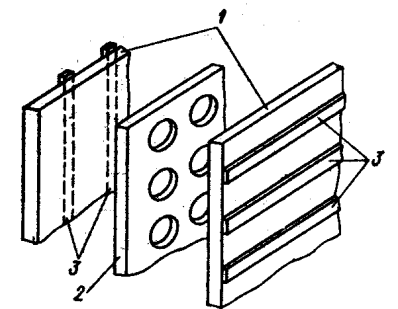


Рис. 2.8.5. Основні конструктивні елементи плазмової панелі

Вакуумні люмінесцентні індикатори. Основними недоліками газорозрядних індикаторів є необхідність використання для їх роботи порівняно високих напруг, які викликають запалення відповідного газового проміжку. Цей недолік усунений в вакуумних люмінесцентних індикаторах, які отримали досить широке розповсюдження. Такі індикатори ззовні нагадують мініатюрні електронні лампи. Вони являють собою трьохелектродні прилади: електрони, які випускаються нагрітим катодом, прискорюються в електричному полі керуючої сітки і бомбардують сегменти аноду, покриті люмінофором. Будова вакуумного люмінесцентного індикатора показана на рис.2.8.6,а.

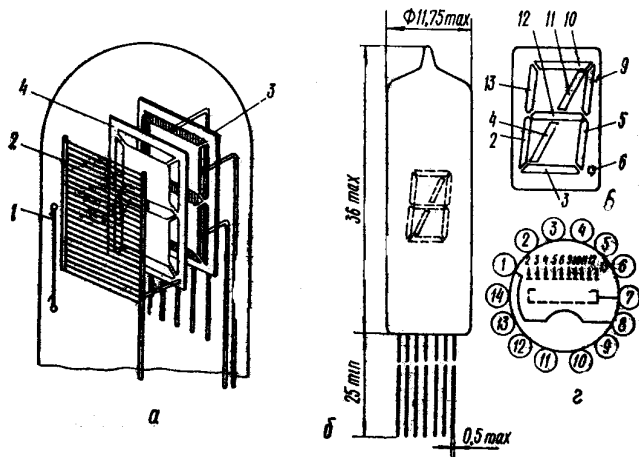


Рис. 2.8.6. Вакуумний люмінесцентний індикатор:
 А – будова; б – зовнішній вигляд, в – комбінація анодів; г – цоколівка

Всередині балону послідовно один за одним розташовані катод прямого розжарення 1, сітка 2 і декілька анодів – сегментів, розміщених в одній площині на загальній керамічній пластинці 3. Для більш чіткого обмежування контурів знак, що формується, аноди прикриваються металевою пластинкою (маскою) 4 з прорізами, розміщеними проти відповідних анодів.

В залежності від хімічного складу люмінофору знаки, що формуються. Можуть бути різного кольору і різної яскравості. Потужність, яка споживається вакуумними люмінесцентними індикаторами, досить невелика – доли ват, напруга живлення біля 10...30 В. Вакуумні люмінесцентні індикатори призначені для роботи в колах виведення інформації, відтворення знаків в обчислювальних і вимірювальних пристроях широкого застосування.

Зовнішній вигляд, комбінація анодів і цоколівка типового вакуумного люмінесцентного індикатора зображені на рис.2.8.6, б, в. г.

Напівпровідникові індикатори. В напівпровідникових індикаторах широке застосування знаходять світло діоди, які мають високу яскравість свічення, велику швидкодію і довговічність. Індикатори на світлодіодах виготовляються двох типів: сегментні (цифрові) і матричні (універсальні). Сегментні цифрові індикатори являють собою комбінацію визначеної кількості світло діодів, розташованих таким чином, що при подачі напруги на відповідні виводи висвітлюються цифри 0...9. Один індикатор, який містить сім діодів прямокутної форми, здатен висвічувати всі цифри і деякі букви. Індикатор, який містить шістнадцять діодів, дозволяє відтворювати практично необмежену кількість знаків.

Структура сегментного цифрового індикатора показана на рис.2.8.7, а. Це індикатор дозволяє відтворювати всі десять цифр і крапку. Схема розміщення діодів і їх з'єднань на платі (топология) показана на рис. 2.8.7, б (світло діод, який зображує крапку, обведений кружечком).

Матричний індикатор (рис.2.8.7, в) містить 35 діодів (7x5) і дозволяє відтворювати всі цифри, букви і знаки стандартного коду для обміну інформацією.

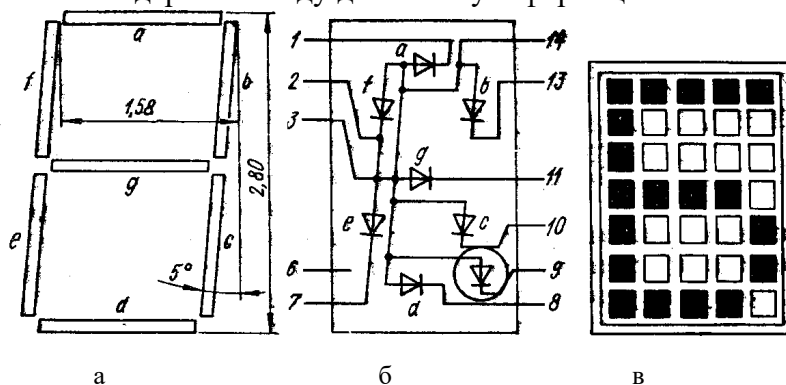


Рис. 2.8.7. Структура світлодіодних індикаторів:
 а, б – сегментного цифрового індикатора і його топология;
 в – матричного цифро-буквенного індикатора

В даний час розроблені світлодіоди з перебудовним кольором свічення. Зміна кольору досягнуто дякуючи формуванню в одному приладі двох р-п переходів, один із яких дозволяє отримати зелене свічення, а другий – червоне. При одночасному збудженні обох переходів випромінюється жовтий колір. Регулюючи за величиною струми через переходи, можна змінювати колір свічення від зеленувато-жовтого до червоно-жовтого.

Індикатори на рідких кристалах. Рідкими кристалами називають особливу групу речовин, які займають проміжне положення між твердим і рідким станом. Ці речовини складаються із ланцюгових, ниткоподібних органічних молекул, витягнутих у визначених напрямках (рис.2.8.8, а). При температурі 15...70°C під дією електричного поля орієнтація молекул змінюється, стає впорядкованою (рис.2.8.8, б), а в речовині виникає специфічний ефект динамічного розсіювання світла (як того, що проходить через речовину, так і відображеного). В результаті цього рідкий кристал, непрозорий в нормальному стані, починає пропускати світло, оскільки рідкі кристали самі не випромінюють світло, то вони зазвичай використовуються разом з яким-небудь зовнішнім джерелом світла.

Конструкція елементарної рідкокристалічної комірки досить проста (рис.2.8.9). Вона складається із двох скляних пластин 2, покритих з внутрішньої сторони шаром електропровідного матеріалу (3 і 5), і розташованого між ними рідкого кристалу 1 товщиною 8...25 мкм. Один із електродів (3) прозорий, інший (5) – може бути або прозорим, або дзеркальним, якщо індикатор працює на відображення. Електроди 3 і 5 розділяє ізоляційна прокладка 4.

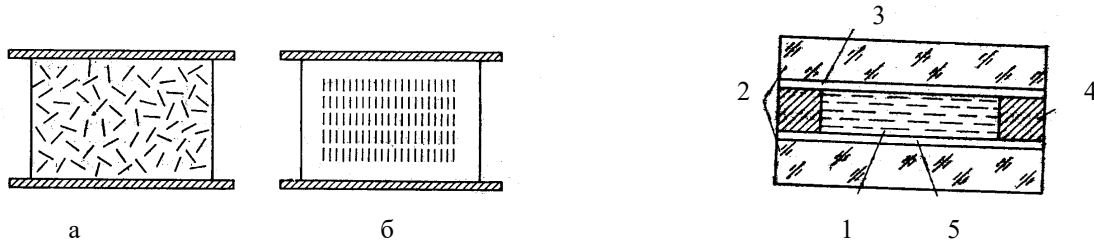


Рис.2.8.8. Рідкокристалічна комірка: а – невпорядкована структура без поля; б – впорядкована структура при наявності електричного поля

Рис. 2.8.9. Конструкція елементарного індикатора на рідкому кристалі (рідкокристалічної комірки)

Для індикації цифр використовуються елементи, які складаються із восьми сегментів (кожний сегмент – це елементарна рідкокристалічна комірка). Сім із них необхідні для відтворення десяти цифр, а восьмий сегмент призначений для індикації коми, яка відділяє десяткові дробі від цілих чисел. Для отримання зображення тієї чи іншої цифри необхідно подіяти за допомогою електричного струму на визначені цифрові сегменти.

На рис. 2.8.10 показаний багато розрядний індикатор на рідкокристалічних елементах.

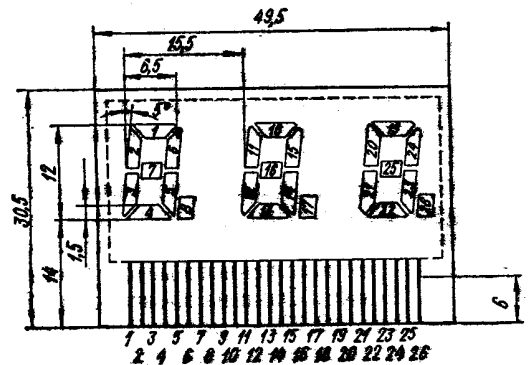


Рис. 2.8.10. Конструкція багаторозрядного рідкокристалічного індикатора (дисплея)

Контрольні питання і вправи

1. Поясніть способи формування зображення фігур на екрані ЕПТ в матричних індикаторах.
2. З якою метою використовують пристрої відображення інформації (дисплеї) в обчислювальній техніці?
3. Призначення букво-цифрових індикаторів?
4. Які фізичні явища покладені в основу роботи індикаторів на газорозрядних приладах?
5. Розкажіть про роботу світло діодів в якості випромінюючих елементів напівпровідникових індикаторів.
6. Які властивості мають рідкі кристали?
7. Яку конфігурацію слід придати рідкокристалічним коміркам для створення одно розрядного цифрового індикатора?

3 ОСНОВИ АНАЛОГОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМОТЕХНІКИ

3.1 ПІДСИЛЮВАЧІ

3.1.1 Призначення і характеристика підсилювачів

Найбільш важливе значення електронних приладів – підсилення електричних сигналів. Пристрої, призначені для виконання цієї задачі, називаються *електронними підсилювачами*.

Підсилювальні пристрої знаходять дуже широке застосування. Вони є основними вузлами різноманітної електронної апаратури, широко використовуються в пристроях автоматики і телемеханіки, в слідкуючи, керуючих і регулюючих системах, обчислювальних машинах, контрольно-вимірювальних приладах і т.п.

Класифікація підсилювачів може бути проведена за декількома ознаками: за характером підсилювальних сигналів (підсилювачі гармонічних сигналів, імпульсні підсилювачі і т.д.), за родом підсилювальних елементів (транзисторні, лампові), за призначенням, кількості каскадів, виду електроживлення та іншим показникам. Однак однією із найбільш суттєвих класифікаційних ознак є діапазон частот електричних сигналів, в межах якого даний підсилювач може задовільно працювати.

За цією ознакою розрізняють наступні основні типи підсилювачів:

1. *Підсилювачі низької частоти (ПНЧ)*, призначені для підсилення безперервних періодичних сигналів, частотний спектр яких лежить в межах від десятків герц до десятків кілогерц. Характерною особливістю ПНЧ є те, що відношення верхньої підсилювальної частоти (f_v) до нижньої (f_n) у підсилювачів даного типу велике і зазвичай становить не менше декількох десятків, доходючи в окремих випадках до десятків тисяч.

2. *Підсилювачі постійного струму (ППС)*, які підсилюють електричні сигнали в діапазоні частот від нуля ($f_n = 0$) до до найвищої робочої частоти f_v , яка складає нерідко десятки і сотні кілогерц. Ці підсилювачі широко застосовуються в вимірювальній апаратурі, пристроях автоматики і обчислювальної техніки. Вони дозволяють підсилювати як змінні складові сигналу, так і його постійну складову.

3. *Вибіркові (або селективні) підсилювачі*, які підсилюють сигнали в дуже вузькій смузі частот. Для них характерна невелика величина відношення верхньої частоти до нижньої (зазвичай $\frac{f_v}{f_n} < 1,1$). Ці підсилювачі можуть використовуватися як на низьких. Так і на

високих частотах і виступають в якості своєрідних частотних фільтрів, які дозволяють виділити (або подавити) заданий діапазон частот електричних коливань. Вузька смуга частотного діапазону в багатьох випадках забезпечується застосуванням в якості навантаження таких підсилювачів одного або декількох коливальних контурів. У зв'язку з цим вибіркові підсилювачі часто називають *резонансними*, або *смуговими*.

4. *Широкосмугові підсилювачі*, які підсилюють дуже широку смугу частот (від декількох кілогерц і нижче до декількох мегагерц і вище). Ці підсилювачі призначені для підсилення електричних сигналів в пристроях імпульсного зв'язку, радіолокації і телебачення. В багатьох випадках підсилені сигнали відтворюються на екрані електронно-променевої трубки і реєструються візуально. Тому широкосмугові підсилювачі часто називають *відео підсилювачами*.

3.1.2 Основні показники роботи підсилювача

Коефіцієнти підсилення. Коефіцієнтом підсилення за напругою (струмом, потужністю) називається величина, яка показує, у скільки разів напруга (струм, потужність) сигналу на виході підсилювача більша, ніж на його вході:

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} ; \quad K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}} ; \quad K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} \quad (3.1)$$

За даними формулами вимірювання коефіцієнтів підсилення проводиться у відносних одиницях. Також коефіцієнти підсилення можуть визначатися в децибелах (дБ)

$$K_U[\text{дБ}] = 20 \lg \frac{U_{вих}}{U_{вх}} ; \quad K_I[\text{дБ}] = 20 \lg \frac{I_{вих}}{I_{вх}} ; \quad K_P[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_{вих}}{P_{вх}}$$

|| Користуватися одиницями децибел можна за умови $R_{ex} = R_{вих}$.

Коефіцієнт підсилення, виражений в децибелах, дорівнює

$$K_U [\text{дБ}] = 20 \lg K_U [в.од] \quad K_I [\text{дБ}] = 20 \lg K_I [в.од] \\ K_P [\text{дБ}] = 10 \lg K_P [в.од] \quad (3.2)$$

Зворотній перехід від децибел до відносних одиниць проводиться за допомогою виразу

$$K_U [в.од] = 10^{0,05 K_U [\text{дБ}]} \quad ; \quad K_I [в.од] = 10^{0,05 K_I [\text{дБ}]} \quad ; \quad K_P [в.од] = 10^{0,1 K_P [\text{дБ}]} \quad (3.3)$$

- ❖ Підсилення дорівнює одному децибелу, якщо напруга на виході підсилювача в 1,2 рази більша, ніж на вході.
- ❖ Підсилення дорівнює одному децибелу, якщо струм на виході підсилювача в 1,2 рази більший, ніж на вході.
- ❖ Підсилення дорівнює одному децибелу, якщо потужність на виході підсилювача в 1,25 рази більша, ніж на вході.

Значення коефіцієнта підсилення у різних підсилювачів може мати величину до десятків та сотень. Але і цього в деяких випадках недостатньо для отримання на виході підсилювача сигналу заданої амплітуди. Тоді застосовують послідовне ввімкнення підсилювальних каскадів. Для багато каскадних підсилювачів загальний коефіцієнт підсилення дорівнює

$$K [в.од] = K_1 [в.од] \cdot K_2 [в.од] \cdot \dots \cdot K_n [в.од] \quad (3.4)$$

$$K [\text{дБ}] = K_1 [\text{дБ}] + K_2 [\text{дБ}] + \dots + K_n [\text{дБ}] \quad (3.5)$$

Вираження в децибелах має недолік в тому, що прилади для вимірювання в децибелах дуже складні.

Вхідний і вихідний опори. Вхідний опір підсилювача в будь-якому випадку є опором між вхідними клемми підсилювача. Він дорівнює

$$R_{ex} = \frac{U}{I_{ex}} \quad (3.6)$$

Вихідний опір $R_{вих}$ визначають між вхідними клемми підсилювача при відімкненому опорі навантаження R_H .

Вихідна потужність. При активному характері опору навантаження вихідна потужність підсилювача дорівнює

$$P_{вих} = \frac{U_{вих}^2}{R_H} = \frac{U_{тв.в.}^2}{2R_H} \quad (3.7)$$

де $U_{вих}$ – діюче, а $U_{тв.в.}$ – амплітудне значення вихідної напруги.

Вихідна потужність – це корисна потужність, яка розвивається підсилювачем в навантажувальному опорі.

Коефіцієнт корисної дії. Цей показник особливо важливо враховувати для підсилювачів середньої і великої потужності, так як він дозволяє оцінити їх економічність. Чисельно ККД дорівнює

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_0} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

де P_0 – потужність, яка споживається підсилювачем від всіх джерел живлення.

Номинальна вхідна напруга (чуттєвість). *Номинальна вхідна напруга* - це напруга, яку потрібно підвести до входу підсилювача, щоб на виході отримати задану потужність. Вхідна напруга залежить від типу джерела підсилювальних коливань. Чим менша величина вхідної напруги, яка забезпечує необхідну вихідну потужність, тим вища чуттєвість підсилювача. Подача на вхід підсилювача напруги, яка перевищує номінальне значення, призводить до значним спотворенням сигналу і називається перевантаженням зі сторони входу.

Діапазон підсилювальних частот. *Діапазоном підсилювальних частот* або *смугою пропускання підсилювача*, називається та область частот, в якій коефіцієнт підсилення змінюється не більше, ніж це допустимо за технічними умовами.

Рівень власних перешкод підсилювача. Динамічний діапазон амплітуд. Причини виникнення перешкод на виході підсилювача різні. Їх можна розділити на три основні групи: 1) теплові шуми; 2) шуми підсилювальних елементів; 3) перешкоди із-за пульсацій напруги живлення і наводок зі сторони зовнішніх електричних і магнітних полів.

Відношення амплітуд найбільш сильного і найбільш слабого сигналів на вході підсилювача називають *динамічним діапазоном амплітуд D*. Динамічний діапазон амплітуд

зазвичай показують в децибелах

$$D[\text{дБ}] = 20 \lg \frac{U_{\text{вх max}}}{U_{\text{вх min}}} \quad (3.9)$$

Графічна залежність амплітуди (або діючого значення) вихідної напруги підсилювача від амплітуди (або діючого значення) його вхідної напруги на деякій незмінній частоті сигналу отримала назву *амплітудної характеристики* (рис.3.1).

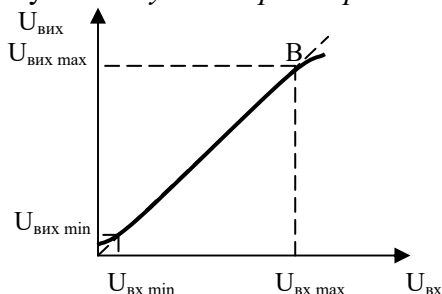


Рис.3.1. Амплітудна характеристика підсилювача

Спотворення в підсилювачах. При підсиленні електричних сигналів можуть виникнути нелінійні, частотні і фазові спотворення.

Нелінійні спотворення – це зміна форми кривої підсилювальних коливань, яка викликана нелінійними властивостями кола, через яке ці коливання проходять. Основною причиною появи нелінійних спотворень в підсилювачі є не лінійність характеристик підсилювальних елементів, а також характеристик намагнічування трансформаторів або дроселів з осердями.

Степінь нелінійних спотворень підсилювача зазвичай оцінюють величиною *коефіцієнта нелінійних спотворень (коефіцієнта гармонік)*

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}} \quad (3.10)$$

де $P_2 + P_3 + \dots + P_n$ – сума електричних потужностей, яка виділяється на навантаженні гармоніками, які з'явилися в результаті нелінійного підсилення; P_1 – електрична потужність першої гармоніки.

❖ *Коефіцієнт гармонік зазвичай виражають у відсотках, тому знайдене за формулою (3.10) значення K_{Γ} слід помножити на 100.*

Частотними називаються спотворення, обумовлені зміною величини коефіцієнта підсилення на різних частотах. Причиною частотних спотворень є наявність в схемі підсилювача реактивних елементів – конденсаторів, котушок індуктивності, між електродних ємностей підсилювальних елементів, ємності монтажу і т.д. Частотні спотворення оцінюють за його амплітудно-частотною характеристикою, яка є показує залежність коефіцієнта підсилення від частоти підсилювального сигналу. Для прикладу на рис. 3.1 показана амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) ПНЧ.

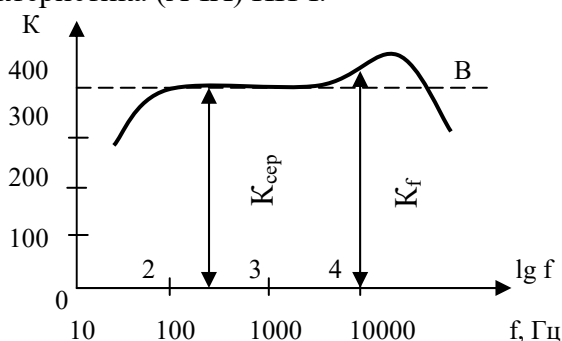


Рис. 3.2. Приблизний вигляд амплітудно-частотної характеристики ПНЧ

Степінь спотворень на окремих частотах виражається *коефіцієнтом частотних спотворень M*, яке дорівнює відношенню коефіцієнта підсилення на середній частоті $K_{\text{сер}}$ до коефіцієнта підсилення на даній частоті K_f

$$M = \frac{K_{\text{сер}}}{K_f} \quad (3.11)$$

Зазвичай найбільші частотні спотворення виникають на межах діапазону частот f_H і f_B . Коефіцієнти частотних спотворень в цьому випадку дорівнюють

$$M = \frac{K_{\text{сер}}}{K_H} \quad ; \quad \dot{\lambda} = \frac{E_{\text{пад}}}{\hat{E}_A} \quad (3.12)$$

де K_n і K_b – відповідно коефіцієнти підсилення на нижніх і верхніх частотах діапазону. Із визначення коефіцієнта частотних спотворень слідує, що якщо $M < 1$, то частотна характеристика має завал, а якщо $M > 1$, - то підйом.

Коефіцієнт частотних спотворень юагатокаскадного підсилювача дорівнює

$$M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n. \quad (3.13)$$

Фазові спотворення оцінюються за фазочастотною характеристикою підсилювача, яка показує залежність кута зсуву фази φ між вхідною і вихідною напругами підсилювача від частоти (рис.3.3).

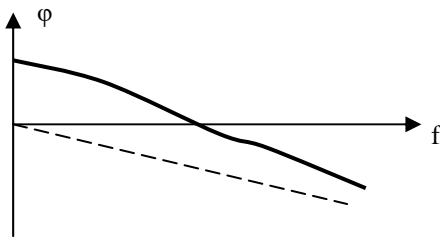


Рис. 3.3. Фазочастотна характеристика підсилювача

Фазові спотворення в підсилювачі відсутні, коли фазовий зсув лінійно залежить від частоти.

3.1.3 Підсилювачі низької частоти. Попередні каскади підсилення

Сучасні ПНЧ виконуються переважно на біполярних і польових транзисторах в дискретному або інтегральному виконанні, причому підсилювачі в мікро виконанні відрізняються від своїх дискретних аналогів, головним чином, конструктивно-технологічними особливостями, схемні ж побудови принципів відмінностей не мають.

В якості джерела вхідного сигналу в ПНЧ можуть використовуватися такі пристрої, як мікрофон, звукознімач, фотоелемент, термопара, детектор і т.п. Типи навантажень також досить різноманітні. Ними можуть бути, наприклад, вимірювальний прилад, записуюча головка магнітофону, наступний підсилювач, осцилограф, реле.

Більшість із перерахованих вище джерел вхідного сигналу розвивають дуже низьку напругу. Подавати її безпосередньо на каскад підсилення не доцільно, так як при такій слабкій керуючій напрузі неможливо отримати скільки-небудь значні зміни вихідного струму, а отже, і вихідної потужності. Тому в склад структурної схеми підсилювача, крім вихідного каскаду, який віддає потрібну потужність корисного сигналу в навантаження, як правило, входять і попередні каскади підсилення (рис.3.4).

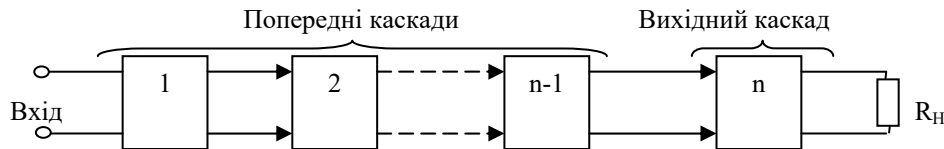


Рис. 3.4. Структурна схема ПНЧ

Ці каскади прийнято класифікувати за характером опору навантаження в вихідному колі транзистора. Найбільше застосування отримали *резистивні* підсилювальні каскади, опором навантаження яких є резистор.

В якості навантаження транзистора може бути використаний і трансформатор. Такі каскади називають *трансформаторними*. Однак внаслідок великої вартості, значних розмірів і маси трансформатора, а також із-за нерівномірності амплітудно-частотних характеристик трансформаторні каскади попереднього підсилення застосовуються досить рідко. Основне застосування ці схеми знаходять у вихідних каскадах підсилювачів.

В каскадах попереднього підсилення на біполярних транзисторах частіше за інші використовується схема зі спільним емітером, яка має високий коефіцієнт підсилення за напругою і потужністю, порівняно великий вхідний опір і допускає використання одного загального джерела живлення для кіл емітера і колектора.

Схема, представлена на рис.3.5, отримала назву *схеми з фіксованою напругою зміщення на базі*.

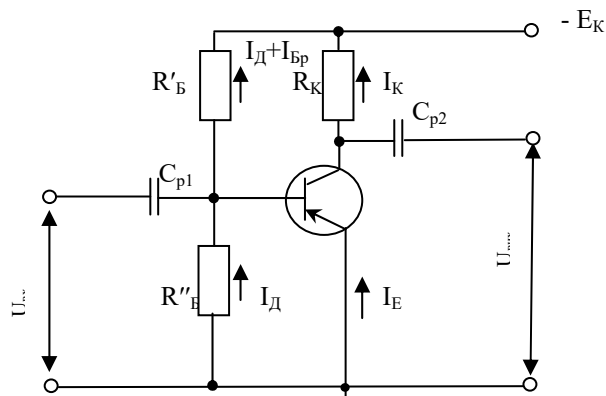


Рис. 3.5. Схема резистивного каскаду з фіксованою напругою зміщення

В цій схемі резистори R'_B і R''_B , відімкнені паралельно джерелу живлення E_K , складають дільник напруги. Опори дільника визначаються із очевидних співвідношень

$$R'_B = \frac{E_K - U_{BEp}}{I_D + I_{Bp}} \quad (3.14)$$

$$R''_B = \frac{U_{BEp}}{I_D} \quad (3.15)$$

і забезпечують вибір вихідної робочої точки на характеристиках транзистора і визначають режим роботи каскаду.

Струм дільника зазвичай вибирають у межах $I_D \approx (2...5) I_{Bp}$.

Вхідний сигнал поступає на базу і змінює її потенціал відносно заземленого емітера. Це призводить до зміни струму бази, а отже до, до зміни струму колектора і напруги на навантажувальному опорі R_K . Розділюючий конденсатор C_{p1} служить для недопускання протікання постійної складової струму бази через джерело вхідного сигналу. За допомогою конденсатора C_{p2} на вихід каскаду подається змінна складова напруги U_{KE} , яка змінюється за законом вхідного сигналу, але значно перевищує його за величиною.

3.1.4 Міжкаскадні зв'язки

Існують три основні способи зв'язку між каскадами в багато каскадному підсилювачі – зв'язок *через роздіючі конденсатори (ємнісний зв'язок)*, *безпосередній зв'язок (гальванічний)* і *зв'язок за допомогою трансформаторів (трансформаторний)*. Найбільше розповсюдження в схемах підсилювачів змінної напруги отримав ємнісний міжкаскадний зв'язок.

Типова схема транзисторного підсилювача з ємнісним зв'язком наведена на рис.3.6.

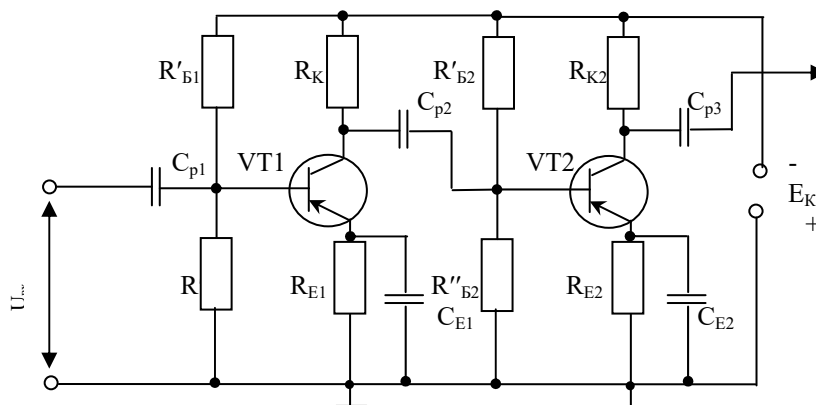


Рис. 3.5. Схема попередніх підсилювачів з ємнісним міжкаскадним зв'язком

3.1.5 Підсилювачі потужності

Підсилювачами потужності називають вихідні підсилювальні каскади, що призначені для передачі заданої або максимально можливої потужності при високому ККД і допустимих рівнях частоти і нелінійних спотворень. Вихідні каскади працюють, як правило, у режимі підсилення сигналів, що мають високе значення амплітуди.

Однотактні підсилювачі потужності використовуються при навантаженнях, що використовують потужність не більше 4...5 Вт. Як правило, однотактні підсилювачі потужності

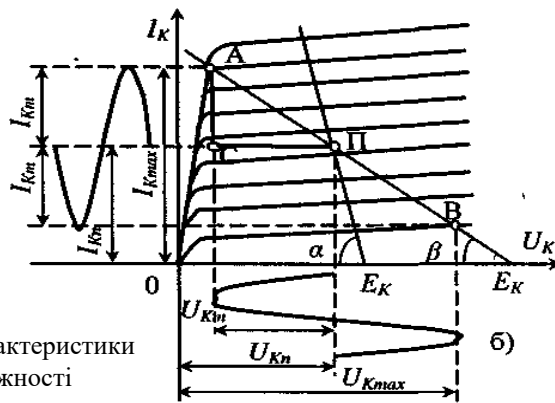
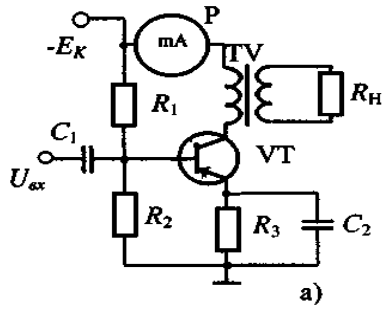


Рис. 3.6. Електрична схема (а) і характеристики (б) однотактного підсилювача потужності

(рис. 3.6,а) працюють у режимі А.

Режим А характеризується проходженням струму через транзистор протягом всього періоду.

Для аналізу роботи каскаду використовуються статичні вихідні характеристики

транзистора (рис. 3.6, б).

Для одержання максимальної потужності на виході каскаду необхідно використовувати всю робочу ділянку лінії навантаження за змінним струмом (відрізок АВ, рис. 3.6,б), що забезпечується вибором точки спокою II посередині відрізка АВ.

Як бачимо, максимальне миттєве значення колекторної напруги значно перевищує напругу живлення E_K за рахунок виникнення в обмотках трансформатора ЕРС самоіндукції.

Двотактні підсилювачі потужності (рис. 3.7,а) працюють переважно в режимах класів В і АВ.

Режим класу В характеризується точкою спокою, яка знаходиться в області колекторних струмів, близьких до нуля (рис. 3.7,б). Тому при виникненні в базі від'ємної півхвилі вхідного сигналу транзистор відкритий, при додатному сигналі, що відповідає плюсу на базі відносно емітера, транзистор закритий. У режимі класу В струм через транзистор проходить протягом півперіоду.

Режим класу АВ є проміжним між режимами класів А і В. Тривалість відкритого стану транзистора в цьому режимі більше π і менше 2π .

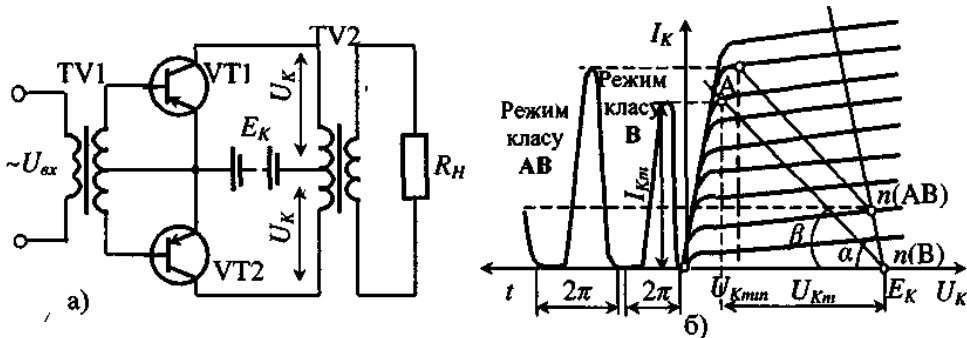


Рис. 3.7. Електрична схема (а) і характеристики (б) двотактного підсилювача потужності

Переваги двотактного підсилювача:

- ❖ великий ККД;
- ❖ мала потужність розсіювання в транзисторах VT1 і VT2 в режимі спокою;
- ❖ відсутність напруги підсилювального сигналу в проводах живлення (між середньою точкою TV2 і „землею”, що виключає паразитні міжкаскадні зв'язки через джерело живлення і спрощує тим самим схему джерела живлення ;
- ❖ компенсація перешкод в двотактних схемах.

Недоліки двотактного підсилювача:

- ❖ складність схеми;
- ❖ використання трансформаторів з виводом від середньої точки, що незручно з конструктивної

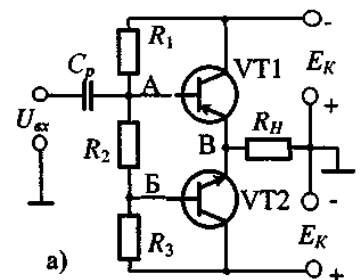


Рис. 3.8. Електрична схема безтрансформаторного підсилювача

- ❖ точки зору;
- ❖ використання перед двотактною схемою попереднього пристрою (фазоінвертора), який „розщиплюючого” вхідний сигнал на два, зсунутих за фазою на 180° .

Тенденція до мікромініатюризації пристроїв промислової електроніки сприяла розробці двотактних підсилювачів потужності з безтрансформаторним виходом. Каскади, в яких використовуються транзистори з різним типом провідності $p-n-p$ і $n-p-n$, називаються каскадами з додатковою симетрією (рис.3.8).

3.1.6 Зворотні зв'язки у підсилювачах

Для більш стійкої роботи чи зміни режиму підсилювача використовують зворотний зв'язок, тобто частину вихідного сигналу (або весь сигнал) подають знову на вхід (рис. 3.9). Такий зв'язок утворюють спеціально шляхом уведення в схему підсилювача ланки зворотного зв'язку. В цьому випадку на вхід підсилювача подається напруга

$$U_{вх.л} = U_{вх} \pm U_{зв.з} \quad (3.16)$$

де $U_{зв.з} = \beta U_{вих}$ - напруга зворотного зв'язку, β - передаточний коефіцієнт ланки зворотного зв'язку.

Знак напруги $U_{зв.з}$ визначається схемною реалізацією ланки зворотного зв'язку. Якщо $U_{зв.з}$ брати зі знаком «+», то вона підсилює вхідну напругу, а такий зв'язок називають **додатним**, якщо ж $U_{зв.з}$ брати зі знаком «—», то вона зменшує вхідну напругу, а сам зв'язок називають **від'ємним**. Крім цього, зворотні зв'язки поділяють на зв'язки за напругою ($U_{зв.з} = \beta U_{вих}$) і за струмом ($U_{зв.з} = R_{зв} I_{вих}$).



Рис. 3.9. Структурна схема зворотного зв'язку

Наявність зворотного зв'язку суттєво впливає на коефіцієнт підсилення підсилювача. В цьому випадку він буде визначатись за виразом

$$K_{II} = \frac{K}{1 \pm \beta K} \quad (3.17)$$

де K - коефіцієнт підсилення підсилювача без ланки зворотного зв'язку. Знак «+» відповідає від'ємному, а знак «—» - додатному зворотному зв'язку.

В режимі підсилення електричних сигналів використовується від'ємний зворотний зв'язок. При цьому він забезпечує незмінність коефіцієнта підсилення при зміні параметрів транзисторів, а також понижує рівень спотворень.

Наявність додатного зворотного зв'язку змінює режим і підсилювач переходить в режим генерування сигналів.

В підсилювачі часто виникають зворотні зв'язки, які не створюються спеціально, а викликані особливостями конструкції підсилювача в цілому або окремих його елементів. Такі зв'язки називаються **паразитними**.

Паразитний зворотний зв'язок може бути від'ємним і додатним. Від'ємний зворотний зв'язок може викликати непередбачене розрахунком значне зменшення коефіцієнта підсилення і тому є небажаним. При додатному зворотному зв'язку коефіцієнт підсилення збільшується, але разом з ним ростуть нелінійні і частотні спотворення сигналу, а також можливе самозбудження підсилювача.

3.1.7 Фазоінвертори

Найбільш простою схемою фазоінвертора є трансформатор (TV1 на схемі рис.3.7,а), середня точка якого з'єднана з „землею”, і при підведенні напруги до первинної обмотки на виході трансформатора створюються дві напруги, зсунуті за фазою на 180° . Однак трансформатор з конструктивної точки зору є небажаним елементом схеми. Більш досконалою є транзисторна схема фазоінвертора (рис. 3.10).

Вихідні сигнали знімаються з колектора і емітера транзистора. Сигнал $U_{\text{вих}2}$, який знімається з емітера, співпадає по фазі з вхідним сигналом $U_{\text{вх}}$ (рис.3.11,а,б), а сигнал $U_{\text{вих}1}$, який знімається з колектора (рис.3.11,в), знаходиться з ним в протифазі.

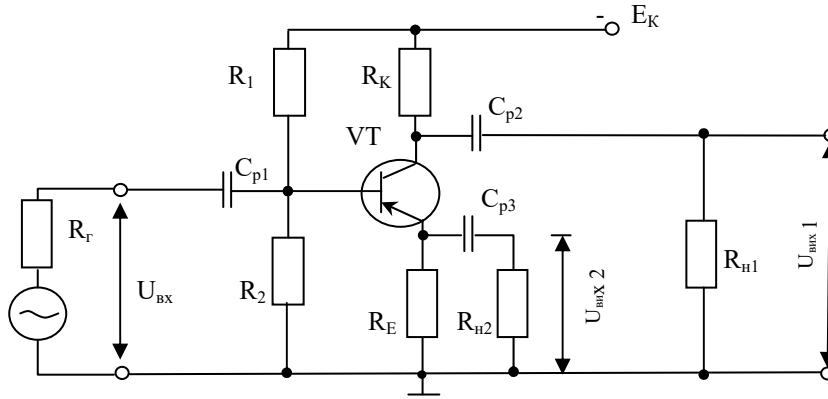


Рис. 3.10. Схема транзисторного фазоінвертного каскаду

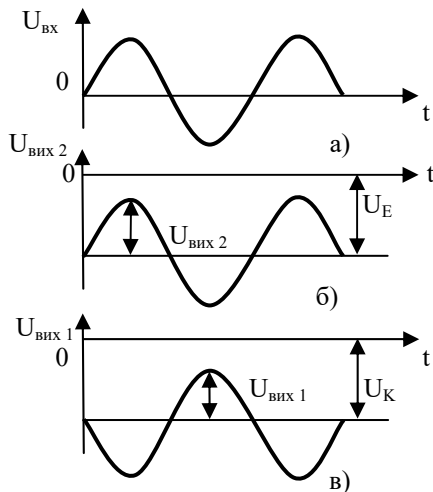


Рис. 3.11. Часові діаграми транзисторного фазоінвертора

Фазоінвертори ускладнюють підсилювальні пристрої, погіршуючи їх потенційні можливості. Тому бажано розробляти схеми підсилювачів, які не потребували б фазоінверторів.

3.1.8 Підсилювачі постійного струму

Підсилювачі постійного струму прямого підсилення

Часто при вимірюваннях неелектричних величин необхідно підсилювати сигнали дуже низьких частот (долі Гц). Для цього необхідні підсилювачі, які однаково підсилюють напруги або струми всіх частот до самих низьких.

Підсилювачі, які мають рівномірну частотну характеристику до самих низьких частот називаються *підсилювачами постійного струму (ППС)*.

На рис.3.12. показана амплітудно-частотна характеристика підсилювача постійного струму.

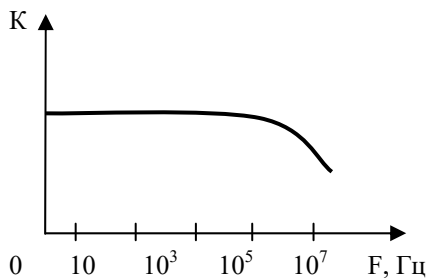


Рис.3.12. Амплітудно-частотна характеристика ППС

Так як в багато каскадних ППС для зв'язку між каскадами не можуть бути використані реактивні елементи зв'язку (конденсатори, трансформатори), які не пропускають постійний струм, то в них, як правило, використовується резистивний або гальванічний міжкаскадний зв'язок.

Найпростішим варіантом схеми гальванічного міжкаскадного зв'язку є схема безпосереднього зв'язку (рис.3.13).

Характеристики ППС повинні задовольняти ряд вимог:

- ❖ при відсутності вхідного сигналу повинен бути відсутній струм у навантаженні;
- ❖ при зміні напрямку вхідного сигналу повинен змінити напрям струму у навантаженні;
- ❖ струм (напруга) навантаження повинен бути пропорційним вхідному сигналу.

Для виконання першої умови необхідно відділити корисний вихідний сигнал від постійних складових напруги і струму каскадів. В ППС відсутні елементи для виконання цієї функції. В зв'язку з цим вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ визначається тут не лише підсиленням корисним сигналом, а й неправдивим сигналом, який утворюється за рахунок змін в часі параметрів режимів каскадів по постійному струму.

Зміна вихідної напруги при незмінній напрузі вхідного сигналу, і яка обумовлена внутрішніми процесами в підсилювачі, називають дрейфом нуля підсилювача.

Причинами дрейфу є: нестабільність напруг елементів схеми, температурна і часова нестабільність параметрів транзисторів і резисторів.

Наявність напруги дрейфу на виході підсилювача призводить до недопустимих спотворень підсилювального сигналу. Розрізняють абсолютний дрейф нуля на виході підсилювача і дрейф, приведений до входу підсилювача.

Абсолютний дрейф нуля – максимальна зміна вихідної напруги при короткозамкненому вході на визначений проміжок часу.

Приведений до входу дрейф підсилювача дорівнює відношенню абсолютного дрейфу на коефіцієнт підсилення підсилювача (за напругою):

$$U_{\text{др.вх}} = \frac{U_{\text{др.вих}}}{K} \quad (3.18)$$

Величина $U_{\text{др.вх}}$ визначає чуттєвість підсилювача.

Необхідно відмітити, що в підсилювачах постійного струму на транзисторах вимога високої стабільності режиму особливо важко виконувати внаслідок залежності параметрів транзисторів від температури. Тому поряд з такими методами зменшення дрейфу, як стабілізація напруги джерел живлення, застосування глибокого від'ємного зворотного зв'язку та інші, доводиться вирішувати питання схемотехнічні, пов'язані з раціональним вибором елементів і побудовою самих схем підсилення.

Температурний дрейф транзисторів обумовлений головним чином змінами зворотного струму колектора і коефіцієнта підсилення за струмом β . Для зниження цього дрейфу в схемах ППС доцільно застосовувати кремнієві транзистори.

Основними методами підвищення стійкості ППС є:

- ❖ застосування балансних (мостових) схем;
- ❖ перетворення постійної напруги в змінну і підсилення змінної напруги з наступним випрямленням (підсилення з модуляцією і демодуляцією сигналу).

Балансні та диференційні підсилювачі

Радикальним засобом зменшення дрейфу нуля в ППС є застосування паралельно-балансних, або диференційних каскадів.

Типова балансна схема транзисторного ППС наведена на рис.3.14.

❖ Для нормальної роботи схеми вона повинна бути строго симетричною.

У випадку повної симетричності схеми в вихідному стані (до постування вхідного сигналу) міст буде збалансованим, а напруга на його виході буде дорівнювати нулю.

При повній симетрії плеч струми спокою обох транзисторів, а також їх відхилення у випадку зміни режиму роботи (наприклад, при зміні напруги E_K , зміні температури і т.п.) мають

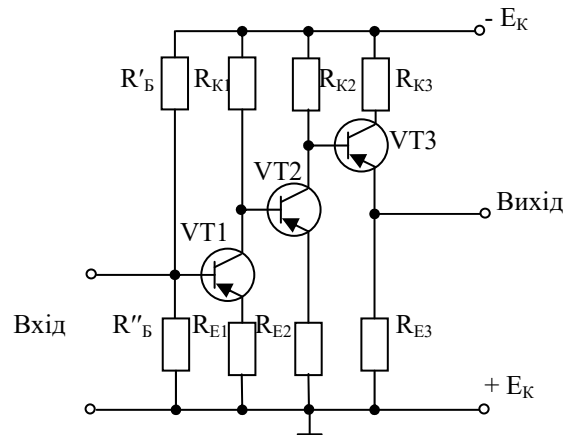


Рис. 3.13. Схема ППС з гальванічним зв'язком

однакову величину. Потенціали колекторів при цьому також рівні і отримують однакові прирости напруг. Тому при однаковій дії дестабілізуючих факторів на обидва транзистори одночасно баланс мосту не порушується і вихідна напруга не з'являється, тобто напруга дрейфу дорівнює нулю. Дія вхідної напруги будь-якої полярності призводить до розбалансування мосту. При цьому потенціали колекторів отримують однакові за абсолютною величиною, але протилежні за знаком прирости, через навантажувальний опір проходить струм, який створює на R_H напругу $U_{вих}$, величина і полярність якої залежать лише від величини і полярності вхідної напруги. Таким чином амплітудна характеристика балансної схеми принципово не повинна відрізнятися від прямої лінії, яка проходить через початок координат.

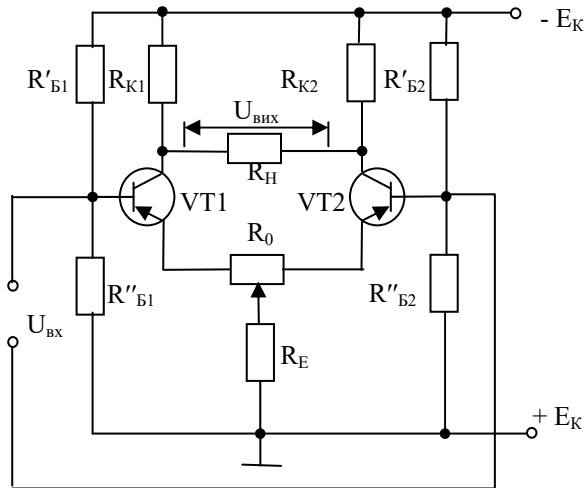


Рис. 3.14. Балансна схема ППС

Дана схема по суті є мостом, плечами якого є резистори $R_{K1} = R_{K2}$ і внутрішні опори транзисторів $VT1$ і $VT2$ (разом з відповідною частиною резистора R_0 і резистором R_E). До однієї із діагоналей мосту підведена напруга джерела живлення E_K , а в іншу діагональ ввімкнений резистор R_H , з якого знімається вихідна напруга. Резистори $R''_{B1} = R''_{B2}$ і $R'_{B1} = R'_{B2}$ входять в ділянки напруги джерела живлення і служать для вибору вихідного режиму роботи каскадів.

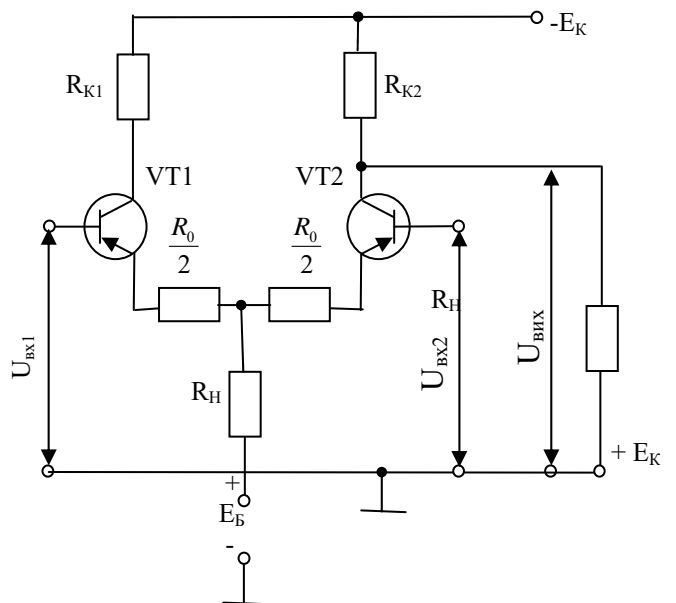
В реальних балансних схемах завжди є певна асиметрія, тому напруга дрейфу на виході повністю не зникає. Але дрейф нуля в балансних схемах визначається різницею струмів обох транзисторів і тому значно менший, ніж у звичайних схемах прямого підсилення.

При побудові багато каскадних схем ППС балансні каскади можна з'єднувати один з одним безпосереднім зв'язком. При цьому колектори попереднього каскаду з'єднуються з базами наступного.

В деяких випадках вихідний сигнал в балансному каскаді знімається з одного із колекторів, а вхідні сигнали поступають на бази обох транзисторів (рис.3.15). Така схема має симетричний вхід і несиметричний вихід. Такий підсилювальний каскад називають *диференційним*.

Фаза вихідного сигналу співпадає з фазою сигналу $U_{вх1}$ і протилежна фазі сигналу $U_{вх2}$. елементи схеми можна підібрати так, що вихідна напруга буде пропорційна різниці вхідних напруг і в ідеальному випадку не буде змінюватись, якщо напруги $U_{вх1}$ і $U_{вх2}$ отримують різні прирости одного знаку.

Рис. 3.15. Схема диференційного каскаду ППС



3.1.9 Операційні підсилювачі

Операційний підсилювач (ОП) — це багатокаскадний підсилювач із двома входами: прямим і інвертуючим (диференційним входом), одним виходом, додатковими виводами: спільним „земля”, додатним і від'ємним виводами живлення, схемне зображення якого подане на

рис. 3.16, а. Основною його характеристикою є великий коефіцієнт підсилення за напругою ($K_{и_оп} \cong \infty$).

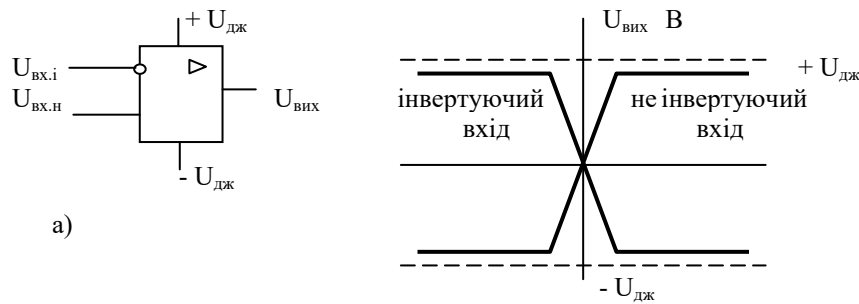


Рис. 3.16. Умовне графічне зображення (а) та передаточні характеристики ОП (б)

До структури ОП (рис.3.17) входять вхідний симетричний диференційний каскад (зменшує дрейф нуля і має два входи: інвертуючий ($U_{вх1}$) і неінвертуючий, або прямий ($U_{вх2}$), несиметричний диференційний каскад (здійснює підсилення сигналу) й емітерний повторювач (забезпечує потужність вихідного сигналу).

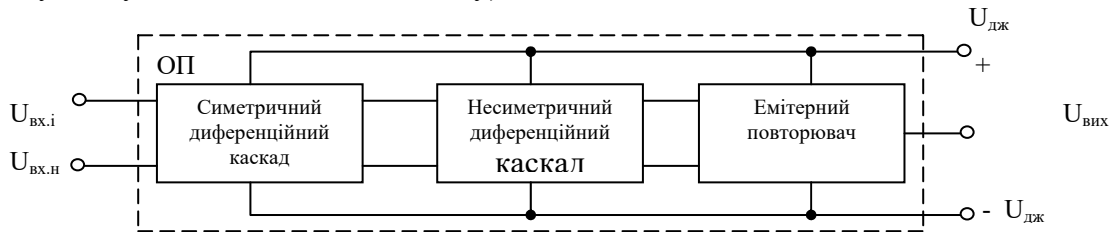


Рис. 3.17. Структурна схема ОП

- ❖ ОП характеризуються великим вхідним опором ($R_{вх} \rightarrow \infty$) і малим вихідним опором ($R_{вих} \rightarrow \infty$);
- ❖ ОП за входами не споживає струм;
- ❖ диференційний сигнал між входами дорівнює нулю.

Основні параметри підсилювача:

коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_i = -\frac{U_{вих}}{U_{вх.і}}; \quad K_n = -\frac{U_{вих}}{U_{вх.н}} \quad (3.19)$$

$U_{вх}$ вимірюється між двома входами, або між одним входом і спільною шиною при незмінному потенціалі другого входу. Підсилювачі виконують симетричними

$$|K_i| = K_n = K \quad ; \quad K = 10^3 \dots 10^5$$

вхідний опір (вимірюється для одного із входів при незмінному потенціалі іншого

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} \quad (3.20)$$

вхідний синфазний опір – вхідний опір синфазного сигналу – відношення приросту напруги на обох входах по відношенню до „землі” до приросту середнього вхідного струму ($R_{сф} \gg R_{вх}$)

$$R_{сф} = \frac{U_{сф}}{I_{сф}} \quad (3.21)$$

середній вхідний струм та зміна вхідного струму (вимірюються в режимі, коли $U_{вих} = 0$)

$$I_{вх} \frac{I_i + I_n}{2} \quad ; \quad \Delta I_{вх} = |I_i - I_n| \quad (3.21)$$

вихідний опір – показує на скільки вихідне коло ОП відрізняється від джерела напруги ($R_{вих} \ll R_{вх}$).

Важливою для ОП є передаточна характеристика $U_{вих} = f(U_{вх})$ (рис. 3.16, б). Оскільки підсилювач має два входи (прямий та інвертуючий), то ця характеристика відображає роботу ОП при поданні сигналу на кожний вхід окремо. Горизонтальні ділянки характеристики відповідають режиму відкритого або закритого стану транзистора вихідного каскаду. При цьому величина вихідного сигналу обмежується максимальним значенням напруги на виході ОП додатного чи

від'ємного значення, яка досягає (0,9...0,95) напруги живлення. На цих ділянках зміна вхідного сигналу не буде викликати зміни вихідного сигналу, тобто напруга на виході буде залишатись сталою.

На похилих ділянках характеристики величина вихідної напруги буде визначатися коефіцієнтом підсилення.

АНАЛОГОВІ СХЕМИ НА БАЗІ ОП

Враховуючи, що ОП мають малий діапазон лінійного підсилення вхідного сигналу, то на практиці ці підсилювачі використовуються з ланками від'ємного зворотного зв'язку. Це значно розширює діапазон підсилення, а також забезпечує регулювання величини вихідної напруги. Таким чином здійснюється масштабування вхідного сигналу.

Масштабні інвертуючі підсилювачі

У цьому випадку вхідна напруга подається на інвертуючий вхід ОП (рис. 3.18), а вихідна напруга ОП $U_{\text{вих}}$ змінюється в протифазі до вхідної $U_{\text{вх}}$ (у випадку синусоїдного сигналу фаза змінюється на 180°). В схемах таких підсилювачів від'ємний зворотний зв'язок реалізується через елемент R_2 на інвертуючий вхід ОП з метою зменшення коефіцієнта підсилення розімкненого ОП. Наявність такого зв'язку призводить до того, що завжди у стані рівноваги $U_{\text{вх.ОП}} = 0$. Тоді, за другим законом Кірхгофа

$$U_{\text{вх}} - U_{\text{вх.ОП}} = R_1 I_{\text{вх}} \quad ; \quad U_{\text{вих}} - U_{\text{вх.ОП}} = R_2 I_{\text{зв.з}} \quad (3.22)$$

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} \quad ; \quad I_{\text{зв.з}} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_2} \quad (3.23)$$

Враховуючи, що $R_{\text{вх.ОП}} = \infty$, то $I_{\text{ОП}} = 0$ і відповідно $I_{\text{вх}} = -I_{\text{зв.з}}$, тобто $\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{вих}}}{R_2}$. Звідси

отримаємо, що для такого підсилювача коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{1}{\beta} \quad (3.24)$$

де $\beta = \frac{R_1}{R_2}$ - передаточний коефіцієнт ланки зворотного зв'язку ОП.

Необхідно відзначити, що коефіцієнт підсилення ОП зі зворотним зв'язком не залежить від частоти вхідного сигналу.

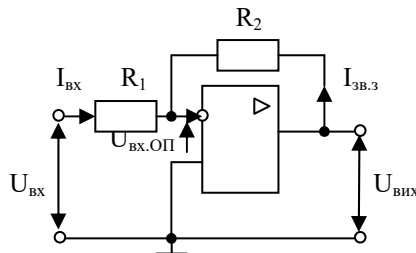


Рис. 3.18. Масштабний інвертуючий підсилювач

Масштабні неінвертуючі підсилювачі

У цьому випадку вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід ОП, вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ має такий самий знак як і вхідна, а зворотний зв'язок забезпечується через елемент R_2 на інвертуючий вхід ОП (рис.3.19).

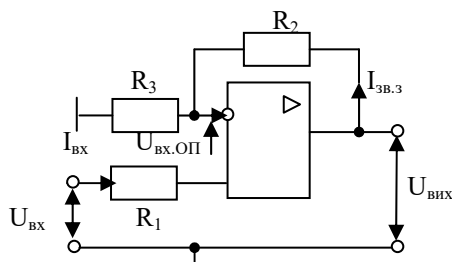


Рис. 3.19. Масштабний неінвертуючий підсилювач

Оскільки в цьому випадку $I_{\text{вх}} = I_{\text{ОП}} = 0$, то за умови, що $U_{\text{вх.ОП}} = 0$, отримаємо $U_{\text{вх}} = U_{\text{зв.з}} = U_{\text{вих}} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$. Тоді

коефіцієнт підсилення такого підсилювача буде визначатись $K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2 + R_3}{R_3} = 1 + \frac{R_2}{R_3}$ (3.25)

Масштабні суматори

На основі ОП широко використовуються схеми інвертуючих та неінвертуючих суматорів. На рис. 3.20 показано схему інвертуючого суматора.

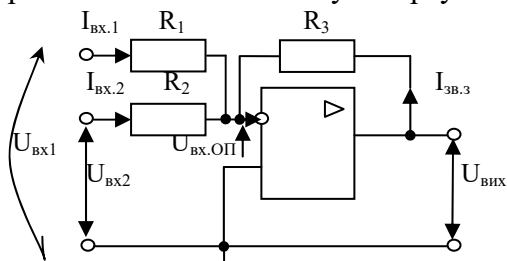


Рис. 3.20. Схема інвертуючого суматора

Враховуючи особливості роботи інвертуючого підсилювача, запишемо за першим законом Кірхгофа $I_{\text{вх}1} + I_{\text{вх}2} + I_{\text{зв}3} = 0$. Виразивши струми через напруги, отримаємо

$$-\frac{U_{\text{вих}}}{R_3} = \frac{U_{\text{вх}1}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх}2}}{R_2} \quad (3.26)$$

Переважно, в схемах суматора опори вхідних резисторів приймають однаковими за величиною ($R_1 = R_2 = R$), тоді вихідна напруга

$$U = -\frac{R_3}{R} (U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2}). \quad (3.27)$$

Отже, вихідна напруга ОП буде визначатися сумою вхідних напруг із відповідним масштабним множником.

Інтегратори

Інтегратори — пристрої електроніки, що реалізують функцію інтегрування й виконуються на базі інвертуючого операційного підсилювача шляхом введенням в ланку від'ємного зворотного зв'язку конденсатора C (рис. 3.21).

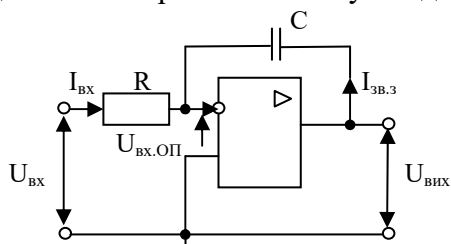


Рис. 3.21. Схема інтегратора

Враховуючи, що $R_{\text{вх.ОП}} = \infty$, то $I_{\text{вх}} = -I_C$. Записавши рівняння за другим законом Кірхгофа для вхідного та вихідного контурів

$$U_{\text{вх}} - U_{\text{вх.ОП}} = I_{\text{вх}} R \quad (3.28)$$

$$U_{\text{вх.ОП}} + U_C - U_{\text{вих}} = 0$$

і враховуючи, що для ОП $U_{\text{вх.ОП}} = 0$, отримаємо

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R}, \quad U_{\text{вих}} = U_C = \frac{1}{C} \int I_{\text{вх}} dt \quad (3.29)$$

Отже, із врахуванням рівняння для ємності, отримаємо, що вихідна напруга такої схеми є пропорційною до інтеграла від вхідної напруги

$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt \quad (3.30)$$

Тривалість інтегрування визначається часом перехідного процесу, що виникає в ланці R-С при поданні $U_{\text{вх}}$, а швидкість інтегрування (нахил прямої) визначається сталою часу $\tau = RC$.

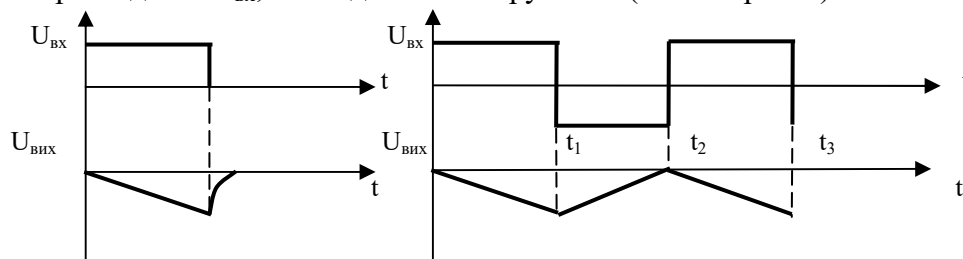


Рис. 3.22. Часові діаграми інтегратора

Компаратори

Компаратори — це елементи порівняння, які широко використовуються в системах контролю та автоматичного керування й відносяться до елементів імпульсної техніки. Компара-

тор, виконаний на базі ОП (рис. 3.23, а), порівнює вимірювану напругу $U_{вх}$, яка подається на один із входів (переважно на інвертуючий), із опорною напругою (наперед заданою) $U_{оп}$, яка подана на інший вхід. Опорна напруга є незмінною в часі, додатної чи від'ємної полярності, а вхідна напруга - змінюється. Коли $U_{вх} = U_{оп}$, вихідна напруга ОП змінює свій знак на протилежний. Тому компаратор має ще назву «**нуль-орган**», оскільки зміна полярності вихідної напруги (перемикання) відбувається за умови, що $U_{вх} - U_{оп} = 0$, де $U_{оп}$ — задана напруга.

Якщо на інвертуючий вхід подається синусоїдний сигнал ($U_{вх}$), а на неінвертуючий — постійна напруга ($U_{оп}$) додатної полярності (рис. 3.23, б), то вхідна напруга ОП $U_{вх\text{оп}} = U_{вх} - U_{оп}$. До моменту часу від 0 до t_1 $U_{вх\text{оп}} < 0$, тому $U_{вих} = U_{вих\text{макс}}^+$. В проміжку часу від t_1 до t_2 $U_{вх\text{оп}} > 0$, тому $U_{вих} = U_{вих\text{макс}}^-$.

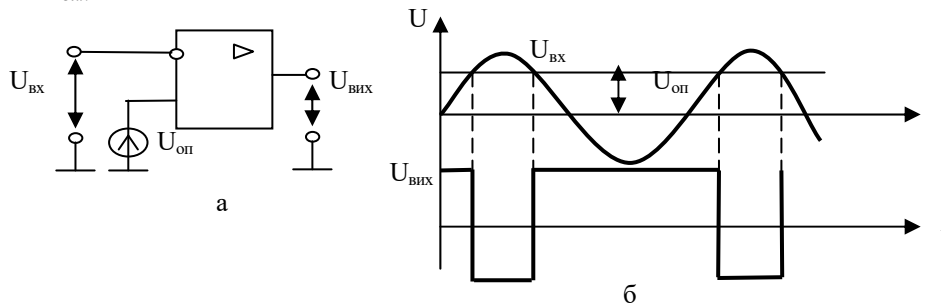


Рис. 3.23. Схема компаратора (а) та його часові діаграми (б)

Контрольні питання та вправи

1. За якими ознаками класифікують електронні підсилювачі?
2. Знайти коефіцієнт підсилення потужності, якщо $U_{вх}=0,2$ В; $U_{п\text{вих}}=5,6$ В; $R_{вх}=600$ Ом; $R_{вих}=5$ Ом.
3. Визначити опір навантаження R_n підсилювача, якщо напруга на ньому $U_{вих}=3$ В; потужність, яка споживається від джерела живлення, 3 Вт, а $\eta=0,9$.
4. Якими причинами можна пояснити завал частотної характеристики ПНЧ на низьких частотах?
5. Визначити коефіцієнт підсилення каскаду в області середніх частот, якщо на частоті f_n $K_n=100$ і $M_n=3$ дБ.
6. Що таке зворотній зв'язок?
7. Як змінюється коефіцієнт підсилення підсилювача при введенні від'ємного зворотного зв'язку?
8. Чому підсилювачі постійного струму знаходять широке застосування в електронній техніці?
9. Поясніть особливості міжкаскадних зв'язків в ППС.
10. Чому балансний каскад ППС часто називають мостовою схемою?
11. Яка різниця між балансним та диференціальним каскадами ППС?
12. Складіть принципіальну схему операційного транзисторного підсилювача, який виконує функцію додавання.
13. Чому в схемах операційних підсилювачів використовуються підсилювачі постійного струму?
14. У чому полягає відмінність операційних підсилювачів від звичайних?
15. Яка роль зворотного зв'язку в операційному підсилювачі?
16. В неінвертуючого підсилювача на базі ОП опір резистора в ланці зворотного зв'язку 820 кОм, а опір резистора на інвертую чому вході ОП 20 кОм. Визначити його коефіцієнт підсилення.
17. Обчислити опір резистора в ланці зворотного зв'язку інвертую чого підсилювача на база ОП, в якого опір резистора на інвертую чому вході ОП 18 кОм. Вхідна напруга підсилювача 60 мВ, а напруга на виході -8,0 В.

3.2 ГЕНЕРАТОРИ СИНУСОЇДНИХ КОЛИВАНЬ

3.2.1 Класифікація генераторів

Електронний генератор – це пристрій, який перетворює електричну енергію джерела постійного струму в енергію незатухаючих електричних коливань необхідної форми, частоти і потужності.

За принципом роботи розрізняють генератори із *самозбудженням (автогенератори)* і *генератори з зовнішнім збудженням*, які по суті є підсилювачами потужності високої частоти. Електронні автогенератори розділяють на автогенератори синусоїдальних (гармонічних) коливань і автогенератори коливань несинусоїдальної форми, які прийнято називати релаксаційними (імпульсними) автогенераторами.

Будучи першоджерелом електричних коливань, генератори з самозбудженням широко використовуються в радіопередаючих і радіоприймальних (супергетеродинних) пристроях, у вимірювальній апаратурі, в електронних обчислювальних машинах, в пристроях телеметрії і т.д. нижче показано ділення генераторів за діапазоном частот.

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

❖ *Найбільш розповсюджені схеми автогенераторів містять підсилювальний елемент і коливальну систему, пов'язані між собою колом позитивного зворотного зв'язку.*

Для побудови автогенератора синусоїдальних коливань зазвичай використовуються два типи підсилювальних схем – резонансні підсилювачі і підсилювачі на резисторах. Автогенератори, виконані на основі схеми резонансного підсилювача, часто називають автогенераторами типу LC, а автогенератори, побудовані на основі схеми підсилювача на резисторах, - автогенераторами типу RC. Перші використовуються на високих частотах, інші – на низьких.

В якості підсилювальних елементів схем автогенераторів, які використовуються в пристроях електронної автоматики і обчислювальної техніки, найбільш широко застосовуються транзистори і тунельні діоди.

Принцип роботи генераторів коливань базується на реалізації умови самозбудження підсилювача з додатнім зворотнім зв'язком, структурну схему якого показано на рис.3.2.1.

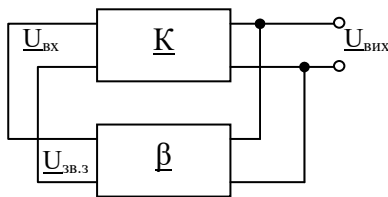


Рис. 3.2.1. Структурна схема генератора коливань

Для комплексних значень вхідних і вихідних напруг підсилювача запишемо: $\underline{U}_{\text{вих}} = \underline{K} \underline{U}_{\text{вх}}$, а $\underline{U}_{\text{вх}} = \underline{\beta} \underline{U}_{\text{вих}} = \underline{U}_{\text{зв.з.}}$, де \underline{K} , $\underline{\beta}$ – комплексні значення коефіцієнта підсилення та передаточного коефіцієнта відповідно підсилювача та ланки зворотного зв'язку. Як відомо, коефіцієнт підсилення за напругою підсилювача з додатним

зворотним зв'язком визначається виразом

$$K_{\Pi} = \frac{K}{1 - K\beta}. \quad (3.2.1)$$

Перехід підсилювача в режим генерування коливань ($K_{\Pi} = \infty$) забезпечується умовою $\underline{K}\beta = 1$ або $K e^{j\varphi} \beta e^{j\varphi} = 1$. (3.2.2)

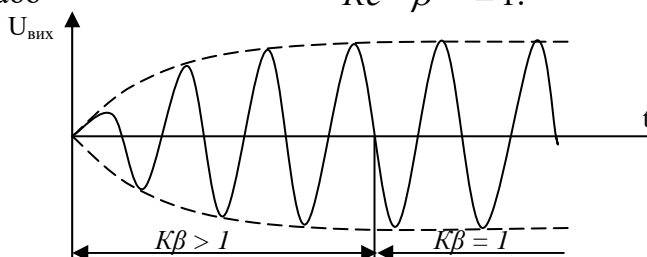


Рис. 3.2.2. Умови роботи генератора коливань

Це рівняння називають умовою самозбудження генератора коливальних. Ця умова поділяється на *умову балансу амплітуд* ($K\beta=1$) і на *умову балансу фаз* ($\varphi = -\psi + 2\pi$), які визначають стабільну роботу генератора коливальних (рис.3.2.2).

3.2.2 Автогенератори LC-типу

Відомо багато різновидностей схем транзисторних автогенераторів типу LC, але будь-яка з них повинна містити:

- ❖ *коливальну систему* (зазвичай коливальний контур), в якій збуджуються необхідні незатухаючі коливання;
- ❖ *джерело електричної енергії*, за рахунок якого в контурі підтримуються незатухаючі електричні коливання;
- ❖ *транзистор*, за допомогою якого регулюється подача енергії від джерела в контур;
- ❖ *елемент зворотного зв'язку*, за допомогою якого здійснюється подача необхідної збуджуючої напруги із вихідного кола у вхідне.

Найпростіша схема транзисторного генератора типу LC показана на рис. 3.2.3.

Така схема називається генератором з трансформаторним зв'язком і використовується зазвичай в діапазоні високих частот. Автогенератор є однокаскадним підсилювачем, в якому в якості кола позитивного зворотного зв'язку застосовують контур, налаштований за допомогою підбору параметрів L_B і C_B на резонансну частоту $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_B C_B}}$, або $F_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_B C_B}}$, де ω_p – кругова частота; F_p – частота, кількість періодів в секунду.

Після ввімкнення джерела живлення E_K в контурі виникає змінний струм I_B , який підсилюється транзистором. Ці коливання через котушку L_K , індуктивно зв'язану з котушкою L_B , знову повертаються в коливальний контур. Розмах коливальних поступово наростає до визначеної величини, поки транзистор працює в лінійній частині вольт-амперної характеристики. По досягненню режимів відсічки і насичення наступають стаціонарні коливання, тобто коливання визначеної амплітуди. Умова балансу амплітуд в даній схемі зводиться до того, що на резонансній частоті втрати енергії в контурі компенсуються енергією, яка вноситься в коливальний контур джерелом живлення через котушку L_K .

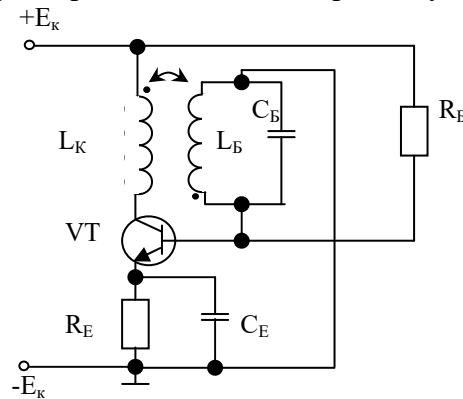


Рис. 3.2.3. Схема LC-автогенератора

Умова балансу фаз в даному автогенераторі здійснюється при зсуві фаз вихідної (колекторної) напруги U_K на 180° відносно напруги U_B . Практично ця умова виконується відповідною намотуванням індуктивних котушок.

3.2.3 Стабілізація частоти LC - генераторів

Суттєвим недоліком LC – генераторів є залежність частоти генеруємих коливальних від зміни температури і режиму роботи, механічних дій на автогенератор, коливальних напруги та інших дестабілізуючих факторів. Відхилення частоти коливальних від допустимого значення може призвести до того, що деякі електронні пристрої, які працюють на фіксованій частоті (вибірковий підсилювач, фазоінвертор та ін), перестануть працювати або будуть працювати з великими похибками.

Дія дестабілізуючих факторів на нестабільність частоти проявляється в зміні ємностей конденсаторів і індуктивних котушок коливальних контурів. Це пояснюється тим, що частоту коливань визначають не абсолютні значення ємностей конденсаторів і індуктивностей котушок контуру, а їх еквівалентні значення, включаючи різні паразитні ємності і індуктивності, значення яких залежать від температури, механічних дій, впливу зовнішніх електромагнітних полів і т.д.

Слід також відмітити, що на нестабільність частоти, викликану зміною температури, сильно впливають зміни параметрів транзисторів. Для зменшення нестабільності частоти використовують різні способи її стабілізації. Розрізняють параметричну і кварцову стабілізацію частоти.

Параметрична стабілізація частоти заключається в послабленні впливу зовнішніх факторів на частоту коливань, що генеруються, а також в підборі елементів генератора, які забезпечують мінімальні зміни частоти. Перше виражається в тому, що контур екранують для усунення дії зовнішніх електромагнітних полів або застосовують масивні корпуси (шасі) для зниження впливу механічних ударів і вібрації. Другу заключається в одночасному ввімкненні в генератор конденсаторів ємності, що зменшує вплив змін температури. Параметрична стабілізація частоти дозволяє знизити нестабільність частоти до 10^{-5} .

Кварцова стабілізація частоти заключається в застосуванні кварцових резонаторів, що дає дуже низьку нестабільність частоти, зазвичай біля 10^{-7} . Кварцовий резонатор являє собою тонку пластину мінералу (кварцу або турмаліну) прямокутної або круглої форми, встановлену в кварцотримач. Кварц, як відомо, володіє п'єзоелектричним ефектом.

Якщо кварцову пластинку стиснути або розтягнути, то на її протилежних гранях з'являються рівні за величиною, але різні за знаком електричні заряди. Величина їх пропорційна тиску, а знаки залежать від напрямлення сили тиску. Це явище носить назву *прямого п'єзоелектричного ефекту*. Якщо ж до граней пластинки прикласти електричну напругу, то пластинка буде стискатись або розтягуватись в залежності від полярності прикладеної напруги. Це явище носить назву *зворотного п'єзоелектричного ефекту*.

Цінною властивістю кварцу є дуже висока стабільність частоти механічних коливань, яка визначається геометричними параметрами кварцової пластинки і напрямом деформації.

Таким чином, кристал кварцу (пластинка) являє собою електромеханічну систему, яка має резонансні властивості. В залежності від геометричних розмірів і орієнтації зрізу резонансні властивості кожної пластинки строго індивідуальні і лежать в межах від декількох десятків кілогерц до декількох десятків мегагерц.

Кварцовий резонатор еквівалентний електричному коливальному контуру. Еквівалентна схема кварцового резонатора зображена на рис.3.2.4, на рис. 3.2.5 представлена одна із можливих схем кварцового автогенератора. Основна вимога до такого автогенератора – генерування коливань лише на частоті $f_{кв}$, яка визначається кварцем. Це означає, що в генераторі не повинні виникати коливання на інших частотах і що генерація повинна зриватись при видаленні кварцу із схеми. Однак підключати кварц безпосередньо паралельно тунельному діоду не можна, оскільки резонансний опір кварцу в більшості випадків менший величини $| -R_0 |$. В схемі, наведеної на рис.3.2.5, на всіх частотах, крім частоти послідовного резонансу кварцу, загальний опір втрат такий, умова самозбудження не виконується.

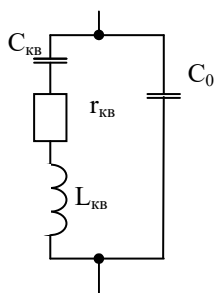


Рис. 3.2.4. Еквівалентна схема кварцового резонатора

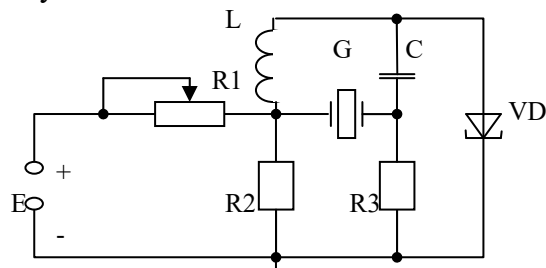


Рис. 3.2.5. Схема кварцового автогенератора на тунельному діоді

На частоті послідовногорезонансу кварцу його активний опір зменшується настільки, що резистори R2 і R3 стають ввімкненими паралельно. Загальний опір втрат в контурі при цьому зменшується, внаслідок чого будуть виконуватися умови самозбудження і схема почне

генерувати коливання. Таким чином, генерація можлива лише на одній строго фіксованій частоті, яка дорівнює частоті власних коливань кварцу. Зрозуміло, що стабілізація частоти за допомогою кварцу важчас, якщо в процесі роботи вимагається перебудовувати частоту генеруємих коливань. В цьому випадку потрібно мати стільки кварцових пластин, скільки частот необхідно стабілізувати. Крім кварцу для стабілізації частоти служать пластинки турмаліну, однак цей мінерал дорожчий кварцу і тому застосовується рідко.

*В інтегральних мікросхемах розміри кварцової пластини не повинні перевищувати розмірів, які відповідають частотам порядку 20 МГц, тому на більш високих частотах використовують роботу генератора на гармоніках по частоті вище основної. Такі генератори отримали назву **ділників частоти**.*

Так як геометричні розміри кварцу збільшуються із зменшенням частоти, для стабілізації низької частоти використовують *камертонні вібратори*, виконані із спеціальних сплавів.

3.2.4. Автогенератори типу RC

Застосування генераторів з коливальними контурами (типу LC і кварцових) для генерування коливань з частотами менше 15-20 кГц незручно із-за великих індуктивностей котушок, ємностей конденсаторів і великих пластин кварцових резонаторів. На даний час для цих цілей широко використовуються генератори типу RC, в яких замість коливального контуру застосовуються вибіркові RC-фільтри. Генератори типу RC можуть генерувати досить стабільні синусоїдні коливання в порівняно широкому діапазоні частот від частин герца до сотень кілогерц. Окрім того, RC-генератори при одній і тій споживчій потужності з LC-автогенераторами мають менші габаритні розміри, масу і вартість, а тому можуть виготовлятися в інтегральному виконанні.

Структурна схема генератора синусоїдних коливань типу RC наведена на рис. 3.2.6.

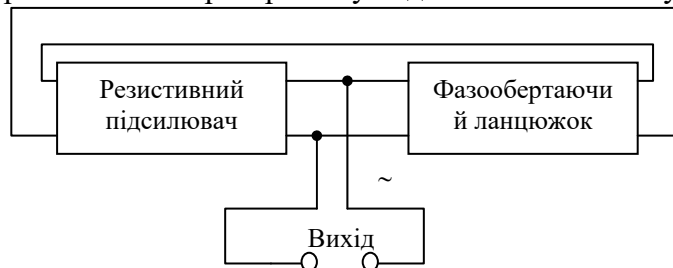


Рис. 3.2.6 . Структурна схема генератора типу RC

Підсилювач будується за звичною резистивною схемою. Для самозбудження підсилювача, тобто для перетворення первинних коливань в незатухаючі, необхідно на вхід підсилювача подавати частину вихідної напруги, яка перевищує вхідну напругу або дорівнює їй за величиною і співпадає з нею за фазою, іншими словами, охопити підсилювач додатним зворотним зв'язком достатньої глибини. Вхідна і вихідна напруги зсунуті за фазою на 180° . Якщо вихідну напругу, яка знімається з колектора подати безпосередньо на вхід підсилювача, то ми отримаємо від'ємний зворотній зв'язок. Отже, для виконання умови балансу фаз, перед тим як подати напругу з виходу на вхід, необхідно зсунути її за фазою ще раз на 180° . Це завдання виконує RC-ланцюжок, який складається із трьох однакових RC-ланок. Кожна ланка зсуває напругу за фазою на 60° . Схема RC-генератора представлена на рис.3.2.7.

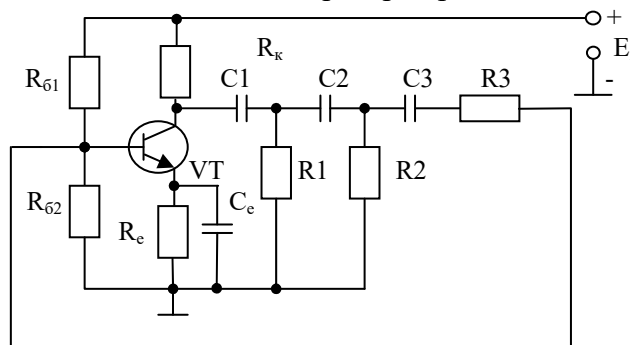


Рис. 3.2.7. Схема RC-генератора

Якщо розрахувати коефіцієнт зворотнього зв'язку три ланкового RC-ланцюжка, перебачивши фазовий зсув його вхідної і вихідної напруги на 180° , то при виконанні умов $R_1=R_2=R_3=R$ і $C_1=C_2=C_3=C$ самозбудження стане можливим на частоті

$$F_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}}$$

Частоту F_p , при якій кут $\psi=180^\circ$, називають квазірезонансною частотою. Ця назва пов'язана з тим, що генеровані коливання мають значні спотворення форми, із-за того, що умови самозбудження виконуються і для інших частот (гармонік), близьких за частотою до F_p . це пояснюється відсутністю суворої вибіркової до основної частоти RC-ланцюжка. Для зниження спотворень в підсилювач вводиться зворотній зв'язок за струмом. В автогенераторі рис.3.2.7 це можна здійснити ввімкненням резистора R_e при відімкненні конденсатора C_e .

3.2.4. Автогенератор на тунельному діоді

Тунельний діод, дякуючи широкому частотному діапазону, малій споживаній потужності і високій температурній стабільності є найбільш перспективним приладом для побудови мініатюрних, високо стабільних, широкодіапазонних автогенераторів. Недоліком генераторів на тунельних діодах є мала вихідна потужність, а також певні нестабільності роботи із-за розкиду параметрів сучасних тунельних діодів.

Найбільш повно переваги тунельного діода вдається використати в генераторах діапазону ЗВЧ, особливо на частотах вище 1 ГГц.

Застосування тунельного діода в схемах генераторів пояснюється тим, що за допомогою від'ємного опору тунельного діода можна компенсувати втрати в коливальному контурі і отримати в ньому незатухаючі коливання. Тому робочою ділянкою вольт-амперної характеристики тунельного діода є її спадаюча ділянка, ширина якої зазвичай не перевищує декількох десятків мілівольт. Тому амплітуда генеруємих коливань в автогенераторі на тунельному діоді є невеликою.

Для прикладу розглянемо схему LC-генератора на тунельному діоді (рис.3.2.8.).

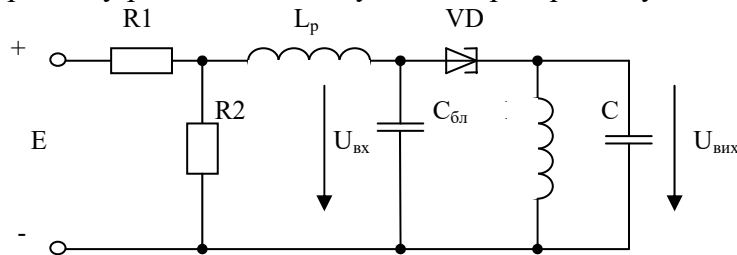


Рис. 3.2.8. Автогенератор на тунельному діоді

За рахунок ділянки напруги R_1/R_2 робоча точка спокою А встановлюється на середині падаючої ділянки вольт-амперної характеристики (рис.3.2.9). Для того, щоб тунельний діод за високою частотою був відімкнений паралельно коливальному контуру, між його анодом і „землею” вмикається блокувальний конденсатор великої ємності $C_{бл}$, опір якого на резонансній частоті близький до нуля. Розділюючий дросель L_p розділяє постійні і змінні струми.

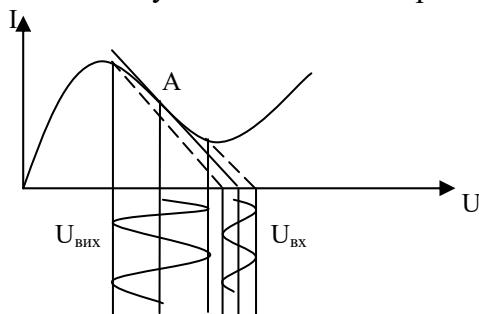


Рис.3.2.9. Характеристика, яка пояснює роботу автогенератора на тунельному діоді

3.2.5. Генератори на інтегральних мікросхемах

Для побудови генераторів в мікро виконанні використовуються аналогові (лінійні)

підсилювальні інтегральні мікросхеми (ІМС), охоплені глибоким додатнім зворотним зв'язком. Тому створення схеми генератора – типу С чи RC, по суті, зводиться до вибору відповідної аналогової ІМС і відімкненню до неї дискретних елементів – LC-контур, RC-ланцюжків, мостів і т.п. при цьому принципі побудови схем генераторів, розглянуті в попередніх параграфах, умови самозбудження, способи стабілізації частоти фактично залишаються незмінними.

На рис.3.2.10 приведена схема генератора синусоїдних коливань з трансформаторним зворотним зв'язком, основою якої є диференційний каскад (ДП). Коливальний контур ввімкнений між колекторами транзисторів VT1 і VT2. позитивний зворотний зв'язок забезпечується за допомогою додаткової обмотки L_k , напруга з якої подається на вхід диференційного каскаду. Вихідні напруги, які знімаються з колекторів транзисторів VT1 і VT2 (несиметричні виходи), змінюються в протифазі. Це дозволяє у випадку необхідності знімати два гармонічних сигнали, зсунутих за фазою на 180° . При відімкненні зовнішнього навантаження між колекторами транзисторів VT1 і VT2 (симетричний вихід) амплітуда вихідної напруги збільшується в два рази порівняно з амплітудою напруги схеми з несиметричним виходом. З метою зменшення впливу зовнішнього навантаження на стабільність генеруємих коливань вихідна напруга знімається через емітерний повторювач, зібраний на транзисторі VT4.

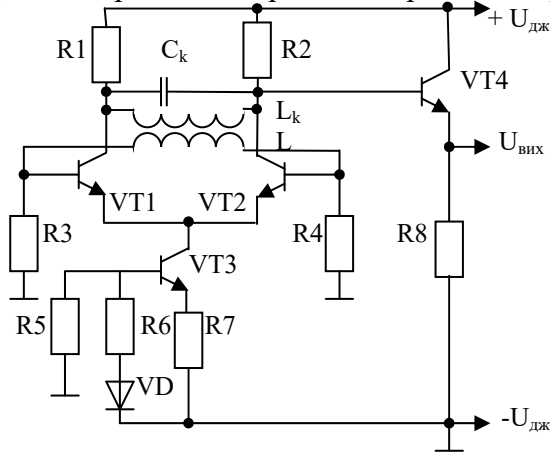


Рис.3.2.10. Генератор типу LC на база ІМС диференційного підсилювача

В якості базових елементів (диференційних підсилювачів) можуть бути використані аналогові ІМС різних серій (наприклад, К1УТ181А - К1УТ181В; 1УТ221 (А, Б, В); К1УТ771 (А, Б) та ін.).

Контрольні питання та вправи

1. Наведіть приклади електронних пристроїв, в яких використовуються генератори синусоїдальних коливань.
2. Чим відрізняються електронні автогенератори від підсилювачів?
3. Назвіть основні елементи схеми автогенератора типу LC.
4. Поясніть фізичну суть умови балансу фаз.
5. Поясніть фізичну суть умови балансу амплітуд.
6. Чим визначається частота генеруємих коливань в генераторі типу RC?
7. На чому базується можливість застосування в схемах генераторів тунельних діодів?
8. у чому зміст умови самозбудження генератора коливань?
9. Чим визначається тип генератора коливань?
10. Які параметри схеми автогенератора впливають на частоту коливань?
11. У чому суть стабілізації частоти коливань?
12. Які є методи стабілізації частоти?
13. Поясніть принцип кварцової стабілізації частоти.
14. Визначити опір резистора RC-ланки автогенератора гармонійних коливань з періодом 10 мкс, якщо ємність конденсатора в цій ланці 2 нФ.
15. Як змінити ємність RC-автогенератора, щоб період його сигналу зменшився у 3 рази?. Опір резистора RC-ланки постійний.
16. Визначити період гармонійних коливань LC-автогенератора, якщо LC-контур має такі параметри $L=5$ мГн, $C=8$ пФ. Резистивним опором обмотки знехтувати.
17. Як зміниться ємність LC-генератора, якщо частота його сигналу зросте у 2 рази?. Індуктивність LC-контурю постійна.

3.3 ВИПРЯМЛЯЧІ. СТАБІЛІЗАТОРИ

3.3.1 Класифікація випрямлячів

Випрямляч – це електронний пристрій, призначений для перетворення змінного струму в постійний.

В даний час використовують різноманітні типи випрямлячів, які класифікують за кількістю фаз змінного струму, що випрямляється, типом вентилів, схемою їх ввімкнення та іншим показником.

Для живлення різних вузлів і блоків електронної апаратури найбільш часто використовують випрямлячі, розраховані на невеликі потужності і які працюють від однофазного кола змінного струму. Такі випрямлячі називаються *однофазними*. Вони діляться на :

- *однопівперіодні*, в яких струм через вентиль проходить лише протягом одного півперіоду змінної напруги в мережі;
- *двопівперіодні*, в яких струм проходить через вентиль протягом обох півперіодів;
- *схеми з множенням напруги*.

Для випрямлення трифазного струму застосовують *трифазні випрямлячі*, які зазвичай розраховані на отримання відносно великої потужності (десятки кіловат). Ці випрямлячі підключаються до мережі за допомогою трифазних трансформаторів, вторинні обмотки яких мають три або шість фаз.

Основні компоненти випрямляча (рис. 3.3.1):

- *силовий трансформатор*, необхідний для узгодження напруги мережі із заданою напругою навантаження;
- один або декілька *вентилів*, які мають односторонню провідність струму і виконують основну функцію випрямляча – перетворення змінного струму в постійний (схема з'єднання вентилів визначає тип випрямляча);
- *згладжувальний фільтр*, який використовують для зменшення пульсацій випрямленої напруги.



Рис. 3.3.1. Структурна схема випрямляча

Роботу випрямлячів характеризують такі показники:

- *коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги*

$$K_{\pi} = \frac{U_{\text{Пм}}}{U_0}, \quad (3.3.1)$$

де $U_{\text{Пм}}$ – амплітуда змінної складової напруги, яка змінюється з частотою повторення імпульсів, тобто амплітуда першої гармоніки, U_0 – постійна складова випрямленої напруги на навантаженні;

- *відносна зміна випрямленої напруги при переході від неробочого стану до номінального режиму навантаження:*

$$\Delta U = \frac{(U_0 - U_n)}{U_n}, \quad (3.3.2)$$

де U_0 , U_n – значення випрямленої напруги в неробочому і номінальному режимах відповідно;

- *коефіцієнт корисної дії (ККД):* $\eta = \frac{P_{\text{вх}}}{P_n} \cdot 100\%$

$$(3.3.3)$$

- ❖ Якщо як вентиля використовують діоди, то такі випрямлячі називаються *некерованими*.
- ❖ У *керованих* випрямлячах використовуються керовані напівпровідникові елементи – тиристори.

3.3.2 Однофазні випрямлячі

Однопівперіодний випрямляч. Схема однопівперіодного випрямляча з активним навантаженням представлена на рис. 3.3.2.

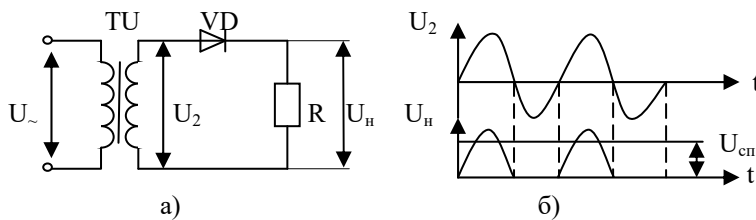


Рис. 3.3.2. Схема однопівперіодного випрямляча (а) та його часові діаграми (б)

При аналізі роботи випрямлячів вважають, що трансформатор і діод ідеальні. Це означає, що:

- ❖ індуктивні опори розсіювання та активні опори обмоток трансформатора, а також опір діода в прямому ввімкненні дорівнюють нулю (в дійсності ж вони не дорівнюють нулю, але дуже малі порівняно з опором навантаження);
- ❖ зворотний опір діода безмежно великий, отже, струм в колі вторинної обмотки трансформатора дорівнює нулю (насправді зворотний опір діода має кінцеву величину, але вона на декілька порядків більша опору діода при прямому ввімкненні і в багато раз більша опору навантаження).

Робота однопівперіодної схеми випрямляча визначається властивостями напівпровідникового діода. Коли на вторинній обмотці трансформатора додатна пів синусоїда напруги, додатний потенціал прикладено до анода діода й він переходить у відкритий стан, тоді струм проходить через діод та навантаження і це триває до моменту, коли синусоїда напруги вторинної обмотки трансформатора змінює знак на протилежний, тобто половину періоду змінної напруги. Від'ємний потенціал на аноді діода приводить до його закриття, відповідно струм через діод і навантаження не проходить (рис. 3.3.2,б). Таким чином, струм в навантаженні R_n має пульсуючий характер, тобто з'являється лише в один з півперіодів напруги U_2 . Коефіцієнт пульсації такого випрямляча дорівнює $K_{\Gamma}=1,7$.

Умови для вибору діода за струмом та за напругою:

$$I_{\text{доп.д}} \geq I_{\text{сп}} \quad (3.3.4)$$

$$U_{\text{зв.доп}} \geq U_{\text{в}} \quad (3.3.5)$$

де $I_{\text{доп.д}}$ – допустимий струм діода, А

$I_{\text{сп}}$ – струм споживача, А

$U_{\text{зв.доп}}$ – зворотна допустима напруга діода, В

$U_{\text{в}}$ – напруга, що діє на діод в непровідний період, В.

Для однопівперіодного випрямляча $U_{\text{в}}$ визначається за формулою:

$$U_{\text{в}} = \pi U_{\text{сп}} \quad (3.3.6)$$

де $U_{\text{сп}}$ – напруга споживача, В.

Однопівперіодний випрямляч служить зазвичай для живлення кіл малої потужності та високої напруги.

Перевагою однопівперіодного випрямляча є простота схеми, наявність лише одного випрямного діода (за умови, що його максимально допустима зворотна напруга дорівнює або більша амплітуди зворотної напруги U_2 , інакше слід вмикати послідовно декілька діодів). Недоліком є погане використання трансформатора за потужністю, так як він працює з підмагнічуванням струму одного напрямку, яке приводить до насичення магнітного потоку осердя, і, як наслідок цього, - високому рівню пульсації. Максимальне значення ККД стає рівним 40,6%.

Двопівперіодні випрямлячі. Перераховані недоліки однопівперіодних випрямлячів відсутні у двопівперіодних, в яких використовуються обидва півперіоди напруги мережі.

Розрізняють два види допівперіодних випрямлячів: мостовий і з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора.

Найбільш розповсюджений **мостовий випрямляч** (рис. 3.3.3,а), в якому випрямні діоди VD1-VD4 ввімкнені за мостовою схемою. До однієї з діагоналей моста підведена змінна напруга, а до другої – опір навантаження R_H . Протягом першого півперіоду напруги U_2 , коли точка a вторинної обмотки трансформатора має додатний потенціал по відношенню до потенціалу точки b , діоди VD1, VD3 відкриті, і в навантаженні виникає струм (рис.3.3.3,в). В цей час діоди VD2, VD4 закриті. В інший півперіод напруги U_2 потенціал точки a більш від’ємний, ніж потенціал точки b , діоди VD2, VD4 відкриті, а діоди VD1, VD3 закриті. При цьому в навантаженні струм має той же напрям, що і в перший півперіод напруги U_2 .

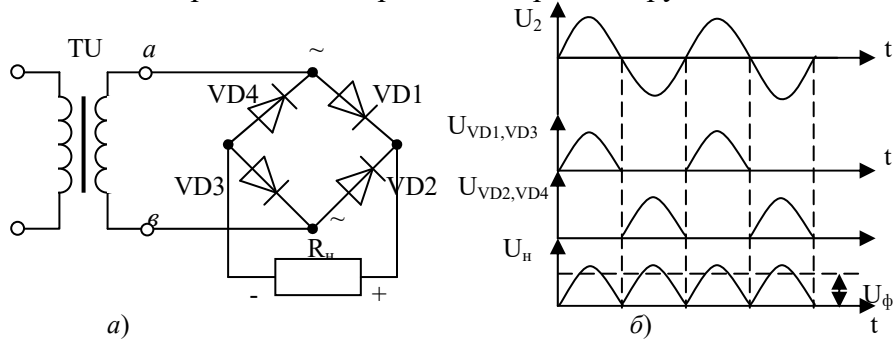


Рис. 3.3.2. Схема мостового випрямляча (а) та його часові діаграми (б)

Коефіцієнт пульсації за діючим значенням – $K_{П} = 0,48$.

Порівняно з однопівперіодною схемою, в мостовій краще використовується трансформатор. Струм у вторинній обмотці кожний півперіод протікає в протилежних напрямках, що усуває підмагнічування.

Змінюється і ККД в мостовій схемі, його максимальне значення дорівнює $\eta=81,2\%$.

Умови для вибору діодів за струмом та за напругою:

$$I_{доп.д} \geq \frac{1}{2} I_{сп} \quad (3.3.7)$$

$$U_{зв.доп} \geq U_в \quad (3.3.8)$$

де $I_{доп.д}$ – допустимий струм діода, А

$I_{сп}$ – струм споживача, А

$U_{зв.доп}$ - зворотна допустима напруга діода, В

$U_в$ – напруга, що діє на діод в неспровідний період, В.

Для мостового випрямляча $U_в$ визначається за формулою:

$$U_в = \frac{\pi}{2} U_{сп} \quad (3.3.9)$$

де $U_{сп}$ – напруга споживача, В.

В схемі **двопівперіодного випрямляча з виводом середньої точки трансформатора** (рис.3.3.4,а) вторинна обмотка трансформатора має середню (нульову) точку, що забезпечує отримання двох напруг u_2 і u_2 однакової амплітуди, але протилежної полярності. Коли на вторинній обмотці трансформатора додатна півсинусоїда напруги u_2 , то струм проходить через діод VD1 - R_H (рис.3.3.4,б), і, навпаки, коли додатна півсинусоїда напруги u_2 - струм проходить через VD2 - R_H . Отже струм через навантаження визначається сумою струмів обох діодів і проходить протягом усього періоду.

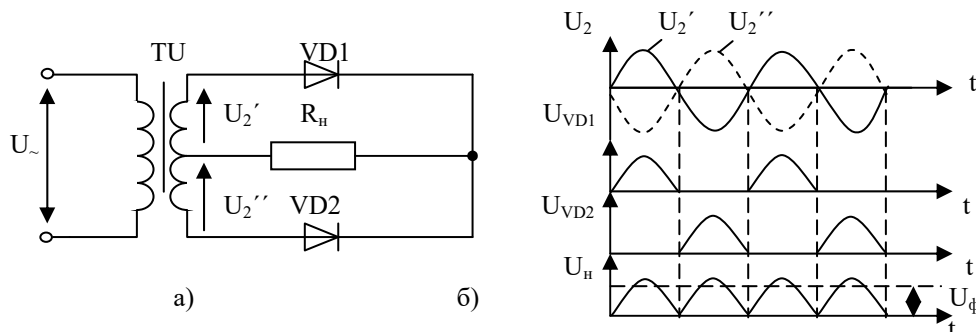


Рис. 3.3.3. Схема двопівперіодного випрямляча з виводом середньої точки трансформатора (а) та його часові діаграми (б)

Коефіцієнт пульсації за діючим значенням – $K_{\Pi} = 0,67$.

Умови для вибору діодів за струмом та за напругою:

$$I_{\text{доп.д}} \geq \frac{1}{2} I_{\text{сп}} \quad (3.3.10)$$

$$U_{\text{зв.доп}} \geq U_{\text{в}} \quad (3.3.11)$$

де $I_{\text{доп.д}}$ – допустимий струм діода, А

$I_{\text{сп}}$ – струм споживача, А

$U_{\text{зв.доп}}$ – зворотна допустима напруга діода, В

$U_{\text{в}}$ – напруга, що діє на діод в неспроможний період, В.

Для мостового випрямляча $U_{\text{в}}$ визначається за формулою:

$$U_{\text{в}} = \pi U_{\text{сп}} \quad (3.3.12)$$

де $U_{\text{сп}}$ – напруга споживача, В.

Недоліком такої схеми є використання спеціального трансформатора і те, що струм вторинної обмотки несинусоїдальний. Це призводить до додаткових втрат в трансформаторі, також зворотна напруга на закритих діодах в два рази більша, ніж в мостового діода.

Порівняння трьох типів випрямлячів при однакових значеннях U_2 і $R_{\text{н}}$ дозволяє виявити їх переваги та недоліки. Двопівперіодні випрямлячі більш ефективні: середні значення випрямлених струмів та напруг у них у два рази більші, а коефіцієнт пульсації значно менший, ніж однопівперіодних випрямлячів. Із двопівперіодних випрямлячів перевагу слід надавати мостовим, так як у них: конструкція простіша і вартість трансформатора менша (за рахунок зменшення кількості витків вторинної обмотки в два рази); максимальна зворотна напруга на закритих діодах в два рази менша. Недоліком мостових випрямлячів є подвоєна кількість випрямних діодів.

В розглянутих в даному параграфі схемах напівпровідникових випрямлячів керування випрямленою напругою можна проводити за допомогою автотрансформатора в колі змінного струму або реостатом, або потенціометром в колі випрямленого струму. Однак подібні способи керування випрямленою напругою (струмом) при відносній простоті мають суттєві недоліки: низький ККД, громіздкість і висока вартість регуляторів. Найбільш економічним, зручним і тому самим розповсюдженим способом керування випрямленою напругою (струмом) є кероване випрямлення.

Керовані випрямлячі. У керованих однофазних випрямлячах використовуються керовані напівпровідникові елементи – тиристори. Як уже відзначалось, у них є керований електрод, а перехід від закритого до відкритого стану здійснюється за умови додатного потенціалу на аноді та наявності імпульсу керування на електроді керування.

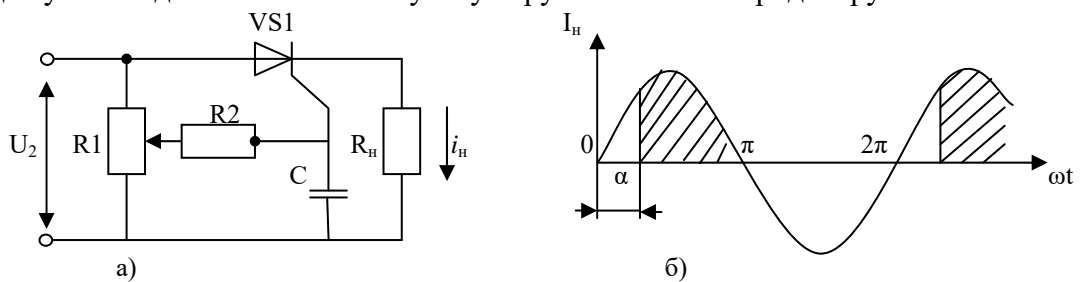


Рис. 3.3.4. Схема (а) та часова діаграма (б) однофазного однопівперіодного керованого випрямляча

На рис.3.3.4 (а) зображена схема найпростішого однофазного однопівперіодного випрямляча на тиристорі VS. Керування випрямленою напругою в керованих випрямлячах зводиться до затримки в часі моменту ввімкнення тиристора по відношенню до моменту його природнього ввімкнення. Це здійснюється за рахунок зсуву фаз між анодною напругою та напругою, яка подається на керуючий електрод тиристора. Такий зсув фаз називають *кутом керування* α . Зміна кута керування α в випрямлячі (рис. 3.3.4, б) відбувається за допомогою фазозсуваючого ланцюга R1R2C. В залежності від опору змінного резистора R1 кут керування α може змінюватися від 0 до 90°, що дозволяє плавно регулювати випрямлену напругу від найбільшої величини до її половини. Залежність середнього значення випрямленої напруги $U_{\text{н}}$

від кута керування α називають *характеристикою керування*. Для однопівперіодного випрямляча максимальне значення кута керування $\alpha_{\max} = \pi/2$, для двопівперіодного - $\alpha_{\max} = \pi$.

На прикладі схеми рис.3.3.4, а бачимо, що керовані випрямлячі виконуються на тиристорах, які вимагають, на відміну від некерованих випрямлячів, спеціальної системи керування для їх відкривання в потрібні моменти. Існує велика різноманітність таких систем керування, в яких в якості фазозсуваючих використовуються RC-ланцюжки.

Інший спосіб отримання зсуву фаз базується на порівнянні в спеціальному (пристрої порівняння) вхідної напруги $U_{вх}$, яка поступає від джерела каліброваної напруги, з напругою $U_{ср}$, яка лінійно змінюється в часі, і синхронізованою змінною напругою $U_{ж}$ живлення.

3.3.3. Випрямлячі з помноженням напруги

Випрямлячі з помноженням напруги використовуються для живлення малопотужних високовольтних пристроїв, для підвищення випрямної напруги на навантаженні при заданій напрузі на вторинній обмотці трансформатора або при відсутності підвищуючого трансформатора з необхідним коефіцієнтом трансформації. Принцип роботи схем помноження напруги ґрунтується на використанні декількох конденсаторів, кожен з яких є додатковим джерелом ЕРС і заряджається від однієї ж обмотки трансформатора, але через різні діоди, для кожного конденсатора свій діод.

Найпростіша схема випрямляча з помноженням напруги наведена на рис. 3.3.5, а. працює така схема наступним чином. Протягом додатного півперіоду, коли потенціал точки А вторинної обмотки силового трансформатора додатний відносно точки Б, конденсатор С1 заряджається через діод VD1 до напруги, рівної амплітуді напруги на вторинній обмотці трансформатора U_{2m} . В другий півперіод, коли потенціал точки А стає від'ємним, а точки Б – додатним, вторинна обмотка трансформатора стає з'єднаною з конденсатором С1 таким чином, що напруги на їх затискачах додаються. Під дією цієї сумарної напруги конденсатор С2 через діод VD2 заряджається майже до подвоєного значення амплітудної напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора $2U_{2m}$. В процесі зарядки конденсатора С2 проходить розрядка конденсатора С1. Потім процес повторюється. при цьому напруга на опорі навантаження, який відімкнений паралельно конденсатору С2, пульсує з частотою напруги мережі.

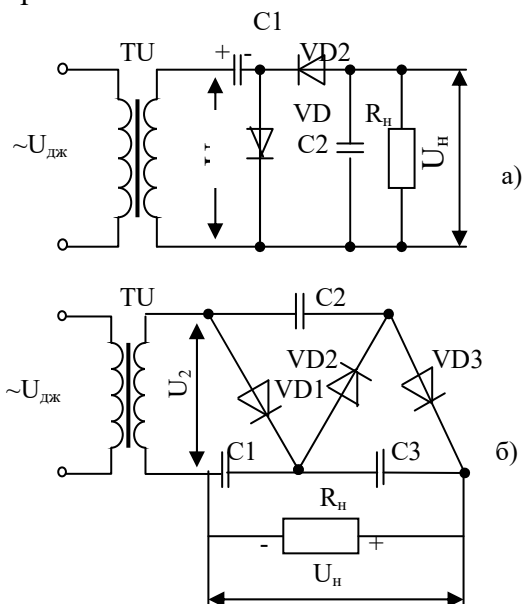


Рис.3.3.5. Схеми випрямлячів з помноженням напруги: а – з подвоєнням; б – з потроєнням

Тому такі схеми застосовуються головним чином для отримання високих напруг при малому струмі навантаження.

На рис. 3.3.5, б наведена схема з потроєнням напруги. За аналогією з розглянутими схемами можуть бути побудовані схеми з більшою кратністю помноження напруги – принципово настільки завгодно великою. Однак чим вища кратність помноження напруги, тим більше діодів і конденсаторів повинно бути в схемі і тим більш високі напруги вони повинні витримувати.

Схеми з помноженням напруги не можуть забезпечити на навантаженні великий випрямлений струм. Пояснюється це тим, що при великому струмі навантаження конденсатори, які входять в схему випрямляча, повинні мати дуже велику ємність. В іншому випадку вони будуть швидко розряджатися і пульсації напруги на навантаженні стануть недопустимо великими.

3.3.4. Трифазні випрямлячі

Трифазні випрямлячі використовуються як джерела постійної напруги живлення середньої та високої потужності. Вони рівномірно навантажують коло трифазного струму і

відрізняються високим коефіцієнтом використання силового трифазного трансформатора. Особливість їх роботи визначається тим, що робочим діодом (відкритий стан) є той, у якого в цей момент є більший потенціал на аноді. Це забезпечує тривалість відкритого стану діода протягом 60 град.ел., внаслідок чого значно зменшуються пульсації випрямленої напруги.

Переважно використовуються дві схеми трифазних випрямлячів: трифазна з нульовим виводом (схема Міткевича) і трифазна мостова (схема Ларіонова).

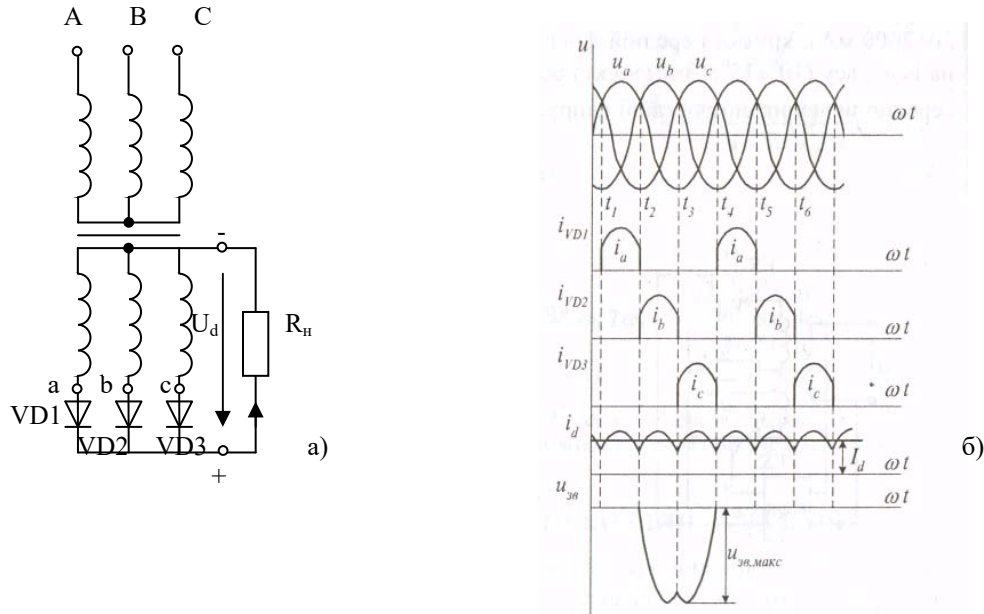


Рис. 3.3.6. Схема трифазного випрямляча з нульовим виводом (а) і часові діаграми

Трифазний випрямляч з нульовим виводом (рис. 3.3.6, а) складається з трифазного трансформатора, фази вторинної обмотки якого з'єднані зіркою, та трьох діодів, ввімкнених в кожену фазу. Роботу випрямляча зручно аналізувати за допомогою часових діаграм (рис. 3.3.6, б). в період часу $t_1 \div t_2$ найбільший додатний потенціал прикладено до анода VD1, тому він знаходиться у відкритому стані. Струм проходить через діод (обмотку фази «а» - VD1 – $R_{\text{н}}$) протягом $\pi/3$, тобто до моменту часу t_2 , коли у відкритий стан переходить VD2, оскільки в цей момент часу до його анода прикладено найбільший додатний потенціал фази «б». Через VD2 струм проходить в проміжок часу від t_2 до t_3 . Відповідно через VD3 струм проходить в період часу $t_3 \div t_4$.

Середнє значення випрямленої напруги трифазного випрямляча з нульовим виводом дорівнює

$$U_{\text{сп}} = 1,17U_2 \quad (3.3.13)$$

В період часу, коли діод закритий, до нього прикладається зворотна напруга, максимальне значення якої

$$U_{\text{зв.макс}} = 2,1U_{\text{сп}} \quad (3.3.14)$$

Коефіцієнт пульсацій для такої схеми $K_{\text{П}} = 0,25$, що набагато менше порівняно з однофазними випрямлячами.

Випрямляч за такою схемою використовується для навантажень зі струмами понад 100 А. Недоліком схеми є підмагнічування осердя трансформатора постійною складовою струму, що понижує ККД випрямляча.

Умови для вибору діодів за струмом та за напругою:

$$I_{\text{доп.д}} \geq \frac{1}{3} I_{\text{сп}} \quad (3.3.15)$$

$$U_{\text{зв.доп}} \geq U_{\text{в}} \quad (3.3.16)$$

де $I_{\text{доп.д}}$ – допустимий струм діода, А

$I_{\text{сп}}$ – струм споживача, А

$U_{\text{зв.доп}}$ - зворотна допустима напруга діода, В

$U_{\text{в}}$ – напруга, що діє на діод в неспроможний період, В.

Для трифазного випрямляча $U_{\text{в}}$ визначається за формулою:

$$U_g = 2,1U_{cn} \quad (3.3.17)$$

де U_{cn} – напруга споживача, В.

Трифазний мостовий випрямляч (схема Ларіонова, рис.3.3.7, а) містить дві групи діодів: анодну – VD1, VD3, VD5 і катодну – VD2, VD4, VD6. робота випрямляча, тобто по черговість роботи діодів, визначається як додатними пів синусоїдами (анодна група), так і від’ємними (катодна група). Тривалість роботи кожного діода становить 60 град.ел. В інтервалі часу $t_1 \div t_2$ струм проходить по шляху: обмотка фази «а» - VD1- R_H - VD4 – обмотка фази «б». В інтервалі часу $t_2 \div t_3$ відбувається комутація діодів VD4 і VD6 і шлях проходження струму є такий: обмотка фази «а» - VD1- R_H – VD6 – обмотка фази «с». таким чином, через навантаження струм проходить завжди в одному напрямку, а можливість використання від’ємних пів синусоїд забезпечує в схемі випрямляча коефіцієнт пульсацій $K_{\Pi} = 0,057$, що забезпечує широке використання такої схеми.

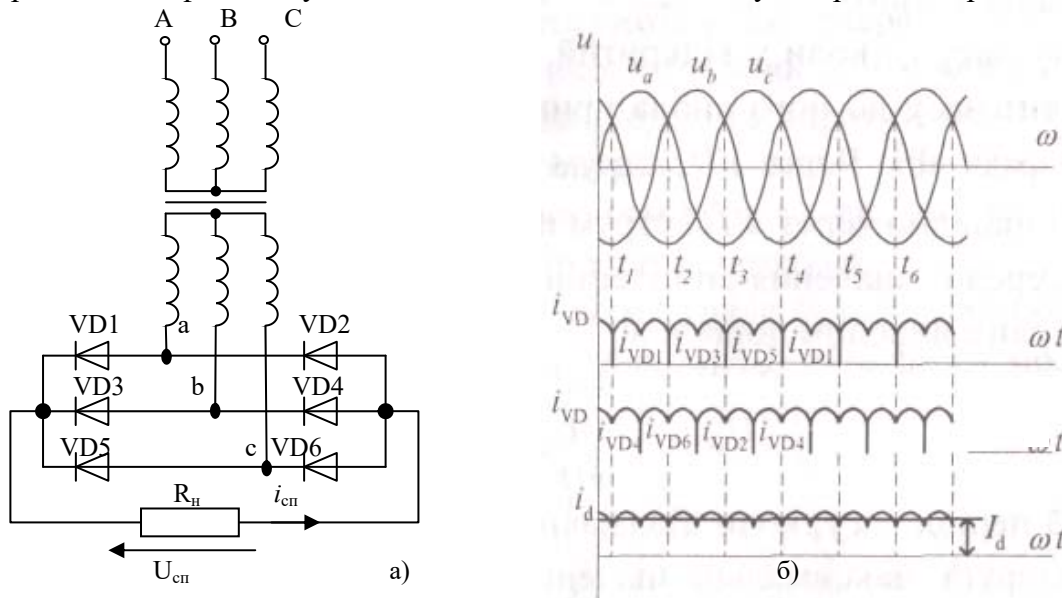


Рис. 3.3.7. Схема трифазного мостового випрямляча (а) та його часові діаграми (б)

Середнє значення випрямленої напруги трифазного випрямляча дорівнює

$$U_{cn} = 2,34U_2, \quad (3.3.18)$$

що у 2 рази більше, ніж у випрямлячів за схемою Міткевича. Максимальне значення зворотної напруги діода дорівнює

$$U_{зв.макс} = 1,045U_{cn} \quad (3.3.19)$$

3.3.5. Згладжуючі фільтри

Форма напруги на виході випрямлячів не є достатньо гладкою й характеризується пульсаціями, зумовленими наявністю у випрямленій напрузі вищих гармонік, їх вплив (кількісна характеристика) визначається коефіцієнтом пульсацій K_{Π} . Сучасні пристрої електроніки вимагають такий рівень пульсацій випрямленої напруги, який характеризується $K_{\Pi} = 10^{-2} \div 10^{-4}$. Тому, для зниження рівня пульсацій, використовують згладжуючі фільтри, основною характеристикою яких є коефіцієнт згладжування

$$q = \frac{K_{\Pi.вх}}{K_{\Pi.вих}}, \quad (3.3.20)$$

де $K_{\Pi.вх}$, $K_{\Pi.вих}$ - коефіцієнти пульсацій випрямленої напруги на вході та виході фільтра відповідно.

За принципом роботи та схемним рішенням згладжуючі фільтри поділяються на **пасивні** та **активні** (електронні).

Пасивні згладжуючі фільтри. Пасивні згладжуючі фільтри базуються на фізичних властивостях пасивних елементів. Найширше використовуються схеми фільтрів: типу «С»; типу «L» і типу «LC» або їх комбінації (рис. 3.3.8).

Робота фільтра *типу* «С» (рис. 3.3.8, а) базується на властивості ємності нагромаджувати електричну енергію та явищі заряду-розряду конденсатора. Конденсатор заряджається тоді, коли вхідна напруга $U_{вх}$ більша, ніж напруга на конденсаторі $U_{вих}$ і розряджається через опір навантаження за умови $U_{вх} < U_{вих}$ (рис. 3.3.9, а).

Фільтр типу «С» застосовують у схемах випрямлячів з потужністю навантаження $P_A < 300$ Вт. Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги на виході такого фільтра за умови, що $\tau_{роз} > 10T$, (T — період змінної складової) визначається за формулою

$$K_{П.вих} = \frac{1}{2\pi f R_H C_\phi}, \quad (3.3.21)$$

де $\tau_{роз}$ — стала часу розряду конденсатора; f - частота основної гармоніки випростаної напруги; R_H -- опір навантаження; C_ϕ — ємність фільтра.

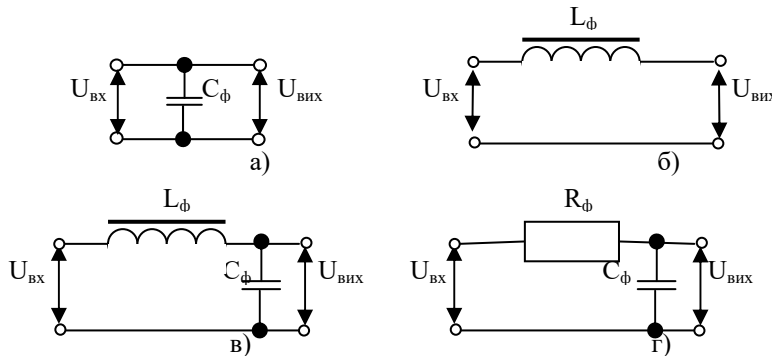


Рис. 3.3.8. Схеми пасивних фільтрів: а – С-фільтр; б – L-фільтр; в- LC-фільтр (Г-подібний); г – RC-фільтр (Г-подібний)

У разі використання фільтра типу «С» необхідно враховувати, що під час заряду конденсатора струм діода обмежується тільки опором вторинної обмотки трансформатора (опір діода у відкритому стані є дуже малий). Тому, з метою обмеження величини струму послідовно до діода, вмикають додатковий резистор.

Для споживачів потужністю, більшою ніж 300 Вт, застосовують фільтр *типу* «L» (рис. 3.3.8, б). Послідовне з'єднання елементів L_ϕ і R_H зумовлює відставання за фазою струму $I_{сп}$ відносно напруги $U_{вх}$. Для збільшення ефективності згладжування використовують індуктивності з феромагнітним осердям. Індуктивність нагромаджує магнітну енергію, що веде до збільшення тривалості проходження струму порівняно з тривалістю додатної напруги на діоді (рис. 3.3.9, б). Внаслідок цього зменшуються пульсації випрямленої напруги на навантаженні, а коефіцієнт згладжування у цьому випадку визначається за виразом

$$q = \frac{2\pi f L_\phi}{R_H}, \quad (3.3.22)$$

де L_ϕ — індуктивність фільтра.

Ефективність роботи такого фільтра визначається співвідношенням $\omega L_\phi \gg R_H$. Тому ці фільтри рекомендується використовувати у схемах трифазних випрямлячів, які характеризуються великими струмами навантаження.

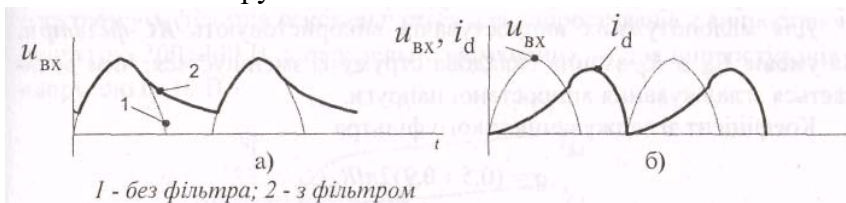


Рис.3.3.9. До пояснення роботи С-фільтра і L-фільтра.

Ефективніше зменшити пульсації випрямленої напруги можна за допомогою фільтра типу «LC». Такі фільтри використовують, коли опір навантаження дорівнює десяткам або сотням Ом. їх принцип роботи базується на одночасному використанні згладжуючих властивостей ємності та індуктивності. За схемною реалізацією поділяються на Г- подібні та П-подібні (рис.3.3.10).

Для фільтра типу «LC» (Г-подібний фільтр) коефіцієнт згладжування визначають за виразом $q = (4\pi f)^2 L_\phi C_\phi - 1$, де f – частота основної гармоніки.

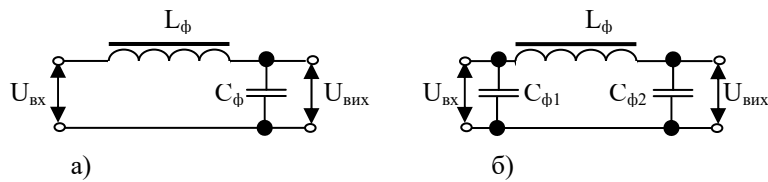


Рис. 3.3.10. LC – фільтри: Г-подібний (а); П-подібний (б)

У разі вибору параметрів LC-фільтра рекомендується використовувати такі співвідношення:

$$2\pi fL \approx (5 \div 10)R_n; \quad \frac{1}{2\pi fC} \approx (0,1 \div 0,2)R_n$$

Для ефективнішого згладжування використовуються П-подібні фільтри, які називають багатоланковими (рис.3.3.10,б). Такі фільтри розглядають як ємнісний ($C_{\phi 1}$) і Г-подібний ($L_{\phi}C_{\phi 2}$), а коефіцієнт згладжування визначається $q_{\Pi} = q_c q_{\Gamma}$. Для інженерних розрахунків користуються такою рекомендацією: якщо $R_n > 1 \text{ кОм}$, то використовують П-подібний фільтр типу CRC (замість ланки L_{ϕ} рис. 3.3.10,б використовується R_{ϕ}), а якщо менше, то — фільтр типу CLC.

Для малопотужних випрямлячів використовують **RC-фільтри**. За умови $X_{c\phi} < R_{\phi}$ змінна складова струму $I_{c\phi}$ зменшується, чим досягається згладжування випрямленої напруги.

Коефіцієнт згладжування такого фільтра

$$q = (0,5 \div 0,9) 4\pi f R_{\phi} C_{\phi}?$$

а опір фільтра R_{ϕ} вибирають за умовою

$$\frac{R_t}{R_t + R_{\delta}} = (0,5 \div 0,9) \cdot$$

Активні згладжуючі фільтри. В сучасних пристроях електроніки використовуються фільтри, в яких основним елементом є транзистор. Відповідно, такі фільтри називають **електронними або активними**.

Робота транзисторного фільтра базується на відмінності за величиною опору транзистора для постійної та змінної складових струму колектора. Режим транзистора визначається робочою точкою, яку вибирають на горизонтальній ділянці вихідної характеристики $I_K(U_{KE})$ (рис. 3.3.11). Тоді опір постійному струму (статичний опір)

$$R_{cm} = \frac{U_{KE.A}}{I_{K.A}}$$

є незначний, а опір змінній складовій струму (динамічний опір) $R_{\delta} = \frac{U_{KE}}{I_K}$ —

набагато більший. Враховуючи, що $\frac{R_{\delta}}{R_{cm}} \approx 10^2 \div 10^3$ то при цьому досягається зменшення

пульсацій в 3÷5 разів. Тобто робота такого фільтра подібна до роботи фільтра типу «L».

Схеми фільтрів поділяють за способом вмикання навантаження, а саме, послідовно та паралельно до фільтра. Послідовне ввімкнення електронних фільтрів рекомендується для випрямлячів з випрямною напругою 300÷400 В, а паралельне ввімкнення — для випрямлячів з напругою 0÷10 В.

Розглянемо роботу активного фільтра на прикладі схеми з послідовним вмиканням навантаження до фільтра (рис. 3.3.12, а). Для того, щоб вищі гармоніки вхідного сигналу не проходили через перехід емітер-база й не підсилювались транзистором, вхідний струм фільтрується ланкою $C_{\phi}R_{\phi}$. Резистор R_E і вхідний опір транзистора також є ланкою фільтра. Завдяки від'ємному зворотному зв'язку за струмом отримуємо згладжуючу дію конденсатора C_{ϕ} і резистора R_E . Враховуючи, що $R_{\delta} \gg R_{ct}$, то відповідно і спад напруги від змінної складової струму буде більшим.

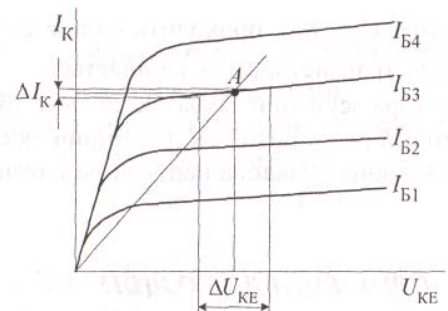


Рис. 3.3.11. До пояснення роботи транзисторного фільтра

Необхідною умовою роботи такого фільтра є наявність RC -ланки, стала часу якої повинна бути набагато більшою за період пульсацій основної гармоніки випрямленої напруги $C_B R_B \gg T^{(1)}$.

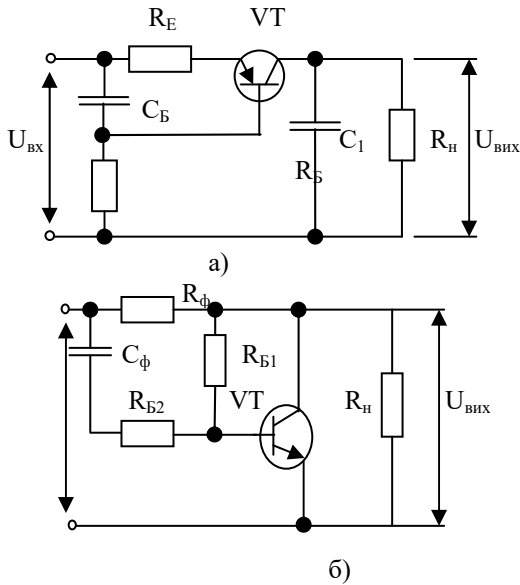


Рис. 3.3.12. Схеми транзисторних фільтрів з послідовним (а) та паралельним (б) вмиканням навантаження

На рис.3.3.12, б показано схему паралельного вмикання активного фільтра. Резистор R_{B1} призначений для задання робочої точки транзистора. Через елементи C_B , R_B проходить змінна складова струму бази, яка підсилюється транзистором і виділяється на резисторі $R_Ф$. оскільки струм колектора зсунений за фазою щодо струму бази на π , то напруга на резисторі $R_Ф$ є в протифазі до змінної складової вхідної напруги. В результаті змінна складова напруги на навантаженні значно послаблюється.

3.3.6. Стабілізатори постійної напруги

Стабілізатори напруги — це електронні пристрої, призначені для підтримання сталого значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору навантаження (дестабілізуючі чинники). За принципом роботи стабілізатори напруги поділяються на **параметричні** та **компенсаційні**. Параметричний метод стабілізації базується на зміні параметрів нелінійного елемента стабілізатора, залежно від зміни дестабілізуючого чинника, а стабілізатор називають параметричним.

В компенсаційному методі стабілізації у вимірювальному елементі порівнюється величина, що стабілізується, з еталонною і виробляється сигнал розузгодження. Цей сигнал перетворюється, підсилюється і подається на регулювальний елемент.

Параметричні стабілізатори напруги. Параметричний стабілізатор напруги на базі стабілітрона показано на рис. 3.3.13.

Особливості роботи такого стабілізатора напруги базуються на тому, що напруга стабілітрона на зворотній ділянці його вольт-амперної характеристики $U_{ст.доп}$ змінюється незначно в широкому діапазоні зміни зворотного струму стабілітрона. Тобто коливання напруги на вході стабілізатора зумовлюють значну зміну струму стабілітрона при незначних змінах напруги на ньому.

Стабілізатори характеризуються коефіцієнтом стабілізації

$$K_{cm.U} = \frac{\Delta U_{ex} / U_{ex}}{\Delta U_{вих} / U_{вих}}, \quad (3.3.23)$$

який для параметричних стабілізаторів становить $K_{cm.U} = 20 \div 30$.

Рівняння електричної рівноваги для такого стабілізатора має вигляд: $U = U_H + R_B I$, де R_B — баластний опір, необхідний для зменшення впливу дестабілізуючих чинників на напругу навантаження.

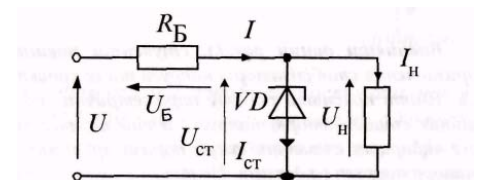


Рис. 3.3.13. Схема параметричного стабілізатора напруги

Опір баластного резистора R_B вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела U напруга і струм стабілітрона теж дорівнювали номінальним значенням $U_{ст.н}$, $I_{ст.н}$. Величину $I_{ст.н}$ визначають за паспортними даними та виразом

$$I_{ст.н}^2 = (I_{ст.н}^2 + I_{ст.н}^2) / 2. \quad (3.3.24)$$

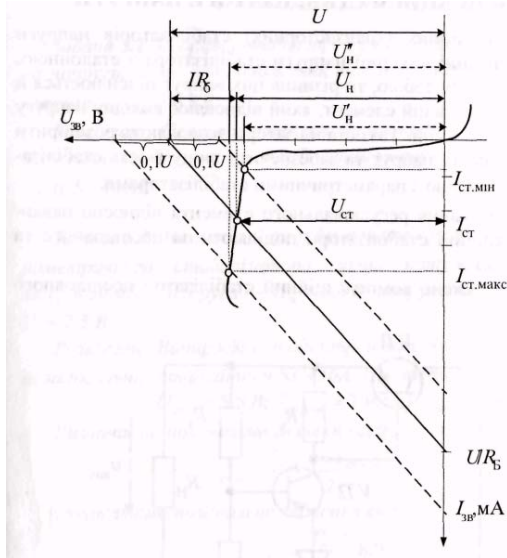
Тоді, з рівняння електричної рівноваги, визначаємо баластний опір за виразом

$$R_B = \frac{U - U_{ст.н}}{I_{ст.н}}, \quad (3.3.25)$$

де $I_H = P_H / U_H$; $U \approx U_{ст.н}$; $I = I_{ст.н} + I_H$.

Роботу параметричного стабілізатора зручно ілюструвати за допомогою вольт-амперної характеристики (ВАХ) стабілітрона та відповідної графічної побудови навантажувальної прямої (рис.3.3.14). Для побудови ВАХ стабілітрона за його паспортними даними через точку з координатами $U_{ст.н}$, $I_{ст.н}$ проводять пряму лінію під кутом α до осі координат, що визначається значенням динамічного опору стабілітрона R_d . Далі будуємо навантажувальну характеристику при номінальній напрузі джерела. Для цього визначаємо координати двох точок, через які проходить пряма. А саме, точка з координатою $U_{ст.н}$, $I_{ст.н}$ точка на осі ординат, яка визначається за виразом $I = U/R_B$. Через ці точки проводимо навантажувальну пряму.

Роботу стабілізатора перевіряють за умови його здатності забезпечувати задане значення U_H при коливаннях вхідної напруги U . Для прикладу, якщо вхідна напруга змінюється в межах $\pm 10\%$, то на виході стабілізатора коливання напруги U_H становить $\pm 0,1\%$ (рис. 3.3.14).



Побудова навантажувальних прямих при зміні напруги мережі в межах $\pm 10\%$ здійснюється шляхом паралельного зсуву навантажувальної характеристики при номінальній напрузі мережі відповідно вліво і вправо на $0,1U$. За допомогою цієї побудови можна з'ясувати, чи при таких коливаннях напруги мережі забезпечуються умови стабілізації, тобто, чи точки перетину зсунених навантажувальних характеристик з ВАХ стабілітрона не виходять за межі значень струмів стабілітрона $I_{ст.мін}$ і $I_{ст.макс}$.

Рис. 3.3.15. Вольт-амперна характеристика стабілізатора

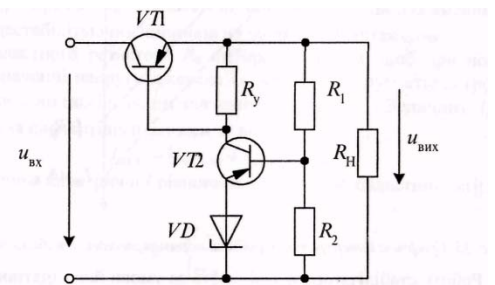
Компенсаційні стабілізатори напруги. Робота компенсаційних (транзисторних) стабілізаторів напруги базується на порівнянні вихідної напруги стабілізатора з еталонною. Якщо вони не рівні між собою, то різниця цих напруг підсилюється й подається на регулювальний елемент, який відновлює вихідну напругу до стабілізованої величини. Такі стабілізатори дозволяють розширити діапазон стабілізованих напруг та забезпечити вищу якість стабілізації ($K_{ст.у} > 50$) порівняно з параметричними стабілізаторами.

За способом вмикання регулювального елемента відносно навантаження, компенсаційні стабілізатори поділяють на послідовного та паралельного типів.

На рис. 3.3.15 зображено компенсаційний стабілізатор послідовного типу.

Рис. 3.3.15. Схема компенсаційного стабілізатора напруги

Транзистор $VT1$ виконує функцію регулювального елемента, а транзистор $VT2$ — функцію підсилювального елемента. Еталонна напруга задається з допомогою стабілітрона VD . Вона порівнюється з напругою на резисторі R_1 , яка пропорційна вихідній напрузі стабілізатора, тому що цей резистор є плечем діляника напруги R_1 , R_2 . Різниця цих напруг підсилюється транзистором $VT2$ і виділяється на резисторі R_y . Напруга на



цьому резисторі є входною напругою регульовального елемента $VT1$ і, тому, зумовлює зміну напруги емітер-колектор $VT1$, завдяки чому забезпечується стабілізація вихідної напруги.

3.3.7. Стабілізатори струму

Стабілізатори струму – це елементи електронних схем, які призначені для підтримання постійності величини струму в колах.

Найпростіша схема, яка широко розповсюджена в напівпровідникових і мікроелектронних пристроях, транзисторного стабілізатора струму показана на рис. 3.3.16. в коло емітера транзистора VT ввімкнений резистор R_E , а між джерелом входної напруги і базою цього транзистора через обмежувальний резистор R_B ввімкнений кремнієвий стабілітрон VD .

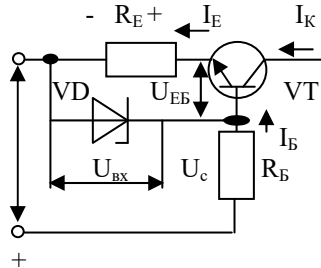


Рис. 3.3.16. Транзисторний стабілізатор струму

Необхідно стабілізувати струм колектора I_K , якщо напруга на стабілітроні і на переході емітер – база транзистора змінюються під дією дестабілізуючих факторів однаково, то струм колектора буде стабілізований.

Стабілізатор працює так. Нехай з тієї чи іншої причини струм емітера транзистора збільшився. Тоді на резисторі R_E збільшується спад напруги, яка прикладається через стабілітрон, напругу на якому

змінено, до ділянки емітер – база (плюс на емітері, мінус на базі). Така полярність напруги для транзистора типу n-p-n призводить до збільшення опору транзистора і відновлення попереднього значення емітерного струму. При незмінній величині I_E струм колектора I_K також залишиться незмінним.

3.3.8 Стабілізатори постійної напруги на ІМС

Необхідність в стабілізаторах для живлення апаратури, виконаної на ІМС, привела до розробки спеціальних схем інтегральних стабілізаторів напруги.

В якості прикладу на рис. 3.3.17 наведена схема інтегрального стабілізатора напруги, зібраного на ІМС типу К2ПП241. стабілізатор забезпечує живлення малопотужних навантажень струмом до 4 мА при коефіцієнті стабілізації не менше 5. при входній напрузі 5,4...12 В стабілізована напруга складає 3,3...3,9 В.

Стабілізатор складається із опорного елемента (стабілітрона $VD1$, який підключається до мікросхеми), підсилювача на транзисторі $VT2$ і регулюючого елемента на транзисторі $VT1$. входними затискачами схеми є виводи 2 і 3, вихідними – 7 (або 9) і 3.

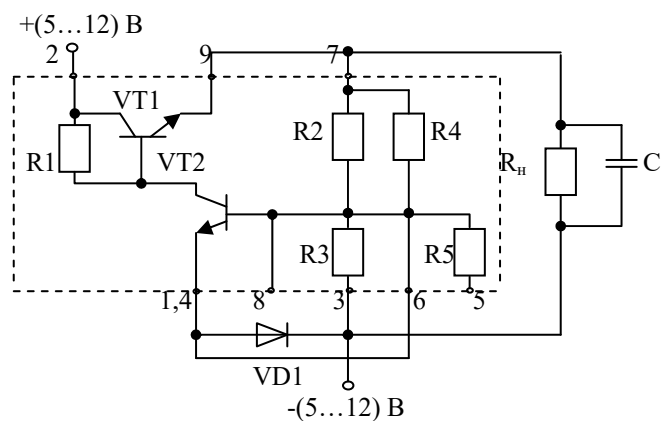


Рис. 3.3.17. Інтегральний стабілізатор на ІМС типу К2ПП241

3.3.9 Стабілізатори змінної напруги

В сучасних блоках живлення для стабілізації змінної напруги мережі зазвичай застосовуються електромагнітні стабілізатори. В них використовується параметричний метод стабілізації напруги. В залежності від типу нелінійного елемента електромагнітні стабілізатори

діляться на два основних типи: стабілізатори з насиченим магнітним осердям та стабілізатори з використанням резонансу струмів або напруг (ферорезонансні стабілізатори).

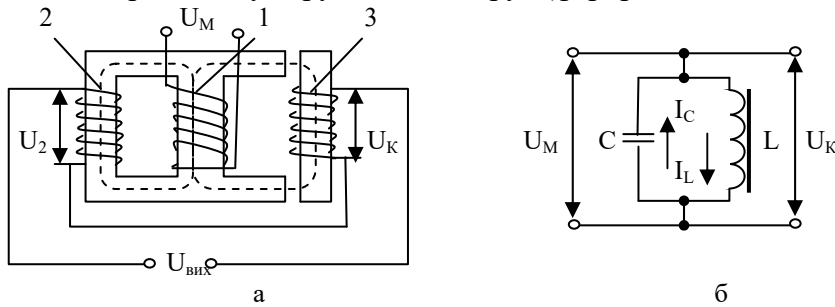


Рис. 3.3.18. Електромагнітний стабілізатор напруги з насиченим магнітним осердям (а); ферорезонансний паралельний контур (б)

Стабілізатори з насиченим магнітним осердям. В таких стабілізаторах використовується не лінійність кривої намагнічування феромагнітних матеріалів. Найбільш розповсюджена схема стабілізатора такого типу зображена на рис. 3.3.18, а.

Стабілізатор складається із трансформатора спеціальної конструкції, що являє собою три стержневе осердя, на якому є три обмотки. На середньому стержні розташована первинна обмотка, на неї подається змінна напруга мережі U_M , яка стабілізується. На лівому стержні, переріз якого береться меншим за середній, розташована вторинна обмотка. Послідовно з вторинною обмоткою ввімкнена компенсаційна обмотка. Стержень, на якому розташована компенсаційна обмотка може переміщуватися, змінюючи величину зазору в магніто проводі. Цим регулюється величина магнітного потоку, що пронизує витки компенсаційної обмотки.

До переваг такої схеми можна віднести: простоту конструкції, надійність в роботі і без інерційність. Недоліками схеми є: невеликі межі стабілізації, спотворення форми стабілізованої напруги, низькі ККД і $\cos\phi$, а також залежність величини стабілізованої напруги від частоти мережі.

Ферорезонансні стабілізатори. Нелінійним елементом в ферорезонансних стабілізаторах напруги є резонансний контур, який складається із насиченого дроселя та ємності, причому контур може бути послідовним або паралельним. Практично більш високий коефіцієнт стабілізації і ККД можна отримати при паралельному ввімкненні дроселя і конденсатора, тобто, при резонансі струмів.

На рис. 3.3.18, б наведена схема ферорезонансного паралельного контуру. Межі стабілізації напруги в ферорезонансних стабілізаторах значно ширші, ніж в електромагнітних стабілізаторах з насиченим магнітним осердям. Такі стабілізатори можуть підтримувати напругу на виході з точністю до $\pm 1\%$ при змінах вхідної напруги на $\pm 20\%$, однак вони дуже чутливі до змін частоти напруги живлення.

При використанні ферорезонансних стабілізаторів слід враховувати, що навколо них в процесі роботи утворюється сильне магнітне поле розсіювання, яке може створити наводки на підсилювачі і вимірювальну апаратуру.

3.3.10 Інвертори струму та напруги

Інвертори – пристрої для перетворення постійного струму в змінний струм заданої частоти та напруги. Основним елементом інверторів є безконтактний ключ, тобто, пристрій, комутуючий електричні кола. В якості ключів на даний час використовують транзистори і тиристри, які мають низьку напругу насичення в відкритому стані і малий струм в закритому стані, дякуючи цьому ККД інверторів дуже високий і досягає 95%.

На рис.3.3.19 наведена схема інвертора на транзисторах. Інвертори такого типу використовуються в електронній апаратурі малої і середньої потужності, коли необхідно перетворити постійну напругу однієї величини (зазвичай меншої) в постійну напругу іншої величини (зазвичай більшої). Такі перетворювачі отримали широке застосування в установках, ів яких первинним джерелом живлення є, наприклад, акумуляторні, сонячні і атомні батареї.

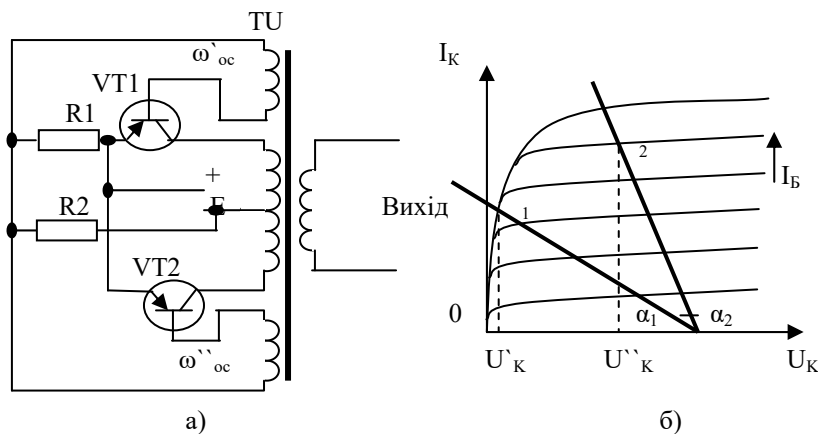


Рис. 3.3.19. схема інвертора з самозбудженням (а) і зміна положення лінії навантаження на вихідних характеристиках транзистора при його роботі (б)

В інверторі рис. 3.3.19, а транзистори ввімкнені за схемою зі СБ. самозбудження інвертора досягається введенням позитивного зворотного зв'язку між вихідним (колекторним) і вхідним (базовим) колами, який здійснюється за допомогою обмоток ω'_{oc} і ω''_{oc} трансформатора. В результаті цього транзистори VT1 і VT2 відкриваються і закриваються по чергові і на виході інвертора з'являються імпульси прямокутної форми змінної полярності. Нехай, інвертор самозбудився і один із транзисторів, наприклад транзистор VT1, відкритий і знаходиться в стані насичення, якому відповідає напруга на транзисторі U'_k (пряма 1 на рис.3.3.19, б), а транзистор VT2 закритий. Постійна напруга E , яка прикладена до верхньої половини первинної обмотки трансформатора з виводом середньої точки, викликає появу в осерді трансформатора магнітного потоку Φ , який змінюється по лінійному закону. Лінійно зростаючий магнітний потік обумовлює ЕРС в обмотках ω'_{oc} і ω''_{oc} . З цієї причини у вхідному (базовому) колі транзистора VT1 наводиться ЕРС, яка підтримує цей транзистор відкритим. ЕРС, яка наводиться в обмотці ω''_{oc} , підтримує закритим транзистор VT2. коли осердя трансформатора наближається до стану насичення, швидкість зростання магнітного потоку знижується. Зменшується і ЕРС, яка наводиться в обмотках ω'_{oc} і ω''_{oc} . Після насичення осердя трансформатора опір його змінному струму спадає і вся напруга $U''_k \approx E$ прикладається до транзистора VT1. Його колекторний струм зростає і тим самим виводить транзистор із режиму насичення (пряма 2 рис.3.3.19, б). Це призводить до того, що ЕРС, що наводяться в обмотках ω'_{oc} і ω''_{oc} змінюються до таких величин, які забезпечують закривання транзистора VT1 і відкривання транзистора VT2. далі процес повторюється. Ввімкнені в інвертор резистори R1 і R2 необхідні для того, щоб на базах транзисторів в момент ввімкнення був відкриваючий (від'ємний) потенціал, інакше інвертор не само збудиться.

Широке розповсюдження отримали інвертори, виконані на тиристорах. В залежності від характеру зв'язку з джерелами живлення такі інвертори діляться на інвертори струму та інвертори напруги.

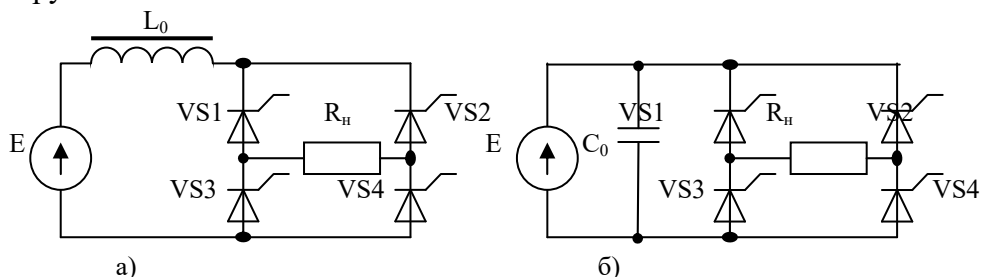


Рис. 3.3.20. Схеми інверторів струму (а) та напруги (б)

Інвертор струму живиться від джерела постійної ЕРС через дросель великої індуктивності L_0 (рис.3.3.20, а), внаслідок чого струм у вхідному колі інвертора при комутації тиристорів практично залишається незмінним.

Інвертор напруги (рис.3.3.20, б) підключають безпосередньо до джерела живлення. Характерним для такого перетворювача є наявність конденсатора великої ємності C_0 , відімкненого паралельно входу інвертора. Цей конденсатор забезпечує при комутації тиристорів постійність напруги на інверторі. Комутація тиристорів здійснюється від спеціальної системи

управління, що формує кути управління α для кожного тиристора. Значення цих кутів визначають форму змінної напруги в навантаженні R_H .

В залежності від умов експлуатації застосовують різні модифікації перетворювачів, які мають схеми більш складніші від розглянутих. Необхідно зазначити, що використання в схемах тиристорів вимагає спеціальних засобів захисту електронної апаратури від електронних перешкод. Останні виникають від швидкого перемикання струмів в колах регулювання.

Контрольні питання та вправи

1. Які переваги мають випрямлячі порівняно з іншими джерелами живлення?
2. Чи можливо побудувати випрямну схему без силового трансформатора?
3. Як вибирають вентиля (діоди) для роботи в схемах випрямлячів?
4. Підберіть напівпровідникові діоди для мостової схеми випрямлення, якщо $U_{ст}=100$ В; $I_{ст} = 30$ мА.
5. Розкажіть про роботу трифазних випрямлячів.
6. Яку функцію виконує в схемі керованого випрямляча тиристор?

РОЗДІЛ 4. ОСНОВИ ЦИФРОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМОТЕХНІКИ

4.1 ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ

4.1.1 Загальні характеристики сигналів

Форма і способи перетворення електричних сигналів нерозривно зв'язані з основними принципами побудови електронних пристроїв.

Електричні сигнали можна розділити за фізичною суттю на *аналогові* і *дискретні*.

Аналогові сигнали - це неперервні в часі функції напруги або струму і у свою чергу поділяються на постійні і змінні. *Постійні аналогові сигнали* однополярні, в яких повільно змінюється в часі напруга і струм. *Змінними аналоговими сигналами* називаються функції напруги і струму, що змінюються в часі як за амплітудою, так і за знаком. Частковим випадком змінного сигналу є гармонічний або синусоїдальний.

Дискретними називаються такі електричні сигнали, які представляють розривні в часі функції напруги або струму і можуть приймати обмежене число рівнів. Найчастіше в електроніці використовуються дискретні сигнали, які мають тільки два рівні - високої напруги (струму) і низької напруги (струму). Такі сигнали називаються імпульсними, або двійковими. Представлення інформації за допомогою таких сигналів має низку переваг: простота, висока надійність, нескладність електронних пристроїв, їх ще називають цифровими і умовно позначають: "1" - напруга 5 В або 3 В; і "0" - 0 В.

Розділ електроніки, який вивчає формування, перетворення, передачу двійкових сигналів, називається **цифровою технікою**.

Аналогова або дискретна форма подання сигналу суттєво впливає на принципи побудови та особливості роботи електронних пристроїв.

За характером імпульсних сигналів розрізняють схеми: імпульсні, в яких вхідними і вихідними сигналами є імпульси напруги (струму) (рис. 4.1,а); потенціальні - сигналами є потенціали (рівні) напруги (рис.4.1,б); імпульсно-потенціальні - сигнали можуть бути імпульсними і потенціальними (рис.4.1,в).

Цифрові пристрої здійснюють логічні перетворення сигналів, їх запам'ятовування, сумування, шифрування і дешифрування цифрових кодів, події частоти імпульсів і низку інших операцій.

Так, автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) не можуть обійтись без цифрових пристроїв.

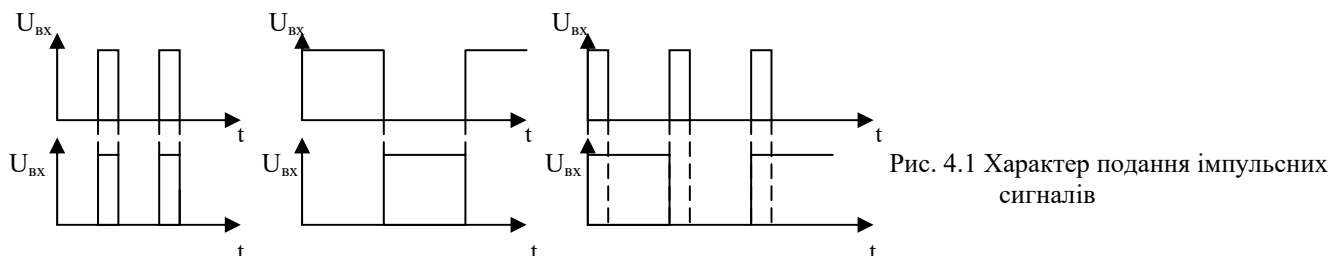


Рис. 4.1 Характер подання імпульсних сигналів

Кодування - це процес перетворення інформації в комбінацію різних символів або відповідних їм сигналів. Правило (алгоритм), що співставляє кожному конкретному повідомленню визначену комбінацію різних символів (сигналів), називають *кодом*.

Процес відновлення змісту повідомлення за даним кодом називається *декодуванням*. При кодуванні інформація, що передається, не залежить від частоти, амплітуди і тривалості.

Процес кодування пов'язаний з перетворенням неперервних величин в дискретні (рис. 1.5). Таке перетворення базується на операціях дискретизації (квантуванні за часом, квантуванні за рівнем і сукупності цих операцій -комбінованому квантуванні).

Основні характеристики електричних сигналів імпульсного типу

Електричним імпульсом називають напругу або струм, що відрізняється від нуля і має постійне значення лише протягом короткого часу.

Розглянемо форми імпульсів, які найчастіше зустрічаються в електроніці рис.4.2.

У різних галузях техніки використовуються імпульси різної форми. У генераторах розгортки - це імпульси пилкоподібної форми, в тактових генераторах обчислювальних пристроїв – це імпульси

прямокутної форми. Створюються імпульси напруги спеціальними генераторами – мультівібраторами, блокінг-генераторами, тригерами.

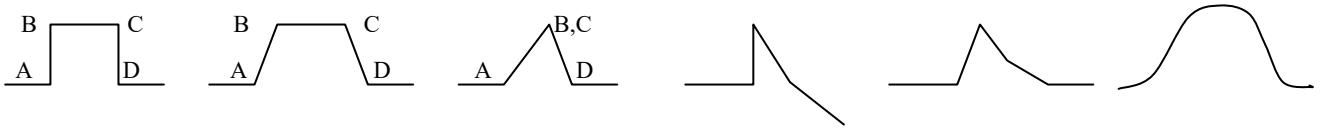


Рис. 4.2. Форми імпульсних сигналів: а - прямокутні; б - трапецієподібні; в - трикутні; г - гостроконечні; д - пилкоподібні; е - експоненційні; АВ - фронт (передній фронт); ВС - вершина; CD - зріз (задній фронт); AD - основа.

Відеоімпульс – це стрибкоподібне відхилення постійного струму (напруги від початкового рівня (найчастіше нульового) протягом короткого інтервалу часу. Цей інтервал часу називається тривалістю імпульсу. Час від початку одного імпульсу до початку іншого імпульсу називається періодом повторення (слідування) імпульсів.

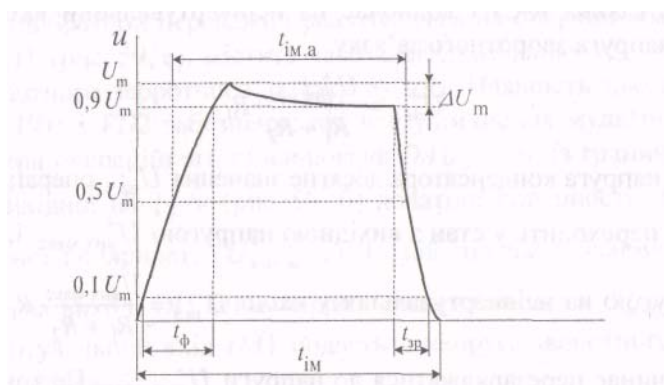


Рис. 4.3. Форма реального прямокутного імпульсу

Максимальне відхилення напруги від початкового значення називають амплітудою імпульсу.

На рис.4.3 зображено форму реального прямокутного імпульсу. Його основні параметри: амплітуда U_m ; тривалість імпульсу $t_{ім}$; тривалість фронту імпульсу $t_{ф}$; тривалість зрізу імпульсу $t_{зр}$. Під тривалістю імпульсу переважно розуміють інтервал часу між моментами виникнення та зникнення імпульсу. Іноді тривалість імпульсу визначають за тривалістю основи імпульсу на рівні $0,16 U_m$ або $0,5 U_m$. Тривалість імпульсу на рівні $0,5 U_m$ називають активною $t_{іма}$. Фронтом імпульсу є

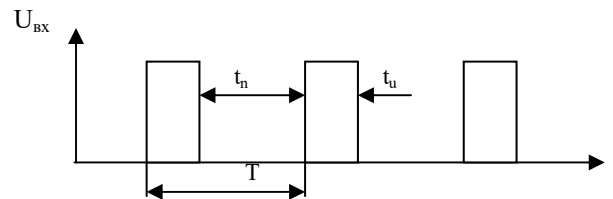
його бічна сторона, і він може бути переднім або заднім (зріз імпульсу).

Практично, для аналізу електронних схем імпульси вважають прямокутними. Переважно імпульси є періодичними з періодом T (рис. 4.4), якому відповідає частота повторюваності $f = 1/T$. Важливою величиною є шпаруватість ("скважність") імпульсів — $Q = T/t_i$, яка вказує на тривалість імпульсу в межах періоду.

Коефіцієнт заповнення визначається за формулою $K_3 = t_u/T = 1/Q$.

Середнє значення напруги за період T визначається за формулою $U_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^{t_u} U(t) dt$.

Рис. 4.4. Імпульси прямокутної форми: t_n - тривалість паузи; t_u – тривалість імпульсу; T - період.



4.1.2. Ключі як генератори імпульсів

Імпульсну електричну або електронну ланку називають нелінійною, якщо хоча б один з її складових елементів має нелінійну вольт-амперну характеристику. Елементи з такою характеристикою часто використовуються в електроніці і мають здатність працювати у ключовому режимі. У статичному режимі ключова схема перебуває у стані "ввімкнено" (ключ замкнутий, відкритий) або у стані "вимкнено" (ключ роз'єднаний, закритий). Перемикання схеми з одного стану в інший здійснюється під дією керувальних сигналів імпульсного виду або рівнів напруги.

Релаксаційними генераторами називаються електронні пристрої, які перетворюють за допомогою електронних ключів постійний струм джерела електричної енергії в електричні імпульси, тривалість і форма яких буде визначатися процесами релаксації, наприклад зарядом або розрядом конденсаторів в колах зворотнього зв'язку.

Сформувати імпульс напруги (струму) можна за допомогою електромеханічного ключа (рис.4.5).

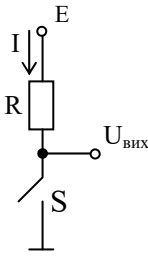


Рис.4.5. Електромеханічний ключ

$$U_{\text{вих}} = E - I \cdot R.$$

Якщо ключ S розімкнений, то $I = 0$ і $U_{\text{вих}} = E$, а якщо ключ замкнений, то $I \cdot R \approx E$ і $U_{\text{вих}} \approx 0$.

У ролі ключа використовуються напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори. Транзистор в режимі ключа ми розглядали в п. 2.3.6.

Закриття і відкриття такого електронного ключа створює перепади напруги (позитивний, при зміні $U_{\text{вих}}$ від 0 до E і негативний, при зміні $U_{\text{вих}}$ від E до 0).

Ці перепади і створюють імпульс напруги.

Розглянемо еквівалентну схему електронного ключа (рис.4.6,а).

У ролі електронного ключа К зазвичай використовуються активні елементи - напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори. Якість роботи ключа визначають наступними основними параметрами: опором розімкненого ключа r_p , опором замкненого ключа r_z , ємністю ключа C. Чим менше значення r_z , C і більше r_p , ти кращі властивості ключа. Ємність ключа C збільшує час перемикання ключа і, отже, впливає на форму вихідного імпульсу $U_{\text{вих}}$ (рис.4.1.6, б).

При розімкненому ключі ємність заряджена до свого максимального значення $U_C = U_{\text{max}} = E$. Якщо ключ замкнути, ємність починає розряджатися по експоненціальному закону з постійною часу $\tau_z = C \cdot r_z$. з такою ж постійною часу по мірі зменшення потенціалу на обкладинках конденсатора збільшується струм через R_H і одночасно збільшується вихідна напруга $U_{\text{вих}}$.

При розмиканні ключа К ємність починає знову заряджатися по експоненціальному закону $U_C = E e^{-t/(R_H \cdot C)}$ з постійною часу $\tau_p = R_H \cdot C$. З такою ж постійною часу спадає вихідна напруга.

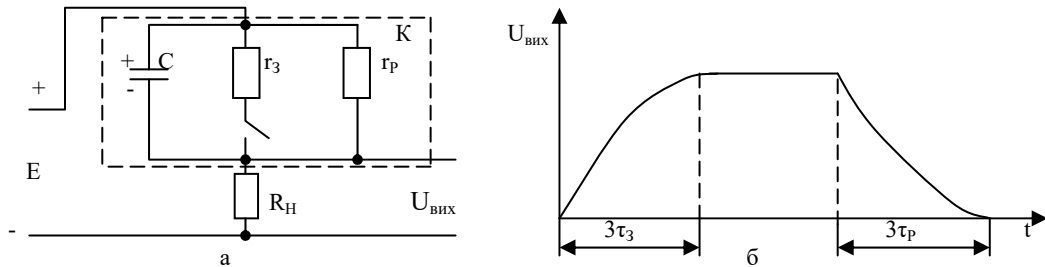


Рис. 4.6. Еквівалентна схема електронного ключа (а) і вплив ємності на форму імпульсу електричного сигналу (б)

Діодні ключі. На рис. 4.7. представлена схема найпростішого послідовного діодного ключа з нульовим рівнем ввімкнення і його передаточна характеристика.

Замкненому положенню ключа відповідає наявність на вході сигналу позитивної полярності. Якщо на вході сигнал від'ємної полярності, то ключ розімкнений.

Якщо відкласти значення напруг $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{вих}}$ в однакових масштабах, то перехідна характеристика буде складати з віссю абсцис кут $\alpha < 45^\circ$.

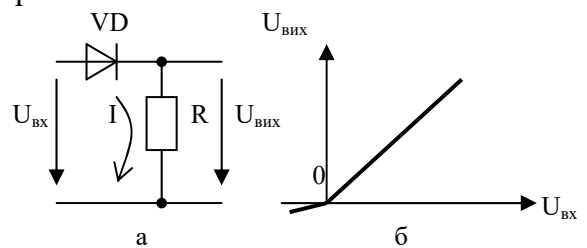


Рис 4.7. Схема найпростішого послідовного діодного ключа з нульовим рівнем ввімкнення (а) і його передаточна характеристика (б)

Це означає, що вихідна напруга буде завжди менша за вхідну, так як частина її спадає на прямому опорі діоду. Передаточна характеристика в додатному напрямку осей координат починається з нуля, тому діодні ключі з такою передаточною характеристикою називають ключами з нульовим рівнем спрацювання.

4.1.3. Мультивібратори

Мультивібратори відносяться до генераторів імпульсних сигналів.

Для імпульсних генераторів характерна наявність зовнішнього або внутрішнього додатного зворотного зв'язку.

Імпульсні генератори поділяються на генератори прямокутних, трапецієподібних, трикутних, пилкоподібних та інших форм імпульсів. Працюють генератори в трьох основних режимах: автоколивному, чекаючому і в режимі синхронізації.

Автоколивні генератори імпульсів після самозбудження генерують послідовність імпульсів, параметри яких (амплітуда, частота повторення, тривалість імпульсів і їх шпаруватість) визначаються тільки параметрами елементів схеми генератора.

Чекаючі генератори генерують імпульси, період повторення яких визначається періодом повторення запускарних імпульсів, а параметри кожного імпульсу (амплітуда, тривалість, форма) визначаються параметрами схеми генератора.

У режимі синхронізації генератор виробляє імпульси, частота яких дорівнює або кратна частоті синхронізуючого сигналу, і такі генератори використовуються як подільники.

Мультивібратор – це електронний пристрій, який складається із двох транзисторних ключів, охоплених додатним зворотним зв'язком. І який перетворює постійний струм джерела живлення в імпульс струму. Форма імпульсу наближена до прямокутної, а тривалість імпульсу визначається процесом релаксації RC-ланцюга. За способом збудження мультивібратори можуть бути із самозбудженням і з зовнішнім збудженням (одно вібратори або чекаючі мультивібратори).

Слово мультивібратор пішло від латинського слова multum – багато і vibrare – коливатися.

Симетричний мультивібратор із самозбудженням. На рис.4.8,а наведена схема мультивібратора, що працює із самозбудженням, а на рис.4.8,б дані його потенціальні діаграми.

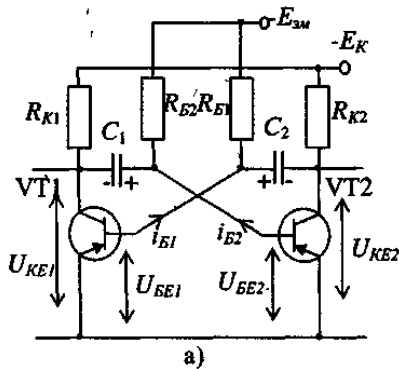
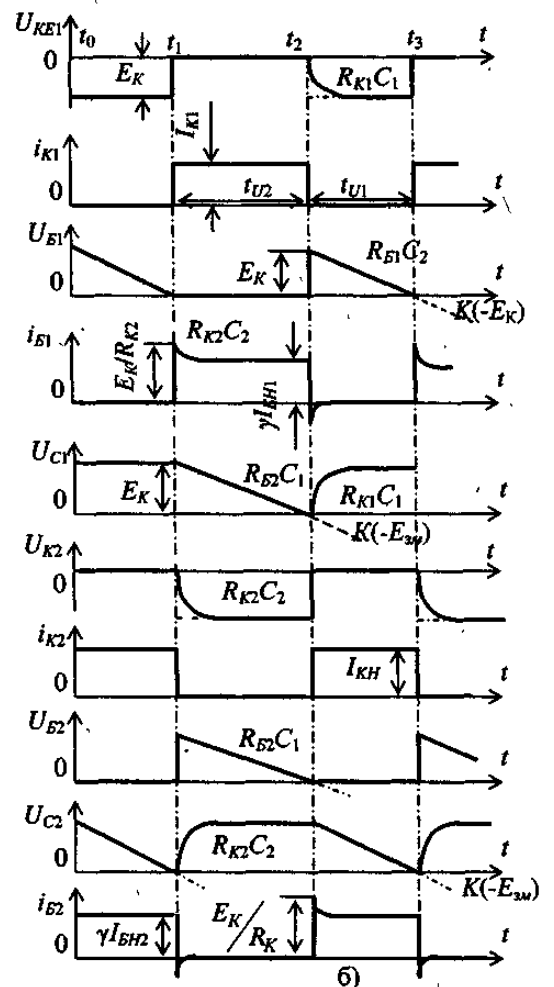


Рис. 4.8. Мультивібратори: а - з колекторно-базовими ємнісними зв'язками; б - часові діаграми роботи



Вона складається з двох підсилювачів-інверторів на транзисторах VT1 і VT2, з'єднаних між собою колекторно-базовими додатними зворотними зв'язками через конденсатори C1 і C2. Часозадавальними елементами служать RC-ланки. Робота мультивібратора протягом одного періоду показана часовими діаграмами на рис. 4.8,б. Для спрощення аналізу на цих діаграмах струми I_T не враховані, спад напруги на відкритому транзисторі при перемиканні схеми вважається малим порівняно з перехідними процесами у часозадавальних колах.

До моменту t_1 транзистор VT1 закритий і його колекторна напруга практично дорівнює $-E_K$, колекторний струм рівний нулю (тобто $i_{K1}=I_{K0}$, а $U_{K1} = -E_K + I_{K0} \cdot R_{K1}$). Транзистор VT2 відкритий і стягнутий у точку, колекторний струм рівний $i_{K2}=I_{KH2}$, колекторна напруга $U_{K2} \approx 0$

Відкритий стан VT2 забезпечується струмом бази $i_{B2}=\gamma \cdot I_{BH2}$, що проходить від джерела E_{3M} через опір R_{B2} . Запертий стан VT1 забезпечується додатною напругою конденсатора C2, що під'єднаний через відкритий транзистор VT2 до емітерного переходу транзистора VT1, тобто $U_{B1} = U_{C2}$.

Конденсатор C1 заряджається через емітерний перехід відкритого транзистора VT2 і резистор R_{K1} до напруги, близької до E_K . Такий стан називають квазістійким, оскільки напруга на конденсаторі не залишається постійною. Конденсатор C2 перезаряджається від напруги $-E_{3M}$ у момент часу t_1 , коли $U_{B1} = U_{C2} \approx 0$, транзистор VT1 почне відкриватись, його колекторна напруга зменшиться, колекторний струм зросте.

Для повністю симетричного мультивібратора, у якому $R_{B1} = R_{B2} = R$, $C_1 = C_2 = C$, період повторення імпульсів буде дорівнювати:

$$T = 2 \cdot t_U = 1,4 \cdot R_B \cdot C_B \quad (4.1)$$

Недоліком такого мультивібратора є «завал» фронтів імпульсів колекторної напруги.

У схемах цифрової схемотехніки для синхронізації блоків керування та інших несилкових елементів електроніки проектують мультивібратори на логічних елементах.

Чекаючий мультивібратор (одновібратори).

Одновібратори – це генератори прямокутних імпульсів, які працюють в очікувальному режимі. Такий режим характеризується стійким і квазістійким станами рівноваги. Перехід із стійкого до квазістійкого стану здійснюється за наявності зовнішнього імпульсу, який називають запускарним. Формується прямокутний імпульс заданої тривалості, що визначається часом дії запускарного імпульсу.

Роботу мультивібратора в чекаю чому режимі можна отримати із схеми рис.4.9, а, для цього на одну із баз транзисторів, наприклад на базу транзистора VT1, через обмежувальний резистор R2 потрібно подати запираючу напругу E_B . транзистор VT1 буде закритий, а транзистор VT2 відкритий. Відкритий стан транзистора VT2 буде підтримуватися позитивним потенціалом правої пластини конденсатора C1, значення якого близьке потенціалу «землі», так як транзистор VT2 знаходиться в насиченні. Такий стан може продовжуватися скільки завгодно довго. З приходом пускарного сигналу U_3 від'ємної полярності на базу транзистора VT2 останній закривається, а транзистор VT1 відкривається позитивним потенціалом, який знімається з колектора VT2 і поступає на базу транзистора VT1 через конденсатор C1. такий стан називається квазістійким, тобто нетривалим, і визначається часом перезарядки конденсатора C1 через R1 і відкритий транзистор VT1. коло C1 R1 називається часозадаючим, так як визначає тривалість

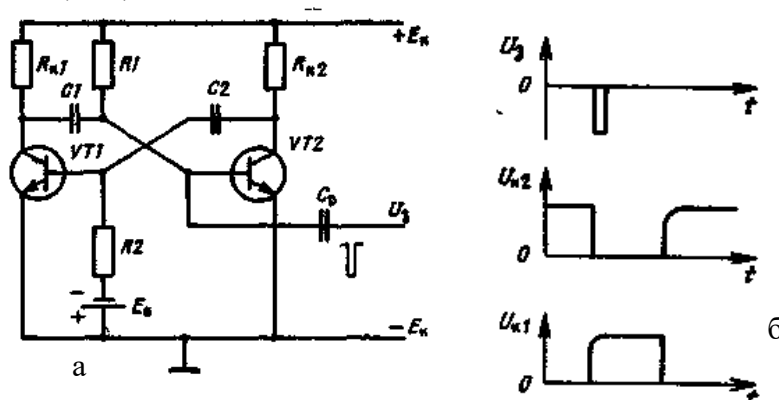


Рис. 4.9. Схема (а) і потенціальні діаграми (б) чекаю чого мультивібратора

імпульсу $t_i \approx 0,7 \cdot R_1 \cdot C_1$ зміною параметрів часозадаючого ланцюга (ємності і опору) можна регулювати тривалість імпульсу чекаю чого мультівібратора.

Із рис. 4.9, б видно, що фронти імпульсів на колекторі створюються не одразу, а через певний час

$$t_{\phi} \approx (3 - 5) R_{K1} C_1 \quad (4.2)$$

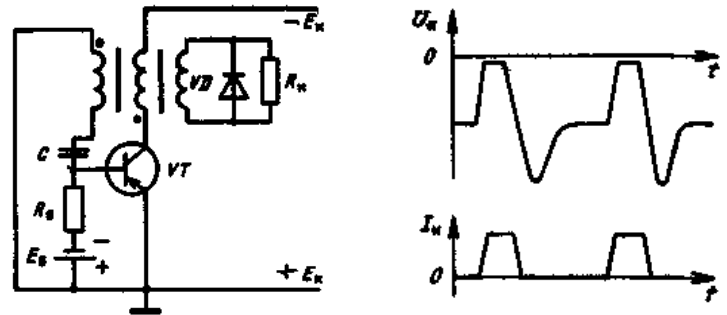
Черговий пусковий імпульс може поступати на базу транзистора VT2 через час $t = t_i + t_{\phi}$.

4.1.4. Блокінг-генератор

Блокінг-генератор – це електронний пристрій, який складається із транзисторного ключа з трансформатором в колі зворотного зв'язку і служить для отримання імпульсів високої сквапності ($Q > 10$); застосовується в пристроях імпульсної техніки.

В блокінг-генераторі струм транзисторного ключа протікає лише протягом невеликої частини коливань, що дозволяє отримувати потужні імпульси при малій середній потужності. До числа інших переваг блокінг-генератора відносяться робочі імпульси різної полярності і амплітуди, висока надійність, обумовлена малою кількістю деталей і елементів. Основним конструктивно-технологічним недоліком блокінг-генератора є наявність імпульсного трансформатора, що не піддається мікромініатюризації.

На рис. 4.10. а приведена схема блокінг-генератора, який працює в автоколивальному режимі. Розглянемо принцип дії схеми, починаючи з моменту, коли конденсатор С зарядився до свого максимального значення U_m , яке закриває транзистор. Через опір резистора R_B проходить перезарядка конденсатора С. Швидкість



перезарядки відносно тривалості робочого імпульсу мала і визначається

Рис. 4.10. Схема (а) і потенціальні діаграми (б) блокінг-генератора

постійною часу $R_B C$. при досягненні на ємності потенціалу, що дорівнює $+E_B$, на базі буде нульовий потенціал відносно емітера. Час перезарядки є паузою між робочими імпульсами. Як тільки напруга на базі стане дорівнювати нулю, через транзистор потече малий струм. Збільшення колекторного струму викликає появу ЕРС самоіндукції в колекторній обмотці. Зростає магнітний потік і осерді, і в базовій обмотці з'являється ЕРС взаємоіндукції. Полярність ЕРС в базовій обмотці така, що до бази транзистора прикладається «мінус», а до емітера «плюс». Розвивається лавинний процес. В ході цього процесу формується фронт робочого імпульсу. Цей процес називається прямим блокінг-процесом. Звідси і пішла назва генератора. Закінчується лавинний процес повним відкриттям транзистора і переходом його в насичений стан, який характеризується зупинкою зростання струму колектора. Зупинка зростання струму колектора обумовлює закінчення лавинного процесу. Іде формування вершини плоскої частини робочого імпульсу (рис. 4.10, б). На цьому етапі відбувається розсовування неосновних носіїв, накопичених на базі. Час розсовування неосновних носіїв визначає тривалість плоскої частини робочого імпульсу. Неосновних носії мірі розсовування в базі стає менше, і транзистор виходить із насичення, отримуючи підсилюючі властивості. Зменшення струму колектора викликає появу на базі транзистора ЕРС позитивної полярності, що призводить до ще більшого зниження струму бази і струму колектора. Знову розвивається лавинний процес, який називається зворотним блокінг-процесом. За цей час напруга на конденсаторі С і магнітна енергія осердя не встигають змінитися. Після закривання транзистора від'ємна напруга продовжує зростати. Отримується характерний для блокінг-генератора викид напруги, який пояснюється розсіюванням енергії, накопиченої в осерді трансформатора за час формування вершини робочого імпульсу. Цей викид, додаючись до напруги на колекторі, може досягнути значення напруги $U_K \leq 2E_K$, більшої максимально допустимої для даного транзистора. Після викиду можуть настати затухаючі коливання, які своїми тривалими півперіодами можуть виробляти неправдиві спрацювання

блокінг-генератора, перетворюючи його в звичайний LC-генератор. Для виключення неправдивих спрацювань в навантажувальну обмотку ставлять діод, який зрізає від'ємний півперіод.

Блокінг-генератор, як і мультивібратор, може працювати в режимі зовнішнього збудження. Для цього необхідно змінити полярність напруги на базі від джерела E_B , а пускові відпираючі імпульси подавати через розділяючий конденсатор на базу. Блокінг-генератор, який працює із самозбудженням, має нестабільність частоти такого ж порядку, що і мультивібратор ($\pm 10\%$). Для підвищення стабільності частоти блокінг-сигнал синхронізації від більш стабільного джерела.

4.1.5. Тригер на дискретних елементах

Тригер – перемикаючий пристрій, який як завгодно довго зберігає один із двох станів стійкої рівноваги і стрибкоподібно перемикається за сигналом ззовні із одного стану в інший.

За ознакою подачі зміщуючої напруги всі схеми тригерів можна розділити на два класи: тригери з незалежним і залежним автоматичним зміщенням. На рис. 4.11, а наведена найпростіша схема тригера з незалежним зміщенням.

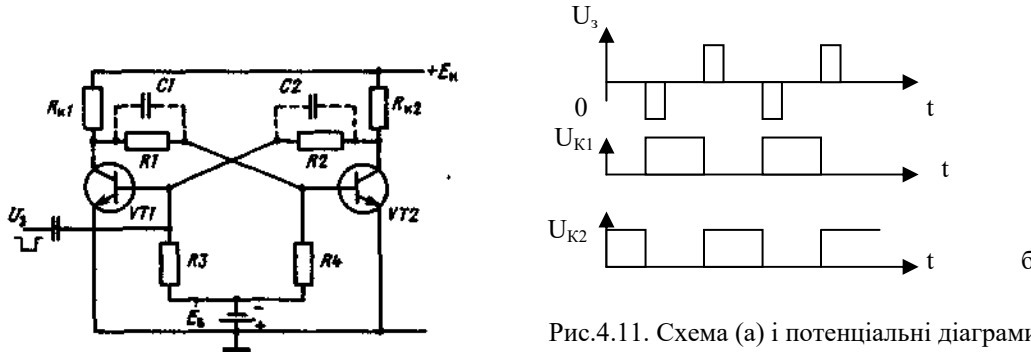


Рис.4.11. Схема (а) і потенціальні діаграми (б) тригера з незалежним зміщенням

Як видно із схеми, тригер є двокаскадним підсилювачем, кожен каскад якого працює в режимі транзисторного ключа. Якщо обидва каскади зібрані на елементах з однаковими параметрами ($R_{K1} = R_{K2}$; $R_1 = R_2$; $R_3 = R_4$), то такий тригер називається симетричним. Якщо каскади відрізняються параметром хоча б одного елемента або зібрані на різномісних транзисторах, то такий тригер називається несиметричним. Обидва каскади в тригері охоплені позитивним зворотним зв'язком. Вихід першого каскаду через резистор R_1 з'єднаний із входом другого, а вихід другого – через резистор R_2 з'єднаний із входом першого. Кожен каскад працює за схемою із спільним емітером. Резистори R_3 і R_4 служать для обмеження струму бази джерела E_B .

Із ввімкненням напруг E_K і E_B струм проводить лише один із транзисторів, інший буде закритий по базі працюючим транзистором, з колектора якого знімається потенціал насиченого транзистора U_{Kn} , наближений до нуля. Оскільки схема симетрична, то знаходиться в стані «відкрито» (насичення) може будь-який із транзисторів з рівною вірогідністю. Для визначеності допустимо, що транзистор VT_1 відкритий, а VT_2 закритий. Потенціали відносно «землі» на колекторі, базі і емітері приблизно однакові і дорівнюють нулю: $U_K = U_{B1} = U_{E1} = 0$. транзистор VT_2 закритий від'ємним потенціалом U_{B2} . через коло база-емітер транзистора VT_2 під дією замиряючої напруги E_B проходить струм $I_{B2} = -I_{K0}$, де I_{K0} – зворотний струм колекторного переходу. Відкритий стан транзистора VT_2 підтримується струмом $I_{B1} = E_K/R_2$. такий стан може бути як завгодно довго. Із поступанням на базу транзистора VT_1 запираючого імпульсу від'ємної полярності і амплітудою, яка наближено дорівнює або більшою $+E_K$, транзистор VT_1 починає закриватися, при цьому запираючий потенціал на базі транзистора VT_2 зменшується із-за появи позитивного потенціалу на колекторі транзистора VT_1 . транзистор VT_2 починає відкриватися, і на його колекторі потенціал понижується. Це пониження передається через коло зворотного зв'язку R_2 на базу транзистора VT_1 , який ще більше починає закриватися і т. д. Розвивається лавинний процес. В результаті транзистор VT_1 повністю закривається, а транзистор VT_2 відкривається. Встановлюється новий стійкий стан. Вихідний стан тригера настане з приходом

відкриваючого (позитивного) імпульсу на базу транзистора VT1. Переведення тригера із одного стану в інший (запуск тригера) різнополярними імпульсами запуску U_3 можна здійснювати по одній із баз або по одному із колекторів. Такий запуск називається роздільним. Існує також лічильний запуск – це коли одно поляні імпульси подаються одразу на два електроди: на два колектори або дві бази. Лічильний запуск застосовується в тригерних лічильниках імпульсів.

Контрольні питання і вправи

1. Різниця між аналоговими і дискретними сигналами?
2. Що таке кодування?
3. Яких форм бувають імпульси?
4. Параметри імпульсів?
5. Дайте характеристику роботі електронного ключа.
6. Що таке мультівібратор?
7. Яка різниця між мультівібратором із самозбудженням та із зовнішнім збудженням?
8. Що таке блокування-генератор?
9. Що таке тригер?

4.2. ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

4.2.1. Основні логічні операції (функції)

У звичайній математиці використовують функції одного або декількох аргументів, де і аргументи і функція приймають будь-які значення.

В цифровій техніці кожний аргумент або функція приймають лише два значення: 0 і 1 – *перемикаючі функції*.

Перемикаючі функції вивчаються в алгебрі логіки (Булевій алгебрі).

Алгебру логіки іноді не зовсім правильно вважають алгеброю двох цифр — 1 і 0. Оскільки цифри 1 і 0 тут не відбивають кількісних співвідношень. Вони є не числами, а символами стану: наприклад, контакти замкнені—розімкнені, сигнал «є»— «немає», коло замкнене—розімкнене, транзистор відкритий — закритий тощо. Отже, алгебру логічних пристроїв правильніше буде вважати алгеброю стану, а не алгеброю чисел.

Користуючись алгеброю логіки, можна записати математично будь-яку складну схему електроніки, не зображуючи її графічно. Такий аналітичний запис дає можливість проаналізувати роботу схеми, спростити її без порушення роботоздатності, зменшити кількість елементів схеми до можливого мінімуму. Ці операції звичайно відносять до аналізу схем електронних систем.

Поряд з цим є операції синтезу, за допомогою яких можна скласти схему електронної автоматичної системи, яка замість людини виконувала б усі потрібні дії, спрямовані на керування процесом або установкою

Як і в звичайній математиці, в алгебрі логіки існують свої закони та їх наслідки, де $a, b, c \dots$ - прямі змінні, а $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c} \dots$ - інверсні змінні; знак « $\bar{}$ » над змінною називається знаком інверсії).

Закони алгебри логіки.

Переставний

$$a + b = b + a$$

$$a \cdot b = b \cdot a$$

Сполучний

$$(a + b) + c = a + (b + c)$$

$$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

Розподільний

$$(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$$

$$a + bc = (a + b) \cdot (a + c)$$

Де Моргана

$$\overline{a + b} = \bar{a} \cdot \bar{b}$$

$$\overline{a \cdot b} = \bar{a} + \bar{b}$$

Наслідки до законів.

Доповнення

$$a + \bar{a} = 1$$

$$a \cdot \bar{a} = 0$$

Повторення змінної

$$a + 0 = a$$

$$a \cdot 1 = a$$

Повторення константи	$a + 1 = 1$	$a \cdot 0 = 0$
Ідемподентність	$a + a = a$	$a \cdot a = a$
Склеювання	$ab + a\bar{b} = a$	$(a + b)(a + \bar{b}) = a$
Поглинання	$a + ab = a$	$a(a + b) = a$
Заміщення	$a + \bar{a}b = a + b$	$\bar{a} + a\bar{b} = \bar{a} + \bar{b}$

Два способи представлення логічної функції – за допомогою логічної формули і таблиці істинності – взаємопов’язані між собою, тобто є можливість переходити від одного способу до іншого.

4.2.2. Найпростіші логічні схеми

Елементною базою цифрової техніки є **логічні елементи**, які компонуються разом із запам’ятовувальними пристроями.

Логічні елементи — це електронні схеми, що відтворюють логічні функції й оперують логічними величинами, які приймають тільки два значення: **логічну одиницю та логічний нуль**.

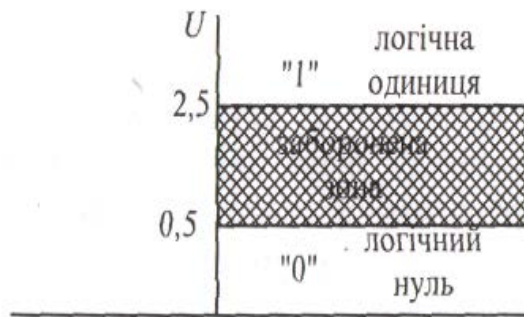


Рис. 4.12. Рівні напруг, що відповідають логічним величинам

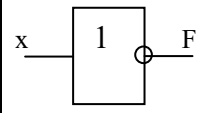
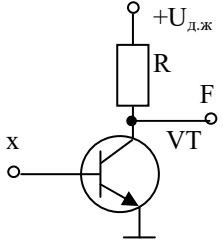
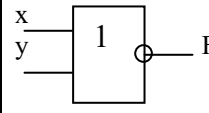
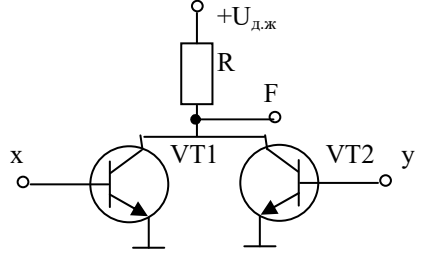
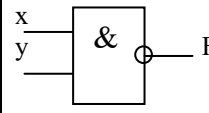
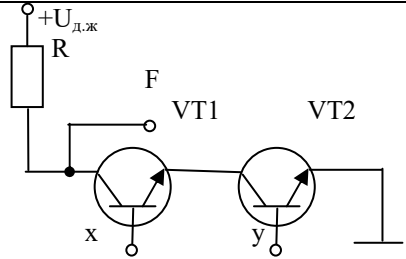
Найпоширенішими є елементи потенційного типу, в яких логічній одиниці відповідає рівень високого потенціалу (додатного чи від’ємного) або напруги, а логічному нулю — низький рівень (рис.4.12).

Логічні елементи виконують **логічні операції**, внаслідок чого вхідна інформація перетворюється за відповідними логічними правилами у вихідну. Ці правила описуються таблицями істинності для кожної логічної операції, які формуються на основі алгебри логіки.

В алгебрі логіки змінні і їх функції можуть приймати лише два значення: 0 і 1. Із змінними можуть бути проведені три основні дії: логічне додавання, логічне множення і логічне заперечення, що відповідає логічним функціям АБО, І, НЕ.

Таблиця 4.1. Структурні моделі простих логічних елементів

Назва	Умове графічне зображення	Табличка істинності	Схемне виконання															
АБО		<table border="1"> <tr><td>x</td><td>y</td><td>F</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	x	y	F	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	
x	y	F																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
І		<table border="1"> <tr><td>x</td><td>y</td><td>F</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	x	y	F	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	
x	y	F																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

НЕ		<table border="1" data-bbox="774 112 917 257"> <thead> <tr> <th>x</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	x	F	0	1	1	0										
x	F																	
0	1																	
1	0																	
АБО-НЕ		<table border="1" data-bbox="750 347 941 571"> <thead> <tr> <th>x</th> <th>y</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	x	y	F	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	
x	y	F																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
I-НЕ		<table border="1" data-bbox="750 627 941 862"> <thead> <tr> <th>x</th> <th>y</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	x	y	F	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	
x	y	F																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																

Наведемо умовні позначення входів цифрових логічних схем, які найчастіше зустрічаються:

- | - статичний вхід, неінвертуючий вхідне значення потенціалу вхідного сигналу;
- ⊖ - статичний вхід, інвертуючий вхідне значення потенціалу вхідного сигналу;
- / (—⊖) – динамічний вхід (зміна рівнів за наростанням, переднім (заднім) фронтом вхідного сигналу);
- \ (—⊖) – динамічний вхід (зміна рівнів за спадом, переднім (заднім) фронтом вхідного сигналу).

Логічна функція АБО – логічне додавання (диз'юнкція) позначається $F = x + y^1$ і читається так: логічна функція F приймає значення логічної одиниці ($F = 1$), якщо логічна змінна x або логічна змінна y дорівнюють 1.

Логічна функція I – логічне множення (кон'юнкція) позначається $F = x \cdot y$ і читається так: логічна функція F приймає значення логічної одиниці ($F = 1$) тоді і лише тоді, коли логічна змінна x і логічна змінна y дорівнюють 1.

Логічна функція НЕ – логічне заперечення (інверсія) позначається $F = \bar{x}$ і читається так: F дорівнює не x.

Окрім найпростіших логічних операцій, можуть використовуватись і більш складні. Найважливіші з них:

Логічна функція АБО-НЕ – заперечення диз'юнкції (стрілка Пірса). Позначається $F = \overline{x + y}$.

Логічна функція I-НЕ – заперечення кон'юнкції (операція Шиффера). Позначається $F = \overline{x \cdot y}$.

В таблиці 4.1 представлено умовні графічні зображення, таблички істинності та схемне виконання простих логічних елементів.

¹ В алгебрі логіки логічне додавання позначається знаком \vee , а логічне множення - \wedge , інверсія – знаком інверсії над змінною (наприклад \bar{a})

Логічний елемент позначається прямокутником, всередині якого вказується символ, який визначає функцію, що виконується. Символ «1» визначає функцію АБО; символ & - функцію І; інверсія, яка здійснюється логічним елементом, позначається кружечком на виході прямокутника.

Як видно з таблиці, в склад логічних схем входять елементи, які мають два стійких стани, один з яких відповідає одиниці, а інший – нулю. Це такі елементи, як діоди і транзистори (в дискретному і інтегральному виконанні).

Схема, що реалізує логічну функцію АБО, може мати декілька входів і один вихід. Для роботи схеми необхідно, щоб опір резистора R був значно більшим прямого опору діоду і внутрішнього опору джерела вхідних сигналів. В вихідному стані діоди закриті. Якщо хоча б на один вхід подана позитивна напруга, яка відповідає логічній одиниці, то і на виході з'явиться сигнал логічної одиниці, який дорівнює падінню напруги на резисторі. Очевидно, що для реалізації операції АБО необхідно виконання умови $U_{вх} > U_{д.ж}$.

Якщо на входи схеми, що реалізує логічну функцію «І», одночасно подані високі напруги у вигляді імпульсів або позитивних перепадів напруг, то діоди запираються і на виході схеми встановлюється високий потенціал, який відповідає логічній одиниці ($U_{вих} = U_{д.ж}$).

Логічна функція НІ реалізується за допомогою схеми інвертора. В ній транзистор працює в ключовому режимі. У вихідному стані він закритий, так як потенціал бази практично дорівнює нулю. Напруга на виході у такому випадку відповідає логічній одиниці ($U_{вих} \approx U_{д.ж}$). При подачі на базу транзистора високого позитивного потенціалу транзистор відкривається і на виході схеми встановлюється низька напруга, що відповідає логічному нулю. Транзистор при цьому знаходиться в режимі насичення.

Логічна функція І-НЕ реалізується послідовним ввімкненням двох транзисторів. При одночасній подачі на бази двох транзисторів позитивних сигналів транзистори відкриваються, на колекторному резисторі створюється падіння напруги, а на виході схеми напруга зменшується до рівня логічного нуля.

Електрична схема, що виконує функцію АБО-НЕ, складається із двох транзисторів із зв'язаними колекторами і спільного колекторного резистора. При відсутності сигналів на входах схеми транзистори закриті і на виході є сигнал логічної одиниці. Якщо хоча б на один вхід подати позитивний сигнал, то відповідний транзистор відкривається, і на виході схеми потенціал знизиться.

На даний час в схемах логічних елементів широко використовуються польові транзистори типу МДН або МОН.

Порядок складання схем на основі простих логічних елементів.

1. Від замовника отримується перелік функцій, які повинна виконувати схема.
2. За функціями складається таблиця істинності.
3. За таблицею істинності складається логічне рівняння.
4. Проводиться мінімізація (спрощення) логічного рівняння за законами та наслідками алгебри логіки.
5. Креслиться схема.
- 6.

Приклад. В корівнику є три горизонтальні та один похилий (для вивезення гною у гноєсховище) гноєтранспортери. Скласти автоматичну схему керування роботою похилого гноєтранспортера в корівнику, який повинен вмикатись за таких умов:

- коли працює хоча б один із горизонтальних транспортерів;
- коли ввімкнені будь-які два горизонтальні транспортери;
- якщо одночасно ввімкнені всі три горизонтальні транспортери.

Розв'язок. 1. Проаналізувавши задані функції, складаємо таблицю істинності. Для цього позначимо сигнали від горизонтальних транспортерів змінними a , b , c , а сигнал, що поступає від схеми керування на похилий транспортер – F . В таблиці істинності сигнал ввімкнення – логічна 1, а вимкнення – логічний нуль.

a	b	c	F
0	0	0	0
1	0	0	1
0	1	0	1
0	0	1	1
1	1	0	1
1	0	1	1
0	1	1	1
1	1	1	1

2. За табличкою істинності складаємо логічне рівняння. Для цього записуємо добуток змінних a, b, c стільки раз, скільки раз у таблиці істинності F=1; між ними ставимо знак «+». Над тими змінними, яким відповідає рівень логічного нуля, ставимо знак інверсії.

$$F = \overline{a}bc + a\overline{b}c + \overline{a}b\overline{c} + a\overline{b}\overline{c} + \overline{a}bc + \overline{a}bc + \overline{a}bc$$

3. Проводимо мінімізацію логічного рівняння за законами та наслідками алгебри логіки.

$$\begin{aligned} F &= \overline{a}bc + a\overline{b}c + \overline{a}b\overline{c} + a\overline{b}\overline{c} + \overline{a}bc + \overline{a}bc + \overline{a}bc = \\ &= \overline{a}c(\overline{b} + b) + \overline{b}c(\overline{a} + a) + bc(\overline{a} + a) + \overline{a}bc = \\ &= \overline{a}c \cdot 1 + \overline{b}c \cdot 1 + bc \cdot 1 + \overline{a}bc = \overline{a}c + \overline{b}c + bc + \overline{a}bc = \\ &= \overline{c}(a + \overline{a}b) + c(\overline{b} + b) = \overline{c}(a + b) + c \cdot 1 = \\ &= \overline{c}a + \overline{c}b + c = (c + \overline{c}a) + \overline{c}b = c + a + \overline{c}b = \\ &(c + \overline{c}b) + a = c + b + a \end{aligned}$$

4. Креслимо схему (рис.4.14), (для порівняння на рис. 4.13 представлена схема за повним логічним рівнянням).

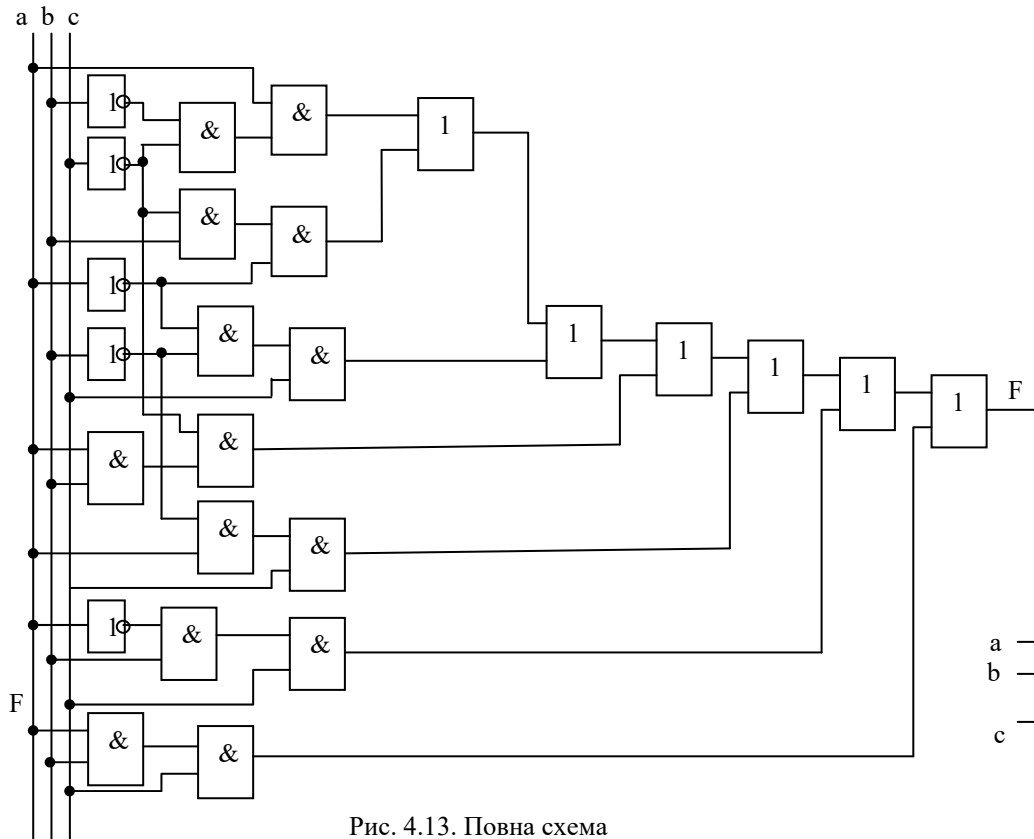


Рис. 4.13. Повна схема

Рис. 4.14. Кінцева схема

4.2.3. Логічні інтегральні мікросхеми (класифікація)

Логічні інтегральні елементи призначені для реалізації логічних функцій і належать до найпоширеніших цифрових пристроїв, що мають як самостійне використання так і входять у склад більш складних цифрових пристроїв. Логічні інтегральні елементи поділяються на потенціальні, імпульсні й імпульсно-потенціальні.

Інтегральні схеми потенціального типу є найрозповсюдженішими, сигнали на їх входах і виходах представляють собою високий або низький рівні напруги, які відповідно означають "логічну 1" і "логічний 0". Залежно від кодування сигналів розрізняють додатну і від'ємну логіку.

Мікросхеми, які випускаються електронною промисловістю, відносяться до тієї чи іншої серії, під якою розуміють сукупність мікросхем, які виконують різні функції, але мають єдину конструктивно-технологічну основу і призначені для спільного застосування в апаратурі. Кількість серій логічних ІМС, які застосовуються на даний час, досить велика і безперервно доповнюється новими розробками.

Система позначень інтегральних мікросхем, яка використовується в наш час, складається із наступних елементів: перший елемент (Е1) – цифра, яка позначає серію мікросхеми; другий (Е2) – дві букви, які позначають підгрупу і вид мікросхеми за функціональним призначенням; третій (Е3) – цифра, що позначає порядковий номер розробки мікросхеми за технологічною ознакою в даній серії; четвертий (Е4) – буква, яка позначає відмінність за яким-небудь параметром однакових типів мікросхем (наприклад, за величиною напруги живлення).

В позначеннях логічних ІМС після номеру серії ставиться буква «Л»; наступна буква позначення залежить від виду виконуємої логічної операції: схеми І позначаються ЛІ; схеми АБО – ЛЛ; схеми НЕ – ЛН; схеми І-НЕ / АБО-НЕ – ЛЮ; схеми І – АБО – ЛС; схеми І – АБО – НЕ – ЛР, інші – ЛП.

Приклад маркування: 121ЛБ1А – мікросхема 121 серії, логічний елемент І – НЕ/ АБО – НЕ, різновидність А.

За прийнятою раніше системою (минулих років), позначення інтегральних схем складається з чотирьох елементів умовного позначення. Перший елемент (Е1) позначення - цифра умовного позначення, що характеризує конструктивно-технологічне виконання: напівпровідникові (цифри 1, 5, 6 або 7); гібридні (2, 4, 8); інші (плівкові, вакуумні, керамічні тощо позначаються цифрою 3). Цифра 7 присвоюється безкорпусним напівпровідниковим мікросхемам. Другий елемент (Е2) складається з двох-трьох цифр і є порядковим номером серії (від 00 до 999). Елементи Е1 і Е2 у сукупності складають повний номер серії мікросхеми. Третій елемент (Е3) -- дві літери, які означають функціональне призначення мікросхеми. Четвертий елемент (Е4) - порядковий номер розробки даної серії мікросхеми, який може складатись з декількох цифр, тому що може бути кілька мікросхем однакової серії.

У деяких серіях мікросхем у кінці умовного позначення додається літера, що характеризує технологічний розкид її параметрів. Інколи номеру мікросхеми передують літера або літери, наприклад, літера **К** означає, що дана серія мікросхем призначена для широкого використання, літери **КМ** означають, що дана серія виготовляється у керамічному корпусі, літери **ЭК** -- серія експортного варіанта, літери **КБ** - безкорпусний варіант, без літер - серія спеціального призначення.

Приклади маркування: К1ЛБ331, К1ЛР553; К1ЛИ721 і т.д.

Інтегральні елементи цифрової схемотехніки за схемотехнічною реалізацією поділяються на наступні основні види: 1) резистивно-транзисторна логіка (РТЛ); 2) транзисторна з безпосереднім зв'язком між логічними елементами (БЗТЛ); 3) транзисторні з резистивними зв'язками між логічними елементами (ТРЛ); 4) транзисторні з резистивно-ємнісними зв'язками між елементами (РЕТЛ); 5) транзисторні з емітерними зв'язками між елементами (ТЛЕЗ), або емітерно зв'язана логіка (ЕЗЛ); 6) транзисторна логіка на перемикачі струму (ТЛПС); 7) діодно-транзисторні елементи (ДТЛ); 8) транзисторно-транзисторна логіка (ТТЛ); 9) багатоемітерний транзистор (БЕТ); інтегральна інжекційна логіка (І²Л); 10) транзисторно-транзисторна логіка з транзисторами Шоттки (ТТЛШ); 11) транзистор-транзистор-транзисторна логіка (Т-ТТЛ); 12) транзисторна логіка на перемикачах струму (ТЛПС); 13) логічні елементи з використанням польових транзисторів (МДП).

4.2.4. Характеристики і параметри логічних мікросхем

Найважливішими характеристиками логічних мікросхем є вхідні і передаточні. Вхідні характеристики являють собою графічні залежності величини вхідного струму $I_{вх}$ від величини вхідної напруги $U_{вх}$, тобто $I_{вх} = f(U_{вх})$. За видом вхідних характеристик всі логічні схеми можна розділити на дві групи. До першої відносяться схеми, у яких при відсутності вхідних напруг вхідний струм відсутній і з'являється коли рівень вхідної напруги досягне визначеної величини (рис. 4.13,а, крива 1). Для мікросхем другої групи, навпаки, при відсутності вхідного сигналу струм у вихідній вітці має максимальне значення, а при збільшенні вхідної напруги вхідний струм зменшується (рис. 4.15,а, крива 2).

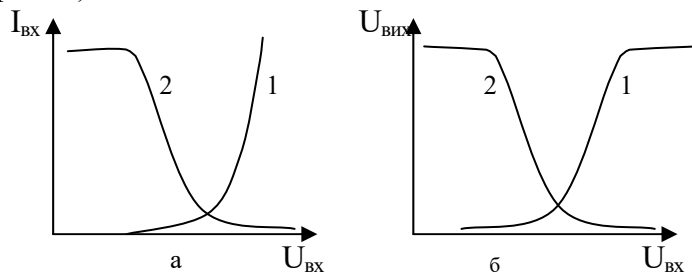


Рис. 4.15. Наближений вигляд вхідних (а) та передаточних (б) характеристик логічних мікросхем

Передаточна характеристика логічної мікросхеми визначає залежність вихідної напруги схеми від напруги на одному із її входів при визначених постійних напругах на інших входах, тобто $U_{вих} = f(U_{вх})$. Наближений вигляд передаточних характеристик логічних мікросхем показаний на рис. 4.13,б.

Крива 1 на рис. 4.15,б показує, що логічна мікросхема працює без інвертування сигналу – при малій вхідній напрузі вихідна напруга наближена до нуля, при зростанні вхідної напруги рівень вихідної напруги також підвищується. Крива 2 на цьому рисунку, навпаки, характеризує роботу логічної мікросхеми з інвертуванням, коли малій вхідній напрузі відповідає максимальна напруга на виході, а при збільшенні напруги $U_{вх}$ вихідна напруга знижується. Чим більш різким є перехід від максимального до мінімального рівня вихідної напруги, тим більш чітко працює схема, тим вища її якість.

Розглянемо основні параметри, що характеризують інтегральні логічні елементи, які складаються з функціональних, вимірювальних і режимних. До функціональних параметрів належать такі, що визначають логічні можливості при їх використанні в апаратурі: реалізована логічна функція; коефіцієнт розгалуження на виході, що визначає максимально допустиме число одиничних навантажень, яке можна одночасно під'єднати до виходу мікросхеми; коефіцієнт об'єднання на вході, що характеризує максимально допустиме число входів, за якими реалізується логічна функція; завадостійкість $U_{пер}$, визначається максимально допустимою напругою статичної перешкоди на вході схеми, при якій ще відбувається зміна рівнів її вихідного потенціалу (завадостійкість характеризується допустимими значеннями для логічних рівнів "1" і "0": $U_{пер}^1, U_{пер}^0$); споживана потужність $P_{спож}$, що характеризує потужність, яка використовується мікросхемою від джерела живлення в заданому режимі (розрізняють потужність $P_{спож}^1$ і $P_{спож}^0$, яку використовує мікросхема при логічному "1" і "0", та середню споживану потужність $P_{спож-ср} = 0,5 \cdot (P_{спож}^1 + P_{спож}^0)$).

Вимірювані параметри поділяються на статичні й динамічні. До статичних параметрів, які вимірюються при логічних станах "1" і "0", належать: вхідні і вихідні струми логічних "1" і "0" ($I_{вх}^1, I_{вх}^0, I_{вих}^1, I_{вих}^0$); вихідні напруги логічних "1" і "0" ($U_{â\delta\sigma}^1, U_{â\delta\sigma}^0$); порогові напруги логічних "1" і "0" ($U_{п\delta}^1, U_{п\delta}^0$); струми споживання мікросхеми при двох станах "1" і "0" ($I_{п\delta}^1, I_{п\delta}^0$).

До динамічних параметрів відносять часові параметри: $t^{1,0}$ - тривалість переходу із стану "логічної 1" у стан "логічного 0", вимірюється на рівні 0,9 і 1,0 як інтервал часу, протягом якого напруга на вході логічного елемента переходить від напруги "логічна 1" до напруги "логічний 0"; t^0 - тривалість переходу із стану "логічного 0" у стан "логічної 1", вимірюється на рівні 0,1 і 0,9 як інтервал часу, протягом якого напруга на вході логічного елемента переходить від напруги "логічний 0" до напруги "логічна 1"; $t_{ç\delta\delta}^{1,0}$ - тривалість затримки ввімкнення; $t_{ç\delta\delta}^{0,1}$ - тривалість затримки вимкнення; $t_{ç\delta\delta.\delta}^{1,0}$ - тривалість затримки поширення сигналу при

ввімкненні логічного елементу; $t_{\text{зад.д}}^{0,1}$ - тривалість затримки поширення сигналу при ввімкненні логічного елементу.

До режимних параметрів відносять: $E_{\text{min}}, E_{\text{max}}$ - допустимі значення напруги живлення; $U_{\text{min}}^1, U_{\text{max}}^0$ - допустимі значення рівнів логічних сигналів "1" і "0"; $2_{\text{ад.мак}}^0, 2_{\text{ад.мак}}^1, 2_{\text{ад.мін}}^1$ - допустимі входні і вихідні струми при станах "1" і "0".

При проектуванні електронних пристроїв на елементах інтегральних мікросхем важливим є параметр їх надійності.

4.2.5. Логічні ІМС типу ДТЛ, ТТЛ, на МДН (МОН) транзисторах

Діодно-транзисторні логічні схеми (ДТЛ) складаються із діодних ланцюжків, які реалізують функцію «І» і транзисторного інвертора. Таким чином, схема типу ДТЛ виконує логічну операцію І-НЕ. Типова схема ДТЛ показана на рис.4.16.

Схема складається із трьох діодів VD1, VD2, VD3, які разом із резистором R1 утворюють логічну схему «І», і простого інвертора на транзисторі VT1. Діоди VD4 і VD5 не виконують логічних функцій; їх завдання – забезпечити необхідну напругу зміщення на базі транзистора VT. Тому ці діоди називають діодами зміщення.

Нехай у вихідному стані напруги на логічних входах дорівнюють нулю. Тоді діоди VD1, VD2, VD3 відкриті і через них протікає практично весь струм від джерела живлення.

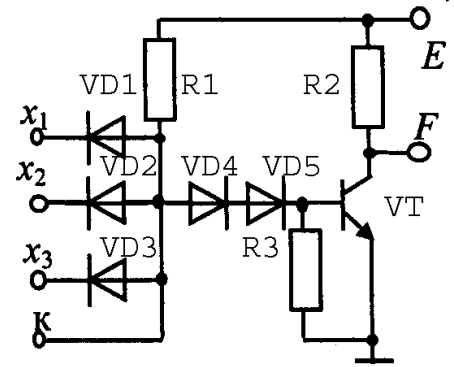


Рис. 4.16. Схема типу ДТЛ

В сторону діодів зміщення VD4 і VD5 струм майже не йде, оскільки опір двох послідовно ввімкнених діодів зміщення і високоомного резистора R3 є значно більшим, ніж опір відкритих входних діодів. Отже, транзистор VT буде надійно закритим. При $I_{\text{к}} = 0$ (транзистор закритий) напруги логічного нуля на входах відповідає напруга логічної одиниці на виході.

При поступанні додатних одиничних сигналів на всі входи одночасно входні діоди VD1, VD2, VD3 закриваються і струм від джерела живлення через діоди зміщення VD4 і VD5 попадає на резистор R3 і в базу транзистора VT. На резисторі R3 при цьому створюється падіння напруги, прикладене до ділянки база-емітер транзистора в прямому напрямку. Транзистор VT переходить із закритого вихідного стану в режим насичення. Струм колектора різко зростає, падіння напруги на резисторі R2 збільшується, а напруга на ділянці колектор - емітер, тобто на виході схеми, знижується до рівня логічного нуля.

Необхідно відмітити, що схема ДТЛ дозволяє отримати великий логічний перепад напруг на виході і забезпечує високу перешкодостійкість.

Важливим недоліком схем типу ДТЛ є велика кількість діодів, необхідних для виконання заданих логічних операцій і забезпечення надійності схеми. Оскільки кожний діод (а інтегральному виконанні транзистор в діодному ввімкненні) потребує ізолюючого «островка» всередині напівпровідникового кристалу, площа і об'єм інтегральної мікросхеми типу ДТЛ виявляються значними.

Логічні ІМС типу ТТЛ. Із рис.4.16 видно, що сукупність входних (логічних) діодів і діодів зміщення, створюючи зустрічно ввімкнені р-п переходи, по суті відповідає структурі біполярного транзистора. Звідси виникає можливість заміни цієї сукупності багатоемітерним транзистором.

ТТЛ схемами прийнято називати такі логічні ІМС, в яких логічна операція кон'юнкції виконується за допомогою багатоемітерного транзистора п-р-п типу, причому емітерні переходи цього транзистора виконують функції, аналогічні тим, які виконують діоди схем типу ДТЛ, а перехід база-колектор використовується в якості діода зміщення.

На рис.4.17 показано найпростіший варіант схеми ТТЛ, яка

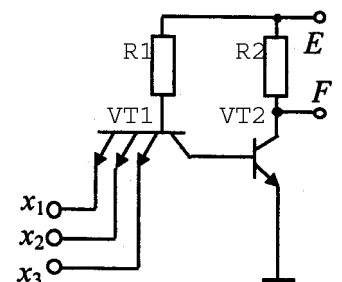


Рис.4.17. Схема типу ТТЛ з простим інвертором

виконує функцію І-НЕ ($F = \overline{x_1 x_2 x_3}$). Якщо на всі входи схеми, тобто на емітери багатоемітерного транзистора, подані додатні напруги, які відповідають логічній одиниці, то емітерні р-n переходи зміщуються в зворотному напрямі. Струм, який поступає в базу багатоемітерного транзистора VT1 через резистор R1, проходить в коло колектора, зміщеного в прямому напрямі, і далі в базу інвертуючого транзистора VT2. При цьому транзистор VT2 переходить в режим насичення, а напруга на виході схеми відповідає логічному нулю.

Якщо хоча б на один вхід подано напругу логічного нуля, то відповідний емітерний перехід транзистора VT1 зміщується в прямому напрямі. Струм, який поступає в базу транзистора VT1, буде переважно проходити через цей перехід. Колекторний струм транзистора VT1 зменшується, і транзистор VT2 закриється, так як струм в його базі стане менше порогу ввімкнення. На виході схеми напруга підніметься до рівня логічної одиниці.

Основною перевагою схеми ТТЛ перед іншими типами логічних ІМС в їх великій швидкодії, яка базується на активній дії механізму перемикавання вхідного транзистора.

Логічні ІМС на МДН (МОН)-транзисторах. Логічні схеми на основі транзисторів типу МДН можуть містити як схеми І-НЕ, так і схеми АБО-НЕ, а також схеми І, І-АБО-НЕ і т.д. На відміну від схем на біполярних транзисторах в даних схемах в якості навантажувальних резисторів використовуються відкриті МДН-транзистори. В зв'язку з цим спрощується технологія виготовлення інтегральних схем і, крім того, збільшується густина розміщення, так як МДН-транзистор займає на підложці меншу площу, чим дифузійний резистор. В логічних схемах на МДН-транзисторах відсутні елементи (резистори, діоди, конденсатори) в колах зв'язку між виходом одного транзистора і входом іншого. Це пояснюється високим вхідним опором МДН-транзисторів.

На рис.4.18 приведена схема базового логічного елемента АБО-НЕ на МДН-транзисторах з п-каналом.

Слід відмітити, що на роботу логічних ІМС на МДН-транзисторах суттєво впливає паразитна ємність навантаження C_H (показана пунктиром на рис.4.18). При значному збільшенні кількості навантажень збільшується постійна часу зарядки сумарної паразитної ємності навантаження, що призводить до зниження швидкодії схеми.

Досить дієвою є розробка логічних ІМС на польових МОН-транзисторах з каналами різного типу провідності (рис.4.17). Такі транзистори називають *комплементарними*, а логічні ІМС цього типу позначаються КМОНТЛ. Оскільки відкривання одного із цих транзисторів завжди супроводжується закриванням іншого, то такі схеми практично не споживають потужності в статичному режимі.

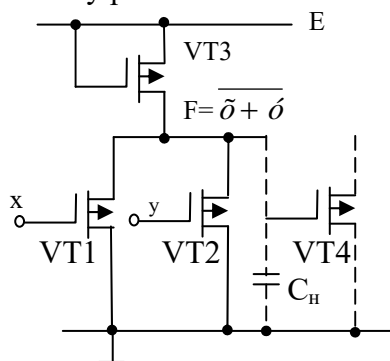
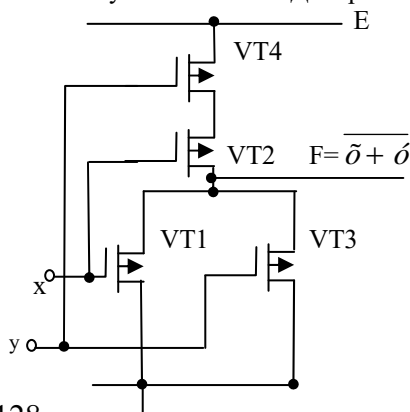


Рис.4.18. Схема базового логічного елемента АБО-НЕ на МДН-транзисторах

Загальна закономірність побудови схем КМОНТЛ в тому, що паралельне з'єднання одного типу транзисторів супроводжується послідовним з'єднанням транзисторів іншого типу.



Нехай в схемі на рис.4.19 на обидва логічних входи подані напруги, що відповідають логічному нулю. Тоді в п-канальних транзисторах VT1 і VT3 канал перекривається, тобто транзистори є закритими. В р-канальних транзисторах VT2 і VT4 канали відкриваються, однак, оскільки через ці канали протікають незначні за величиною струми закритих транзисторів VT1 і VT3, падінням напруги на каналах можна знехтувати.

Рис.4.19. Логічна ІМС на комплементарних транзисторах КМОНТЛз паралельним ввімкненням логічних транзисторів

Отже, вихідна напруга, яка приблизно дорівнює напрузі джерела живлення, буде відповідати рівню логічної одиниці.

Якщо подати на вхід x напругу логічної одиниці, то транзистор $VT1$ відкривається, а транзистор $VT2$ (з каналом протилежної полярності) закривається. Несмачний остаточний струм транзистора $VT2$, протікаючи через канал транзистора $VT1$, створює на ньому практично нульове падіння напруги, тому на виході схеми рівень напруги буде відповідати логічному нулю. Логічний перепад напруг в цій схемі є досить великим (наближено рівним напрузі джерела живлення). Тому перешкодостійкість схеми підвищується.

4.2.6. Коротка характеристика деяких серій логічних ІМС

Логічні ІМС серії 133. Мікросхеми даної серії побудовані на базових елементах транзисторно-транзисторної логіки. В склад серії входять мікросхеми, що дозволяють виконувати різні логічні операції:

- 1ЛБ331 (К1ЛБ331) – 2 елементи 4І – НЕ, один розширяє мий по АБО;
- 1ЛБ332 (К1ЛБ332) – ЕЛЕМЕНТ 8І – НЕ;
- 1ЛБ333 (К1ЛБ333) – 4 елементи 2І – НЕ;
- 1ЛБ334 (К1ЛБ334) – 3 елементи 3І – НЕ і т.д.

В якості прикладу на рис.4.20 наведена принципова електрична схема мікросхеми серії К1ЛБ331 і її умовне графічне зображення.

Напруга джерела живлення всіх мікросхем серії 133 $U_{д.ж.} = 5$ В; допустиме відхилення $U_{д.ж.}$ не більше $\pm 5\%$; споживана потужність (в залежності від різновидності мікросхеми) $P_{спож} = 52 \dots 160$ мВт; $U_{âââ}^1 \geq 2,4\hat{A}$; $U_{âââ}^0 \leq 0,4\hat{A}$; $t_{çàâ}^{1,0} \leq 17 \dots 60\hat{iñ}$; $t_{çàâ}^{0,1} \leq 36\hat{iñ}$;

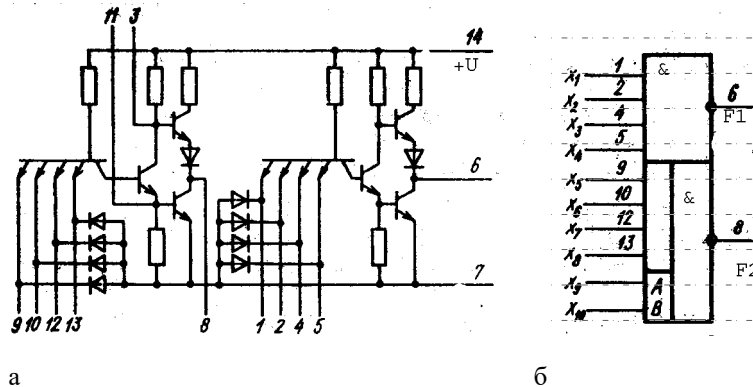


Рис. 4.20. Логічна ІМС К1ЛБ331: а – схема електрична принципова; б – умовне графічне позначення

Логічні ІМС серії 155. В склад серії входять транзисторно-транзисторні мікросхеми, які виконують наступні складні логічні операції типу 4І-НЕ, 8І – НЕ, 2І – 2АБО – НЕ, 4-4І-2АБО-НЕ і т.п.

Типова мікросхема даної серії 1ЛБ553 (К1ЛБ553) являє собою чотири елементи 2І – НЕ (рис.4.21) і характеризується наступними параметрами:

$$U_{д.ж.} = 5 \text{ В} \pm 5\%; \quad P_{спож} = 110 \text{ мВт}; \quad U_{âââ}^1 \geq 2,4\hat{A}; \quad U_{âââ}^0 \leq 0,4\hat{A}; \quad t_{çàâ}^{1,0} \leq 15\hat{iñ}; \quad t_{çàâ}^{0,1} \leq 29\hat{iñ}.$$

Логічні ІМС серії 172. Мікросхеми цієї серії побудовані на МОНОтранзисторах. В склад серії входять наступні логічні ІМС:

- К1ЛБ721 – 2 елементи 4АБО – НЕ /4АБО;
- К1ЛБ722 – елемент 10АБО – не/10АБО;
- К1ЛИ721 – 4 елементи 2І;
- К1ЛР721 – 2 елементи 2І – 2АБО/2І – 2АБО – НЕ.

На рис.4.20 в якості прикладу показані електрична принципова схема і умовне графічне зображення логічної ІМС типу К1ЛИ721. Параметри всіх мікросхем серії:

$$U_{д.ж.} = 27 В \pm 10\%; I_{спож} \leq 5 \text{ мА}; U_{вих}^1 \geq -7,5В; U_{вих}^0 \leq -2В; t_{зам.п.сер.} = 0,6 \text{ мкс}.$$

Рис. 4.22. Логічна ІМС 1ЛБ553 (К1ЛБ553):

а - схема електрична принципова; б - умовне графічне позначення

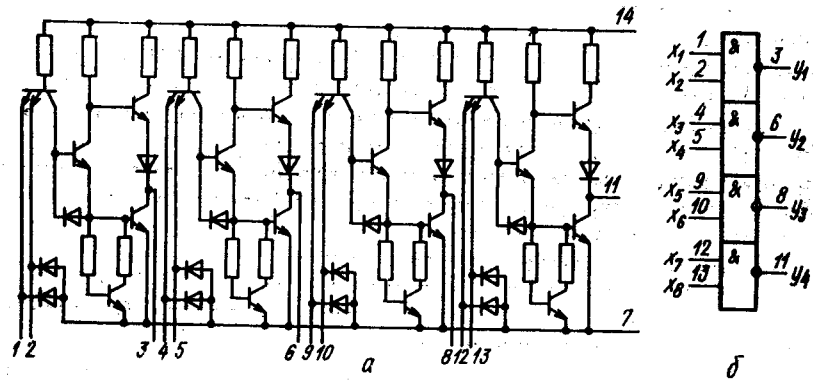
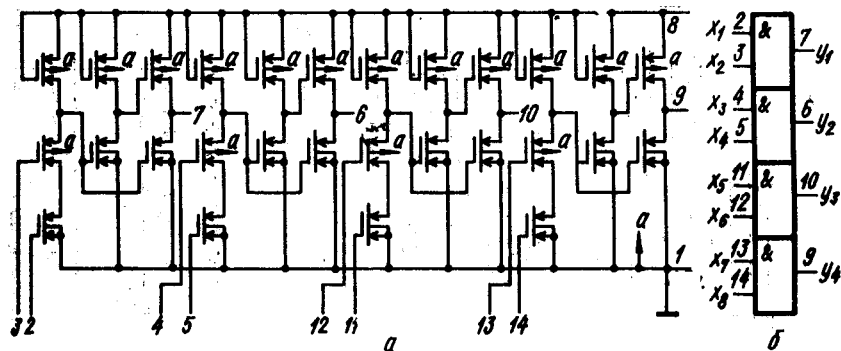


Рис. 4.22. Логічна ІМС 1ЛИ721 (К1ЛИ721):

а - схема електрична принципова; б - умовне графічне позначення



Контрольні питання та вправи

1. Охарактеризувати алгебру логіки.
2. Дайте характеристику логічним функціям І, АБО, НЕ, І-НЕ, АБО-НЕ.
3. Чому діоди та транзистори можуть використовуватися для побудови логічних схем?
4. Розкажіть про роботу простих логічних схем.
5. За якими ознаками проводиться класифікація логічних ІМС?
6. Якими параметрами характеризуються логічні ІМС?
7. Для чого в схемах ТТЛ використовується багатоємний транзистор?
8. Розшифруйте позначення таких логічних ІМС: К1ЛБ041, К1ЛИ45, К1ЛП062, К1ЛР081, К1ЛБ106В, К1ЛН101А, К1ЛБА, К1ЛЛ201.
9. Побудуйте схему на основі простих логічних елементів за логічним рівнянням $F = \overline{ab}(c + \overline{c}(\overline{ab} + \overline{cb})) + bc$
- 10.

4.3. ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ

4.3.1. Цифрові способи зображення (передавання) інформації. Системи числення

Система числення - це сукупність правил і символів для зображення і запису чисел. Залежно від кількості символів, які складають основу системи, розрізняють різні системи числення. В ЕОМ найбільшого поширення набула двійкова система числення, основою якої є число 2, тобто її числа утворюють лише два символи — 0 і 1. Комп'ютер виконує дії над операціями зображеними двійковими числами. Адреси комірок пам'яті, де знаходяться ці

операнди, записують вісімковими або (частіше) шістнадцятковими числами. Основою вісімкової системи є число 8 (0... 7), а основою шістнадцяткової системи є число 16 (0.. 9, А, В, С, Д, Е, F).

Для переводу десяткових чисел у будь-яку систему потрібно послідовно ділити десяткове число на основу системи, в яку переводять (записуючи частки лише цілими числами) до тих пір, аж поки не отримають частку, меншу за основу системи, в яку це число переводять.

Щоб отримати нове число, потрібно записати всі проміжні остачі, починаючи із останньої частки. Щоб перевести число із будь-якої системи в десяткове потрібно додати ваги розрядів цього числа, вагу (вартість) розряду визначають із виразу $a_i \cdot q^{n-1}$,

де a_i - число i -того розряду,

q — основа системи із якої переводять,

n - кількість розрядів перевідного числа.

Всі системи числення поділяють на позиційні і непозиційні. Прикладом непозиційної може бути римська система.

У позиційних системах будь-яке число зображують послідовністю цифр у числі. Кількість цифр (символів), яка використовується в позиційній системі числення, називається основою системи.

Позиція цифри в числі називається розрядом. Для оцінки кількісного значення кожного розряду числа будь-якої системи використовується основа системи, яка вказує в скільки разів одиниця $i+1$ розряду більша від одиниці і попереднього (молодшого) розряду

$$a_n \cdot k^{n-1} + a_{n-1} \cdot k^n + \dots + a_0 k^0 + a_{-1} k^{-1} + a_{-2} k^{-2} + \dots(1)$$

де k - основа системи;

a - цифра розряду;

n - кількість розрядів числа.

Наприклад, число 123 десяткової системи можна записати так:

$$1 \cdot 10^{3-1} + 2 \cdot 10^{3-2} + 3 \cdot 10^{3-3} = 100 + 20 + 3 = 123$$

Це відноситься і до будь-якої системи числення.

В обчислювальній техніці в основному використовуються три системи числення: двійкова, вісімкова, шістнадцяткова.

Двійкова система числення. Широке використання цієї системи в ЕОМ пояснюється наступним:

- різноманітністю і простотою технічної реалізації елементів з двома стійкими станами;
- добре розрізняються ці два стани, що зменшує спотворення сигналів і можливість збиття;
- простотою виконання математичних операцій;
- економічністю обладнання;
- можливістю використання апарату алгебри логіки для аналізу і синтезу операційних пристроїв.

Недоліком двійкової системи є її громіздкість, а також необхідність переводити двійкові числа в зручні для людини десяткові та навпаки. Але враховуючи ту обставину, що більшість математичних задач потребує порівняно невеликої кількості вихідних даних, у порівнянні з об'ємом обчислень, цей недолік можна вважати несуттєвим.

Основою двійкової системи числення є число 2. Тобто будь-які числа цієї системи зображуються послідовністю лише двох цифр 0 і 1. При цьому кожен старший розряд більший за попередній в два рази. Наприклад, двійкове число 1101101 можна записати так:

$$1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Як і в десятковій системі розряди двійкового числа мають назву: одиниці, двійки, четвірки тощо.

Наприклад: 32 16 8 4 2 1 - назви розрядів.

1 1 1 0 1 1 - двійкове число.

Зверху над двійковим числом поставлені назви розрядів, тобто їх вага. Одиниця на п'ятій позиції означає, що вага цієї одиниці дорівнює 16, тобто одиниця n -того розряду містить у собі 16

простих одиниць (одиниць крайнього правого, наймолодшого розряду). Вагу одиниці кожного розряду можна отримати з (1), як $a \cdot 2^{n-1}$. Надалі, щоб показати в якій системі числення число записане, будемо в кінці числа ставити латинські літери: В - для двійкової; Д - для десяткової; Q - для вісімкової; Н — для шістнадцяткової.

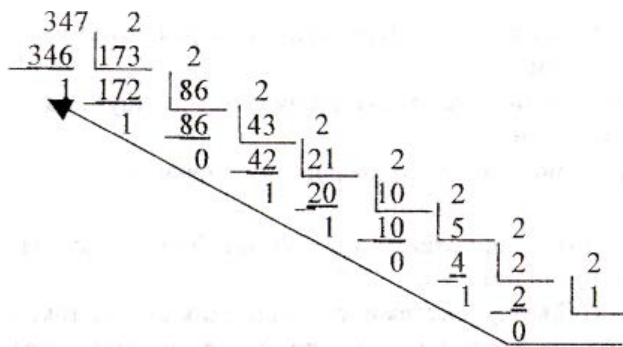
Двійкова система використовується в ЕОМ для запису і зберігання інформації: команд, операндів та ін., тобто програм. Тому десяткові числа потрібно уміти записувати в двійковій формі.

Щоб перевести десяткове число у двійкове, потрібно послідовно ділити десяткове число на основу двійкової системи - число 2, доти, поки остання частка не стане меншою за основу, тобто число 2. У частку потрібно записувати тільки ціле число.

Наприклад, $347_{10} = X_{16}$? Цей запис означає, що десяткове число 347 потрібно перевести у двійкове записуємо проміжні остачі, починаючи з 1), як $a \cdot 2^{n-1}$. Надалі, щоб показати в якій системі числення число записане, будемо в кінці числа ставити латинські літери: В - для двійкової; Д - для десяткової; Q - для вісімкової; Н — для шістнадцяткової.

Двійкова система використовується в ЕОМ для запису і зберігання інформації: команд, операндів та ін., тобто програм. Тому десяткові числа потрібно уміти записувати в двійковій формі.

Щоб перевести десяткове число у двійкове, потрібно послідовно ділити десяткове число на основу двійкової системи - число 2, доти, поки остання частка не стане меншою за основу, тобто число 2. У частку потрібно записувати тільки ціле число.



Наприклад, $347_{10} = X_{16}$? Цей запис означає, що десяткове число 347 потрібно перевести у двійкове записуємо проміжні остачі, починаючи з останньої частки, як показано стрілкою. Ця остання частка буде найстаршим розрядом:

$347_{10} = 101011011_{2}$. Звідси видно недолік двійкової системи: її громіздкість. Десяткове 347 трьохзначне, а двійкове 101011011 десятирозрядне. Для переведення двійкового числа в десяткове потрібно додати ваги тих розрядів двійкового числа, в яких стоять одиниці.

Наприклад: $101011011_{2} = X_{10}$.

$$1 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 256 + 64 + 8 + 2 + 1 = 247.$$

Зауважимо, що операцію віднімання двійкових чисел можна замінити операцією додавання.

Для цього від'ємник зображують у доповнюючому коді, який отримують з оберненого коду шляхом додавання одиниці до молодшого розряду:

$$11011 - 111.$$

Додаємо до від'ємника попереду числа два нулі, щоб зрівняти кількість розрядів: 00111, а потім отримуємо обернений код шляхом 'Іміни нулів одиницями і одиниць нулями: 11000 - обернений код. Щоб отримати доповнюючий код числа, додаємо до меншого розряду оберненого коду одиницю $11000 + 1 = 11001$ - доповнюючий код.

Виконуємо додавання:

$$\begin{array}{r} 11011 \text{ (27)} \\ + 11001 \text{ (7)} \\ \hline 110100 \text{ (20)} \end{array}$$

отримане число позитивне.

відкидається одиниця старшого розряду, якщо

Якщо сума позитивне число, то відкидаємо одиницю переносу старшого розряду і отримуємо результат 10100.

Якщо різниця число негативне (біт старшого розряду рівний 1), то результат отримано в доповнюючому коді. Для визначення абсолютного значення негативного числа необхідно виконати операцію знаходження доповнюючого коду: $111 \text{ (7)} - 11011 \text{ (27)} = 10100 \text{ (-20)}$.

1. Визначаємо доповнюючий код числа 27:

$$\begin{array}{r} 11011 \text{ - прямиий код числа 27,} \\ + 00100 \text{ - обернений код числа 27,} \\ \underline{00001} \text{ - доповнююча одиниця,} \\ 00101 \text{ - доповнюючий код числа 27.} \end{array}$$

2. Обчислюємо різницю:

$$\begin{array}{r} + 00111 \text{ - (7),} \\ + \underline{00100} \text{ - доповнюючий код числа 27,} \\ 01100 \text{ - різниця у формі доповнення,} \\ \quad \uparrow \text{ бо у старшому розряді 1,} \\ \quad \text{ - старший розряд знаковий.} \end{array}$$

3. Визначаємо абсолютне значення різниці:

$$\begin{array}{r} 01100 \text{ - доповнюючий код різниці,} \\ 10011 \text{ - обернений код різниці,} \\ 00001 \text{ - одиниця доповнення,} \\ 10100 \text{ (20) - результат віднімання.} \end{array}$$

Множення чисел:

При множенні користуються тим же правилом, що і в десятковій системі:

$$\begin{array}{r} . 101 \text{ (5)} \\ \underline{1010} \text{ (10)} \\ + \quad 000 \\ \quad 101 \\ + 000 \\ \underline{001} \\ 110010 \text{ (50)} \end{array}$$

Для переводу дробового десяткового числа в двійкове переводять окремо цілу частину за вищеописаним правилом, а дробову частину - окремо. Для цього дробову частину множать на основу системи (число два), у результаті відкидають цілу частину, а дробову знову множать на основу до отримання необхідної кількості розрядів:

$$\begin{array}{r} 0,376_{10} = \text{XB?} \\ . 0,376 \\ \quad \underline{2} \\ . 0,752 \\ \quad \underline{2} \\ . 1,0504 \\ \quad \underline{2} \\ 1,008 \end{array} \qquad 0,376 \approx 0,011_{10}$$

Результат отримали, записавши цілі частини зверху донизу.

Вісімкова система. Вісімкова система забезпечує більш компактну форму запису чисел ніж двійкова, тому широко використовується в ЕОМ. Основою цієї системи є число вісім, тобто в ній використовуються наступні символи 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Якщо $8 = 2^3$, то вісімкову систему називають двійково-кодованою: кожне число вісімкової системи можна представити трьохрозрядним двійковим (від 000 до 111), тобто цінною особливістю вісімкової системи є водночас простота переводу чисел з двійкової системи в вісімкову і навпаки.

Для переводу вісімкового числа в двійкове необхідно кожному вісімкову цифру замінити його трьохрозрядним двійковим еквівалентом:

$$235_{\text{Q}} = \text{XB?} \quad \begin{array}{l} 2 - 010, \\ 3 - 011, \\ 5 - 101, \end{array}$$

$$\text{отже } 235_{\text{Q}} = 010011101_{\text{B}}$$

↑
відкидають.

Для переводу двійкового числа в вісімкове розбивають двійкове число на тріади (групи по три розряди) в обидві сторони від коми. За необхідності додають нулі на початку і в кінці числа, а потім кожен тріаду замінюють еквівалентною вісімковою цифрою.

Наприклад,

$$1110110101_{\text{B}} = \text{XQ?}$$

1. Розбиваємо двійкове число на тріади: 001. 110. 110. 101.

2. Замінюємо кожен тріаду вісімковою цифрою: 001 = 1; 110 = 6;

$$110 = 6; 101 = 5, \text{ отже } 1110110101_{\text{B}} = 1665_{\text{Q}}.$$

Для переводу десяткового числа у вісімкове ділять десяткове число послідовно на вісім, аж поки остання частка не стане меншою за вісім. Проміжні остачі записують, починаючи з останньої частки, яка є старшим розрядом вісімкового числа:

$$89_{\text{D}} = \text{XQ?}$$

$$\begin{array}{r} 89 \overline{) 8} \\ \underline{88} \quad 11 \overline{) 8} \\ \underline{8} \quad 3 \end{array}$$

отже, $89_{\text{D}} = 131_{\text{Q}}$.

Для зворотного переведення необхідно додати ваги розрядів вісімкового числа:

$$131_{\text{Q}} = \text{XD?}$$

$$1 \cdot 8^2 + 3 \cdot 8^1 + 1 \cdot 8^0 = 64 + 24 + 1 = 89.$$

Отже, $131_{\text{Q}} = 89_{\text{D}}$, тобто вага розряду визначається згідно з (1) як $a \cdot 8^{n-1}$.

Додавання у вісімковій системі здійснюється за тими ж правилами, що і в десятковій системі: 11 перенос,

$$\begin{array}{r} + \quad 246_{\text{Q}} \\ \quad 57_{\text{Q}} \\ \hline \quad 325_{\text{Q}} \end{array} \quad 6 + 7 = 13_{\text{D}}, \text{ яке переводиться в вісімкове,}$$

$$\begin{array}{r} 13 \overline{) 8} \\ \underline{8} \quad 1 \\ \hline \quad 5 \end{array}$$

Отже, $13_{\text{D}} = 15_{\text{Q}}$, п'ятірку записуємо в даний розряд, а одиницю переносимо в старший

$1+4+5=10$ Д, яке переводимо у вісімкове:

$$\begin{array}{r} 10 \quad | \quad 8 \\ - \quad 8 \quad | \quad 1 \\ \hline 2 \end{array}$$

Отже, $10Д = 12Q$. Два записуємо в даний розряд, а одиницю переносимо в старший розряд тощо.

Множення вісімкових чисел здійснюється за тими же правилами, що і в десятковій системі: 22 перенос

$$\begin{array}{r} \times 67Q \\ 13Q \\ \hline 245 \\ + 67 \\ \hline 1135 \end{array}$$

$7-3=21В$, яке переводимо у вісімкове

$$\begin{array}{r} 21 \quad | \quad 8 \\ - 16 \quad | \quad 2 \\ \hline 5 \end{array}$$

Отже, $21Д = 25Q$.

П'ятірку записуємо в даний розряд, а двійку переносимо в старший розряд

$6 \cdot 3 = 18 + 2 = 20Д$, яке переводимо у вісімкове

$$\begin{array}{r} 20 \quad | \quad 8 \\ - 16 \quad | \quad 2 \\ \hline 4 \end{array}$$

Отже, $20Д = 24Q$. Чотири записуємо в даний розряд, а два переносимо в старший розряд тощо. Отже, $67Q \cdot 13Q = 1135Q$.

Шістнадцяткова система числення. Використовується в ЕОМ (комп'ютерах) для кодування адрес комірок пам'яті запам'ятовувючих пристроїв. Справа в тому, що для кодування комірок пам'яті необхідно 16 розрядів двійкового числа і при складанні програми, яка містить номери (коди) комірок пам'яті, не важко зробити помилку, тому кодують комірки пам'яті шістнадцятковими числами. Так як $16 = 2^4$, то для кодування комірок пам'яті потрібно лише чотири розряди шістнадцяткового числа.

Шістнадцяткова система має основою 16 символів - це десять чисел від 0 до 9 і шість букв латинського алфавіту: 10 - А, 11 - В, 12 - С, 13 - Д, 14 - Е, 15 - F.

Таким чином, шістнадцяткові числа зображують послідовністю цифр і латинських букв. Кожна буква чи цифра старшого розряду в 16 разів більша за цифру чи букву попереднього, старшого розряду.

Шістнадцяткова система, так само як і вісімкова - двійково-кодована, тобто перевід шістнадцяткових чисел у двійкові і навпаки здійснюється простою заміною символів однієї системи, символами іншої.

Для переведу шістнадцяткового числа у двійкове кожен шістнадцятковий символ замінюють чотирьохрозрядним двійковим аналогом.

6В9FH - ХВ?

$6Н = 0110В$, $ВН (11Д) = 1011В$, $9Н = 1001В$, $FН(15Д) = 1111В$,

отже, $6ВDFH = 0110101110011111В$

↑
— відкидають.

Для переводу двійкового числа в шістнадцяткове розбивають двійкове число на тетради (групи по чотири двійкових розряди) в обидві сторони від коми. За потреби дописують зліва і справа нулі: $110111100010111,10101101B = XH?$

Розбиваємо цілу частину на тетради від коми вліво, а дробову частину від коми вправо: $0110.1111.0001.0111.1010.1101$

↑ дописуємо, щоб утворилась тетрада.

Замінюємо кожну тетраду шістнадцятковим аналогом:

$0110B = 6H, 1111B = FH, 0001B = 1H, 0111H = 7H, 1010B = AH, 1101B = DH.$

Отже, $110111100010111,10101101B = 6F17,ADH.$

Для переводу десяткового числа у шістнадцяткове потрібно послідовно ділити десяткове число на основу шістнадцяткової системи (число 16) доти, аж поки не отримаємо частку меншу за 16:

$739D = CH?$

$$\begin{array}{r} 739 \quad |16 \\ - 736 \quad |46|16 \\ \hline 3 \quad |32|2 \\ \quad \quad |14 \end{array}$$

Отже, $739D = 2E3H.$

Для переводу шістнадцяткового числа в десяткове потрібно додати ваги розрядів шістнадцяткового числа: $2E3H = XD.$

$2 \cdot 16^2 + 14 \cdot 16^1 + 3 \cdot 16^0 = 512 + 224 + 3 = 739$, отже, $2E3H = 739D.$

Вагу розряду шістнадцяткового числа визначаємо з (1) як $a \cdot 16^{n-1}$. Додавання в шістнадцятковій системі здійснюється за тими правилами, що і в десятковій $5A9FH + 3FDH; 15 + 13 = 28D$ переводимо в шістнадцяткове

$$\begin{array}{r} 28 \quad |16 \\ - 16 \quad |1 \\ \hline 12 \end{array}$$

Отже, $28D = 1CH.$ С записуємо в цей розряд, а 1 переносимо в наступний.

$$\begin{array}{r} 11 \text{ перенос.} \\ 5A9F \\ + 3FD \\ \hline 5E9C \end{array} \quad 9H = 9D; FH = 15D; 9 + 15 + 1 \text{ переносу} = 25D$$

$25D$ переводимо в шістнадцяткове

$$\begin{array}{r} 25 \quad |16 \\ - 16 \quad |1 \\ \hline 9 \end{array}$$

Отже, $25D = 19H.$

Дев'ять записуємо в цей розряд, а 1 переносимо в старший розряд тощо.

$AH = 10D, 10 + 3 = 14D, 14D = EH$, тому $5A9FH + 3FDH = 5E9CH.$

Множення в шістнадцятковій системі здійснюється за тими правилами, що і в десятковій системі.

$$7ДВН \cdot 7АН \quad ВН=11Д, \quad АН = 10Д,$$

тому $11 \cdot 10 = 110Д$, яке переводимо у шістнадцяткове

$$\begin{array}{r} \underline{\quad} 110 \overline{)16} \\ \underline{\quad} 96 \quad 1 \\ \quad \quad 14 \end{array}$$

Отже, $110Д = 6ЕН$, таке як $14Д = ЕН$.

Е записуємо в даний розряд, а 6 переносимо в старший розряд. $АН = 10Д$, $ДН = 13Д$, тому $10 \cdot 13 = 130 + 6$ переносу = $136Д$, яке переводимо в шістнадцяткове

$$\begin{array}{r} \underline{\quad} 136 \overline{)16} \\ \underline{\quad} 128 \quad 8 \\ \quad \quad 8 \end{array}$$

Отже, $136Д = 88Н$. 8 молодшого розряду записуємо в даний розряд, а 8 старшого розряду переносимо у старший (третій) розряд тощо.

Тому $7ДВН \cdot 7АН = 3ВЕ5ЕН$

$$\begin{array}{r} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} 354 \\ 486 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{перенос } 2 \\ \text{перенос } 1 \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} 7ДВ \\ \times 7А \end{array} \right\} \\ \hline 4Е8Е \\ \hline 36FD \\ \hline 3ВЕ5Е \end{array} \end{array}$$

Віднімання у шістнадцятковій системі здійснюється за тими правилами, що і в десятковій, але потрібно пам'ятати, що позичаємо із старшого розряду число 16, яке потрібно скласти з одиницею молодшого розряду і лише після цього виконувати віднімання

$$5Д4Н - 3Е7Н.$$

Позичаємо з третього розряду 16 і складаємо з 4: $16 + 4 = 20Д - 7Д = ДН$. У старшому (другому) розряді залишилось уже не ДН, а СН, тому позичивши із третього розряду 16 додаємо його до С: $16Д + 12Д = 28Д$ від якого віднімаємо ЕН: $28Д - 14Д = 14Д = ЕН$. У третьому розряді зменшуваного замість 5Н залишилось 4Н, тому $4Н - 3Н = 1Н$, отже, $5Д4Н - 3Е7Н = 1ЕДН$.

У правильності виконання операції віднімання можна переконатись, додавши різницю і від'ємник:

$$\begin{array}{r} + 3Е7Н \\ \underline{1ЕДН} \\ 5Д4Н \end{array}$$

4.3.2 Тригери на логічних елементах

Тригери – спускові або регенеративні пристрої з двома можливими стійкими станами, в які вони можуть встановлюватися керуючими входними сигналами, і можуть запам'ятовувати 1 біт інформації.

Існує велика кількість різновидностей тригерів, які відрізняються за видом входних і вихідних сигналів, а також за способом керування станами запису інформації в тригер.

За видом входних сигналів розрізняють тригери з імпульсним і потенціальним керуванням. В цифрових пристроях в основному застосовують тригери з потенціальним керуванням.

За способом запису інформації тригери діляться на асинхронні та синхронні. В асинхронних тригерах момент перемикавання визначається моментом зміни кодової комбінації на інформаційних входах. В синхронних тригерах зміна станів здійснюється в строго визначені моменти дії спеціальних тактових імпульсів. Синхронізація тригерів відбувається за рівнем тактового сигналу або за його додатному чи від'ємному фронту.

За видом вихідних сигналів розрізняють статичні і динамічні тригери. В статичних тригерах стійкі стани ідентифікуються за рівнями постійних напруг на їх виходах. Стани динамічних тригерів визначаються за наявністю або відсутністю на виходах безперервної серії імпульсів. Найбільше розповсюдження в цифровій схемотехніці отримали статичні тригери.

Функціонально тригер можна представити у вигляді елемента пам'яті із схемою керування (рис.4.19). елемент пам'яті зберігає інформацію про результати попередньої дії на тригер. Схема керування реалізує правила реагування тригера на різні входні сигнали та їх комбінації. В кінцевому рахунку схема керування виробляє сигнали, які забезпечують зберігання інформації в елементі пам'яті, підтвердження стану або перемикавання запам'ятовуючого елемента в новий стан. В двійковому тригері для зміни станів запам'ятовуючого елемента достатньо виробити сигнали установки в одиничний стан (Установка «1») і в нульовий (Установка «0»). Відсутність сигналів установки відповідає режиму зберігання інформації, а їх одночасна дія призводить до невизначеного результату, тому таке керування зазвичай не використовується.

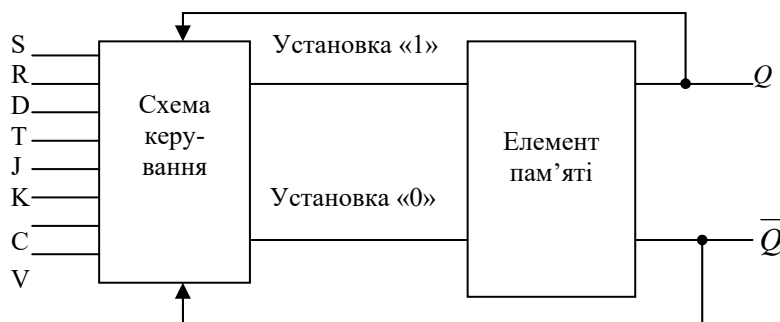


Рис. 4.19. Функціональна схема тригера

За реакцією тригера на входні керуючі дії розрізняють наступні види входів:

S – вхід для установки тригера в стан «1» ($Q = 1$);

R – вхід для збросу тригера в стан «0» ($Q = 0$);

D – вхід для установки тригера в стан «1» при $D=1$ або «0» при $D=0$ з затримкою перемикавання виходів Q і \bar{Q} по відношенню до входу D;

T – вхід перемикавання тригера в протилежний стан;

J, K – входи для установки і збросу тригера в стан відповідно «1» і «0» аналогічно входам S і R; відмінність в тому, що одночасне збудження входів S і R обумовлює невизначеність переходу тригера в один із двох можливих станів, а одночасне збудження входів J і K викликає однозначну зміну стану тригера аналогічно входу T;

C – вхід синхронізації для точного задання моментів перемикавання станів тригера (перемикавання тригера, запис чи зберігання інформації здійснюється лише після поступання на вхід C тактового імпульсу, який сприймається по передньому або задньому фронту);

V – вхід для дозволу або заборони реагування тригера на відповідні керуючі входи.

Розглянемо різновидності тригерів і принципи їх функціонування.

RS-тригери. RS-тригер - двохходовий цифровий елемент, який при подачі активного сигналу на S-вхід і неактивного сигналу на R- вхід, встановлюється в одиничний стан; при подачі

активного сигналу на R -вхід і неактивного сигналу на S -вхід встановлюється у нульовий стан; одночасна подача двох активних сигналів на S - і R -вхід заборонена, якщо така ситуація виникає, то для стану тригера це не має значення.

На рис. 4.20,а наведено схему RS-тригера на елементах АБО-НЕ, на рис. 4.20,б - умовне графічне зображення, а на рис. 4.20,в - часові діаграми роботи тригера. Дана схема RS-тригера керується неінверсними сигналами, а забороненою комбінацією є випадок, коли $S = 1$ і $R = 1$.

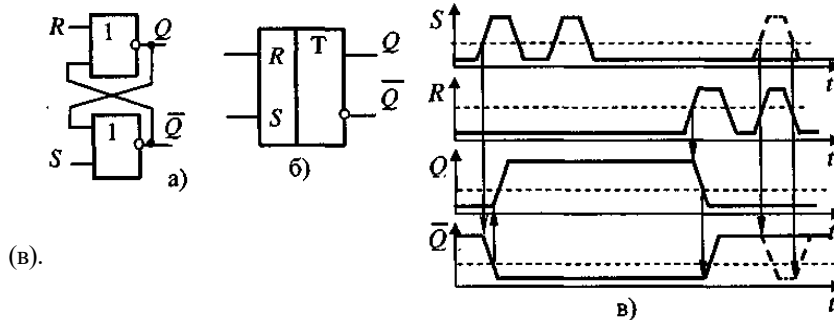


Рис. 4.20. Схема RS-тригера на елементах АБО-НЕ (а), його умовне графічне позначення (б) і часові діаграми роботи

Аналогічно можна реалізувати RS-тригер на логічних елементах І-НЕ. На рис. 4.21,а подано схему RS-тригера на елементах І-НЕ, на рис. 4.21,б - умовне графічне зображення, а на рис. 4.21,в - часові діаграми роботи тригера.

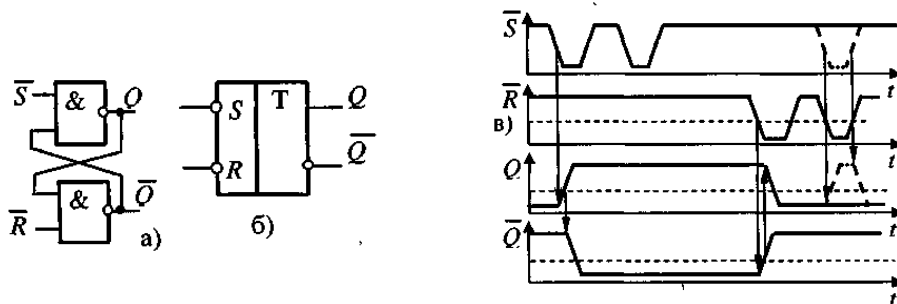


Рис. 4.21. Схема RS-тригера на елементах І-НЕ (а), його умовне графічне позначення (б) і часові діаграми роботи (в)

Даний RS-тригер на елементах І-НЕ керується інверсними сигналами. У режимі зберігання інформації на входи \bar{R} і \bar{S} подається "логічна 1", керування здійснюється подачею на відповідний вхід рівня "0", а забороненою комбінацією є випадок, коли $S = 0$ і $R = 0$, тоді тригер не реагує на подачу сигналів.

D-тригери. До D-тригера належить послідовнісний бістабільний пристрій з одним інформаційним входом D і входом синхронізації, який у момент дії синхронізуючого рівня або фронту встановлюється у стан, що визначається логічним рівнем сигналу на вході D, а в проміжку між синхроімпульсами перебуває в режимі зберігання інформації. Можна реалізувати і асинхронні D-тригери, які не мають практичного застосування.

Синхронний D-тригер наведено на рис. 4.22.

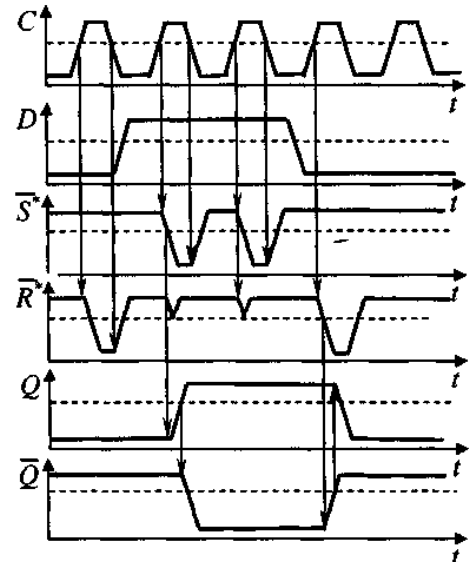
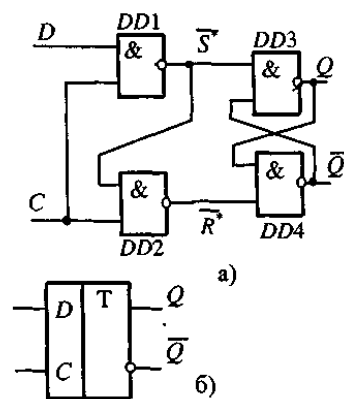


Рис. 4.22. Схема D-тригера на елементах І-НЕ (а), його умовне графічне позначення (б) і часові діаграми роботи (в)

Якщо на синхронізуючий вхід D-тригера подати рівень $C=0$, що є домінуючим для логічних елементів DD1 і DD2, на їх виходах встановляться рівні

$\bar{S} = \bar{R} = 1$, які не залежать від стану інформаційного входу D і забезпечують режим зберігання асинхронного тригера на логічних елементах DD3 і DD4. При $C=0$ інформаційний вихід однозначно визначається станом виходу елемента DD1, який у свою чергу зумовлює інверсний рівень на виході елемента DD2. Якщо при цьому $\bar{D} = 0$, тригер встановлюється в нульовий стан, тобто тригер записує інформацію, подану на вхід D до встановлення синхронізуючого рівня $C=1$. Відповідно, інформація на виході D-тригера з'явиться із затримкою відносно інформації на вході D.

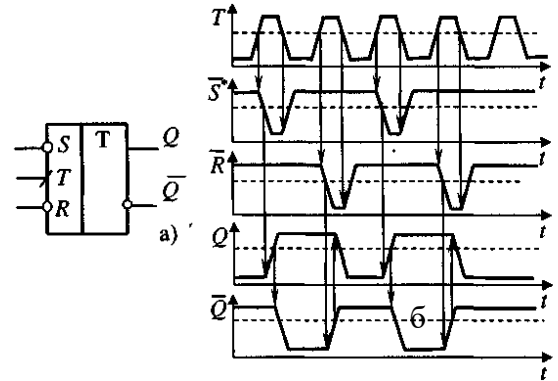
Т-тригери. До Т-тригера належить послідовнісний бістабільний пристрій з одним керувальним входом Т, який кожним входним сигналом перемикається у протилежний стан.

Т-тригери, режим їхньої роботи і керувальний вхід називають лічильниками.

Графічне зображення асинхронного Т-тригера і часові діаграми роботи наведено рис. 4.23, а і б.

Якщо проаналізувати діаграми роботи Т-тригера, то перемикання виходів відбувається при подачі входних сигналів на інверсні входи S і R, при цьому вхід S перемикає вихід в "1", вхід R - у "0".

Рис. 4.23. Графічне позначення Т-тригера (а) і часові діаграми його роботи (б).



JK-тригер. Універсальний JK -тригер - це послідовнісний регенеративний бістабільний пристрій з двома інформаційними входами J і K, які у випадку входної комбінації $J=K=1$ перемикають його у протилежний стан, а при будь-яких інших комбінаціях вони функціонують як RS-тригер, в якого роль входів S і R виконують відповідно входи J і K.

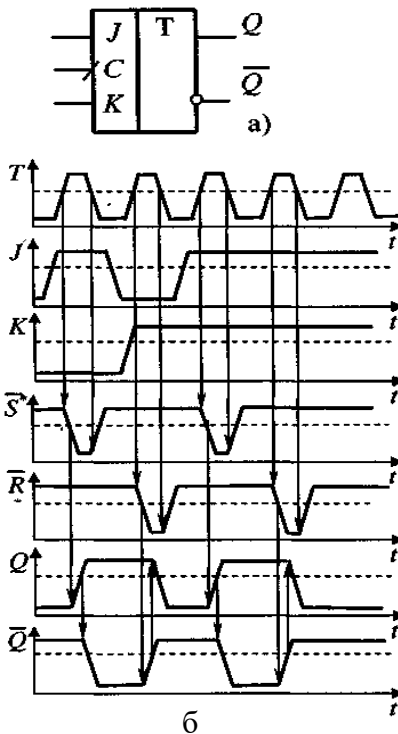


Рис. 4.24. Графічне позначення JK-тригера (а) і часові діаграми роботи (б)

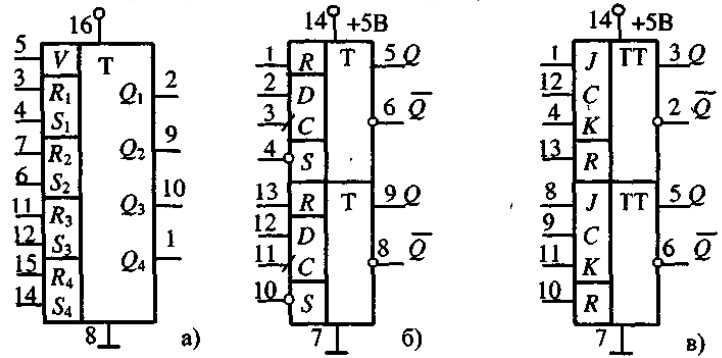
Графічне зображення універсального JK-тригера і часові діаграми роботи наведено на рис. 4.24, а, б.

Для забезпечення лічильного режиму роботи JK-тригер за аналогією з Т-тригером має елемент затримки або виконаний за двотактною схемою.

Невизначеним станом вважається, коли $J=K=0$. Для всіх інших комбінацій J і K при наявності тактових імпульсів на вході C тригер буде змінювати стан на виходах і відбуватиметься поділ входних імпульсів за модулем "2"

Рис. 4.25. Приклади графічного позначення тригерів:

- а - RS-тригер К561ТР2;
- б - D-тригер К155ТМ2;
- в - JK-тригер К555ТВ6.



4.3.3. Двійковий лічильник та дільник частоти

Лічильниками називають послідовнісні цифрові пристрої, призначені для підрахунку і запам'ятовування числа імпульсів, що надійшли у певному часовому інтервалі на його лічильний вхід.

За характером зміни стану лічильника вхідними імпульсами розрізняють лічильники підсумовування, віднімання і реверсивні. За способом організації переносів між розрядами їх можна розділити на лічильники з послідовним, наскрізним, паралельним і комбінованим переносом. Лічильники з послідовним і наскрізним переносом називають асинхронними, а з паралельним - синхронними.

Асинхронні лічильники. В асинхронних лічильниках відсутня загальна для всіх розрядів синхронізація і перехід розрядів у новий стан проходить послідовно розряд за розрядом. Послідовний лічильник можна виконати у вигляді ланцюжка Т-тригерів, для кожного з яких лічильний імпульс формується тригером сусіднього молодшого розряду (рис. 4.26,а).

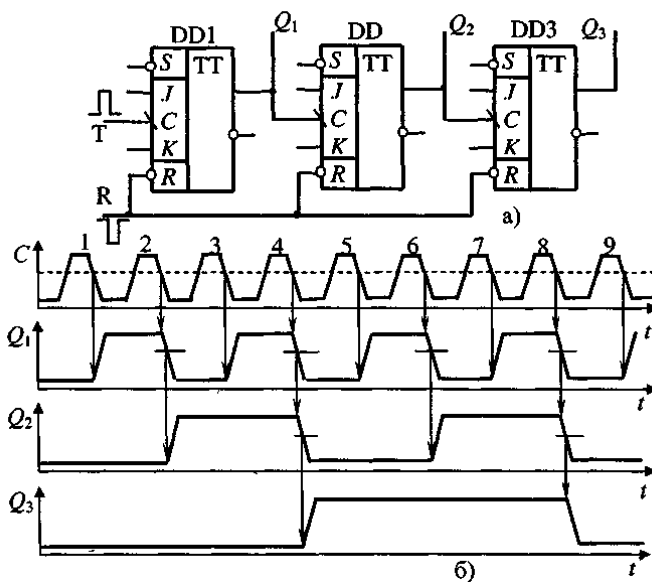


Рис. 4.26. Схема трирозрядного послідовного лічильника імпульсів на JK-тригерах (а) і часова діаграма його роботи (б).

Лічильний режим JK-тригера буде, коли $J=K=1$. Тому на рис. 4.26,а входи J і K тригера вільні, що еквівалентно подачі логічного рівня "1". Із діаграми роботи (рис. 4.26,б) бачимо, що час встановлення лічильника залежить від кількості розрядів, що послідовно перемикаються.

Перевагою послідовного лічильника є мінімізація кількості мікросхем і електричних зв'язків, що спрощує розведення ліній зв'язку і підвищує захист схеми від завад. Основний недолік - низька швидкодія, яка є тим нижчою, чим вищий коефіцієнт рахунку $K_{рах} = 2^N$, де N - число розрядів.

Одним із способів підвищення швидкодії асинхронних лічильників є організація переносів між розрядами через додаткові логічні елементи

Залежно від кількості розрядів N лічильники реалізують коефіцієнт рахунку $K_{рах} = 2^N$ і їх можна використовувати в ролі подільника частоти $f_{д\ddot{a}\ddot{a}} = f_{\delta\ddot{a}\ddot{a}} / \hat{E}_{\delta\ddot{a}\ddot{a}}$

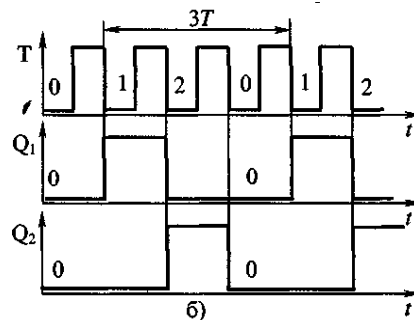
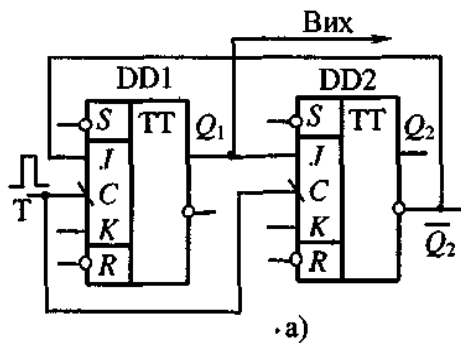


Рис. 4.27. Схема лічильника-подільника частоти на 3 на JK-тригерах (а) і часові діаграми роботи (б).

Оскільки цифрова схемотехніка має у наявності прості подільники частоти з коефіцієнтом рахунку $K_{рах} = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10$, то велика кількість подільників частоти з $K_{рах}$, що розкладаються на прості множники, будується на їх основі. Необхідне $K_{рах}$ одержують введенням в лічильник зворотних зв'язків. Якщо між входом і виходом тригера ввімкнений подільник частоти на довільне натуральне число n , то така схема забезпечує поділ частоти на $K_{рах} = 2n + 1$.

На рис. 4.27 наведено подільник частоти на 3, який реалізований при $n = 1$, що відповідає прямому зв'язку між вхідним DD1 і вихідним DD2 тригерами.

Синхронні лічильники. До синхронних, або паралельних, відносять лічильники, в яких перемикання розрядів проходить одночасно, незалежно від віддаленості розряду від лічильного входу. Це досягається подачею на всі тригери синхронізуючих імпульсів, які додатним чи від'ємним фронтом викликають перемикання тригера згідно з логікою роботи лічильника.

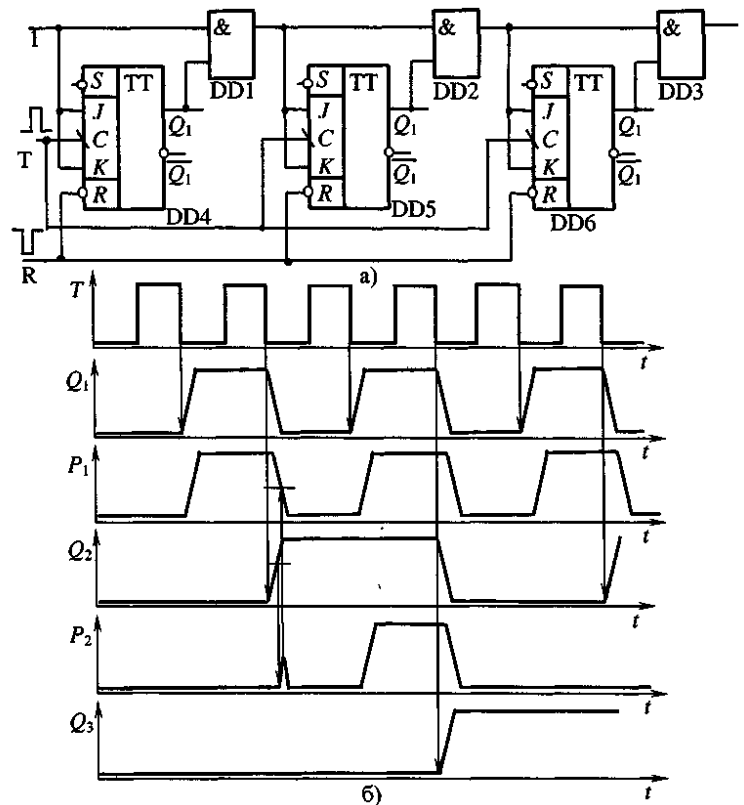


Рис. 4.28. Схема синхронного лічильника на JK-тригерах (а) і часові діаграми роботи (б)

Схема простого підсумовуючого синхронного лічильника наведена на рис. 4.28. Потенціал переносу формується послідовно з розповсюдженням "логічної 1" через вентилі DD1, DD2, DD3. Накопичення затримки за рахунок вентилів ланки переносу зумовлюється взаємним зміщенням лічильних імпульсів T і імпульсів переносу P_i (рис. 4.28,б). Розглянемо мікросхеми деяких лічильників імпульсів, що серійно виготовляються промисловістю.

Чотирирозрядний двійково-десятковий лічильник серій мікросхем K133IE2, K134IE2, K155IE2 і K555IE2, графічне зображення якого наведено на рис. 4.29,а, складається з лічильника за модулем 2 з входом C1 і виходом 1 і лічильника за модулем 5 з входом C2 і виходами 2, 4, 8. З'єднуючи виводи 1 і C2 або 8 і C1, одержимо лічильник за модулем 10. Входи R забезпечують три режими роботи: встановлення "0" при $R_1=R_2=1$ і $R_3=R_4=0$, встановлення "9" при $R_3=R_4=1$ і довільних станах R_1 і R_2 і режим "рахунок" при $R_1=R_2=R_3=R_4=0$. Перемикаються тригери за заднім фронтом сигналів C1 і C2.

Лічильники K133IE4, K155IE4 (рис. 4.29,б) складаються з ізольованого тригера і лічильника за модулем 6. З'єднуючи виводи C1 і 8 або C2 і 1, одержуємо лічильник за

модулем 12. При $R_1=R_2=1$ проводиться встановлення "0", при $R_1=R_2=0$ реалізується режим підрахунку. Перемикаються тригери за заднім фронтом лічильного сигналу.

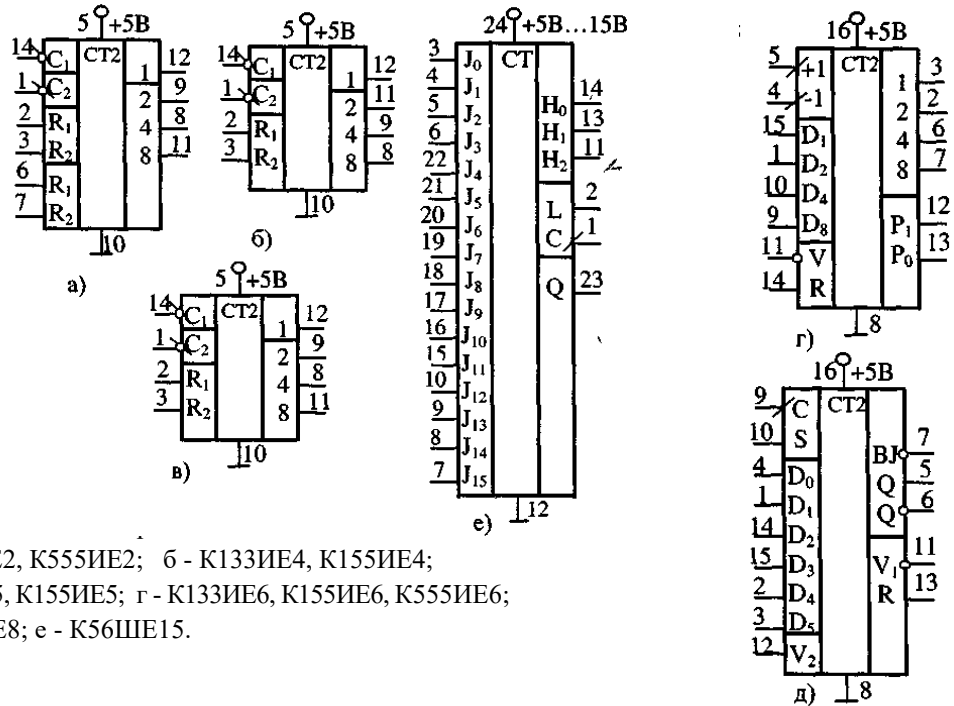


Рис. 4.29. Графічне

а - K133IE2, K155IE2, K555IE2; б - K133IE4, K155IE4;
в - K133IE5, K134IE5, K155IE5; г - K133IE6, K155IE6, K555IE6;
д - K133IE8, K155IE8; е - K56ШЕ15.

Чотирирозрядний двійково-десятковий лічильник серій мікросхем K133IE2, K134IE2, K155IE2 і K555IE2, графічне зображення якого наведено на рис. 4.29,а, складається з лічильника за модулем 2 з входом C1 і виходом 1 і лічильника за модулем 5 з входом C2 і виходами 2, 4, 8. З'єднуючи виводи 1 і C2 або 8 і C1, одержимо лічильник за модулем 10. Входи R забезпечують три режими роботи: встановлення "0" при $R_1=R_2=1$ і $R_3=R_4=0$, встановлення "9" при $R_3=R_4=1$ і довільних станах R_1 і R_2 і режим "рахунок" при $R_1=R_2=R_3=R_4=0$. Перемикаються тригери за заднім фронтом сигналів C1 і C2.

Лічильники K133IE4, K155IE4 (рис. 4.29,б) складаються з ізолюваного тригера і лічильника за модулем 6. З'єднуючи виводи C1 і 8 або C2 і 1, одержуємо лічильник за модулем 12. При $R_1=R_2=1$ проводиться встановлення "0", при $R_1=R_2=0$ реалізується режим підрахунку. Перемикаються тригери за заднім фронтом лічильного сигналу.

Лічильники серії K133IE5, K134IE5, K155IE5 (рис. 4.29, в) складаються з ізолюваного тригера з лічильним входом C1 і виходом 1 і лічильника (трирозрядного двійкового) з входом C2 і виходами 2, 4, 8. З'єднуючи входи C1 і 8 або C2 і 1, одержуємо чотирирозрядний двійковий лічильник, у якого при $R_1=R_2=1$ проводиться встановлення "0", а при $R_1=R_2=0$ реалізується режим лічильника. Перемикаються тригери за заднім фронтом лічильного сигналу.

Десятковий реверсивний лічильник K133IE6, K155IE6, K555IE6 (рис. 4.29,г) працює в режимі встановлення "0" при $R=1$ (стан інших входів не має значення), приймання коду з входів D1 при $R=V=0$ і зберігання коду або рахування при $R=\bar{V}=0$. У режимі рахування стан виходів змінюється за наростанням перепаду сигналу на вході (+1) або (-1).

Шестирозрядний лічильник K133IE8, K155IE8 (рис. 4.29, д) використовується як подільник частоти сигналу C з коефіцієнтом $M/64$, де $M = D_5 + 2D_4 + 2^2D_3 + 2^3D_2 + 2^4D_1 + 2^5D_0$; D, - цифри на відповідних входах. Число M рівне числу імпульсів на виході Q або \bar{Q} , що видає лічильник на кожні 64 вхідні імпульси C. Для каскадування IE8 використовують виводи BJ, S, V1, V2.

Особливу увагу заслуговує подільник частоти K56ШЕ15 зі змінним коефіцієнтом ділення від 3 до 15999 (рис. 4.29,е). Коефіцієнт ділення задається кодом на входах J_i.

4.3.4. Регістри

Регістр - це послідовнісний цифровий пристрій, призначений для приймання, зберігання, простих перетворень і передачі двійкових чисел.

Під простими перетвореннями розуміється зсув чисел на задану кількість розрядів, перетворення послідовного двійкового коду у паралельний і паралельного у послідовний. Базовими елементами регістрів є тригери, які доповнюються комбінаційними логічними елементами для реалізації різних зв'язків між розрядами регістра для управління прийманням і передачею операндів. Основне функціональне призначення регістрів - оперативна пам'ять для багаторозрядних двійкових чисел.

Залежно від способу приймання і передачі двійкової інформації розрізняють паралельні, послідовні, послідовно-паралельні, паралельно-послідовні й універсальні регістри.

Паралельні регістри. У паралельних регістрах або регістрах пам'яті, ввід-вивід всіх розрядів числа проводиться одночасно за один такт. При побудові паралельних регістрів використовуються прості асинхронні RS-тригери і синхронні RS- і D-тригери. На рис. 4.30 подано варіанти паралельних регістрів, які відрізняються типом тригерів і складом вхідних-вихідних інформаційних шин. У регістра на основі асинхронних RS -тригерів (рис. 4.30,а) перед занесенням n -розрядного числа з входів x_1, \dots, x_n необхідно попередньо провести скидання всіх тригерів у нульовий стан. Скидання проводиться сигналом $R=0$. Введення інформації в регістр проходить за сигналом $A=1, R=1$. Якщо на деякому i -му вході $X_i=1$, то $S_i = \overline{X_i} \cdot A = 0$ і даний тригер (з інверсним керуванням) перемкнеться у стан "1". При $X_i=0$ $S_i = \overline{X_i} \cdot A = 1$ і i -тригер збереже стан "0". Виведення інформації із регістра здійснюється за сигналом $B=1$, який визначає стан виводів $Y_i = \overline{Q_i} \cdot B$. Якщо $B=0$, то на всіх виходах встановлюються рівні "логічна 1", а при $B=1$ буде $Y_i = Q_i$. Основний недолік даного регістра -необхідність попередньої його очистки, тому оновлення інформації відбувається за два такти.

Регістр (рис. 4.30, б) також побудований на асинхронних RS -тригерах і не вимагає попередньої очистки інформації, оскільки її поновлення проходить встановленням тригерів у стан "1" і "0" за один такт. Для цього на вході регістра необхідно вдвоє більше логічних елементів і ліній зв'язку. У схемі показаний спосіб видачі інформації у прямому коді (команда $B=1$). Асинхронні RS -тригери в поєднанні з вхідними вентилями фактично утворюють варіанти синхронних RS -тригерів.

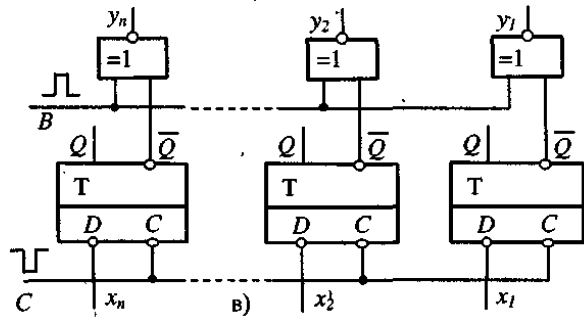
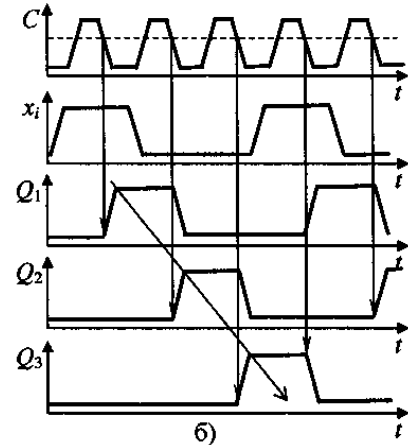
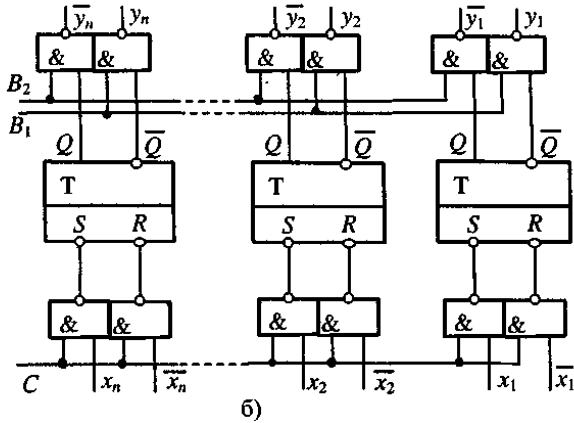
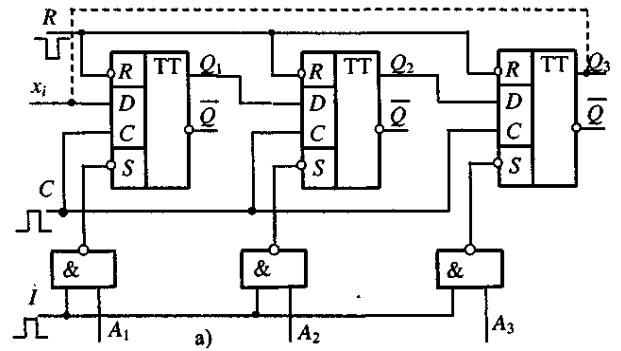
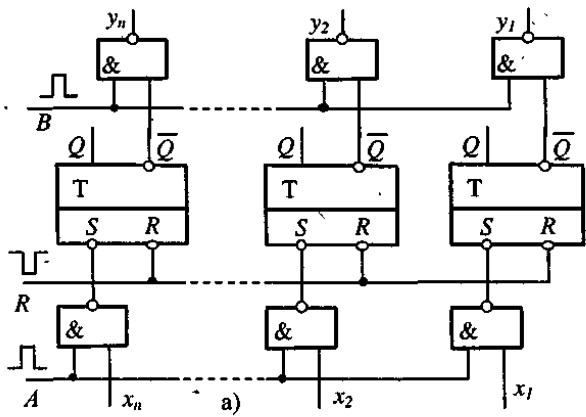
На рис. 4.30,в наведена схема паралельного регістра на основі синхронних D-тригерів.

Послідовні регістри. У послідовних регістрах (зсуваних) введення-виведення інформації здійснюється через один інформаційний вхід і вихід порозрядно зі зсувом числа. За один такт введена або виведена інформація зсувається на один розряд вправо або вліво. Зсувані регістри, які за командою керування реалізують зсув інформації вправо або вліво, називають реверсивними.

На рис. 4.31,а наведено зсувний регістр на D-тригерах, а на рис. 4.31,б - часову діаграму зсуву інформації.

Вводити інформацію можна послідовно із входів x з наступним зсувом її вправо на рдин розряд за синхроімпульсом по входу C або паралельно із входів A за сигналом $I=1$ асинхронним записом числа в попередньо очищений регістр (сигнал $R=0$ асинхронного скидання тригерів у стан "0"). Додатний фронт синхроімпульсу $C=1$ забезпечує запис інформації з входів D і x в тригери першого ступеня. Вихідні рівні тригерів залишаються незмінними.

Від'ємний фронт синхроімпульсу, входи D-тригерів блокує, а рівні на виходах перемкнуться.



синхронних D-

Рис.4.31. Схема зсуваного регістра (а) і часові діаграми зсуву інформації

Рис.4.30. Схеми паралельних регістрів: а - на асинхронних RS-тригерах; б - на попередньої очистки інформації; в-на тригерах.

Схеми деяких типів регістрів наведено на рис. 4.32.

Регістр К155ІР1 (К133ІР1, К134ІР1, К555ІР1) (рис. 4.32,а) реалізує дві мікрооперації: приймання коду з входів D при V= 1 і зсув вправо при V= 0, які виконуються за спадом сигналів C1 і C2 відповідно. При інших станах входів V, C1 і C2 здійснюється зберігання інформації.

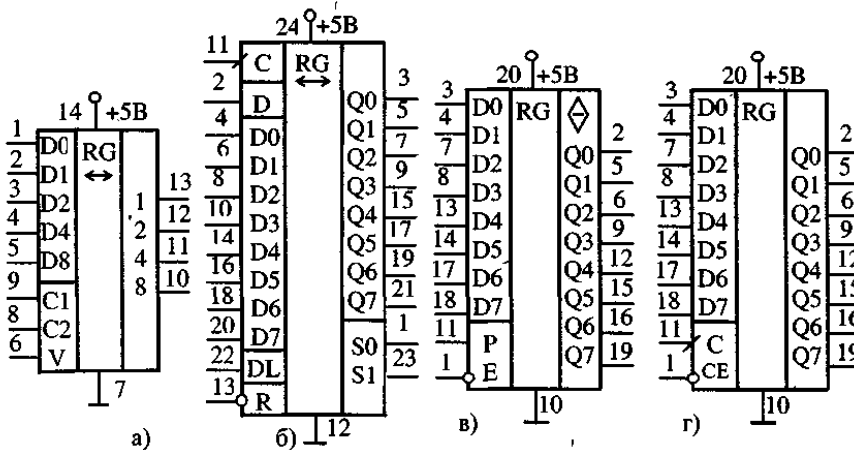


Рис. 4.32. Графічне позначення мікросхем регістрів: а - К155ІР1, К133ІР1, К134ІР1, К555ІР1; б - К133ІР13, К155ІР13; в - К585ІР22(ІР23), К531ІР22(ІР23); г - К555ІР27.

Регістр К133ІР13 (К155ІР13) (рис. 4.32,6) реалізує наступні мікрооперації: встановлення "0" при $R=0$, зсув вліво при $R = S_0 = \overline{S_1} = 1$, зсув вправо при $R = S_1 = \overline{S_0} = 1$, приймання інформації з входів D0-D7 при $R = S_0 = S_1 = 1$. Ці операції виконуються при наростанні синхроімпульсу по С. При інших комбінаціях на входах R, S_0, S_1 реалізується режим зберігання.

При запису інформації в регістр К133ІР13 можна у паралельному коді її і зчитати з виходів Q0-Q7.

Регістр К555ІР22 (ІР23) (рис.4.32,в) є паралельним і має наступні мікрооперації: запис інформації у регістр без попередньої очистки при $PE=1$ (для ІР23 - за наростанням сигналу), видача інформації на вихід при $EO=0$. Якщо $EO=1$, то на виходах Q1-Q8 буде високоомний стан.

4.3.5. Комбінаційні цифрові інтегральні пристрої (комбінаційні цифрові мікросхеми)

Комбінаційні цифрові пристрої реалізують різні перетворення двійкових цифрових сигналів на основі комбінаційних логічних функцій. Основними типами таких пристроїв є суматори, шифратори і дешифратори, перетворювачі кодів, схеми рівнозначності кодів, схеми порівняння двійкових чисел, порогові схеми і мажоритарні елементи, мультиплексори і демультимплексори.

Суматори. Повний суматор - це пристрій, призначений для підсумовування трьох однорозрядних двійкових чисел, з яких два однорозрядних двійкових числа є доданками і одне однорозрядне двійкове число - значення переносу доданків. Розглянемо операцію складання двох чисел, для прикладу, $X_1=0110$ і $x_2=1101$. Операція складання здійснюється від молодшого до старшого розряду порозрядно з врахуванням переповнення молодшого розряду:

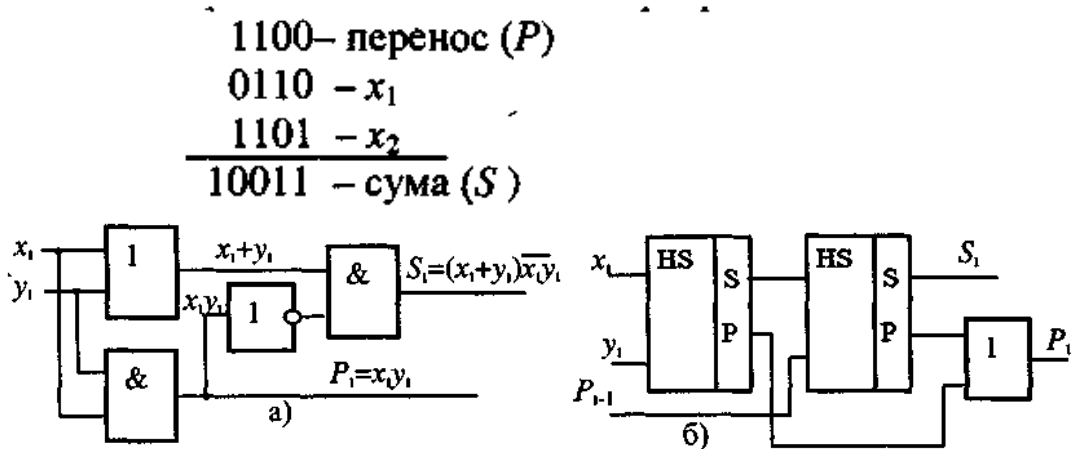
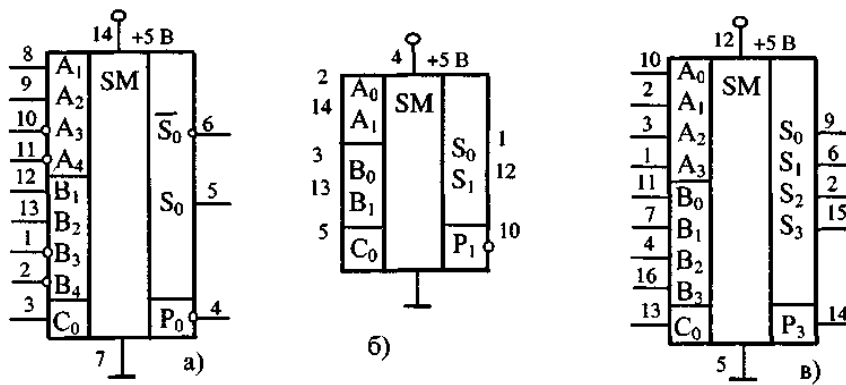


Рис. 4.33. Схеми суматорів двох однорозрядних двійкових чисел:
а — на логічних елементах; б-з використанням суматорів однорозрядних.

Півсуматор виконує операцію підсумовування двох однорозрядних двійкових чисел без врахування переносу з молодшого розряду.

Реалізацію суматора, що складається з логічних елементів, наведено на рис.4.33,а, повний однорозрядний суматор на двох півсуматорах - на рис. 4.33,б.



Для підсумовування n -розрядних чисел необхідно $n-1$ однорозрядних повних суматорів і один півсуматор у нульовому розряді.

Рис. 4.34. Суматори: а - K155ИМ1; б - K155ИМ2; в - K155ИМ3.

Промисловість виготовляє у вигляді мікросхем суматори: однорозрядні K155ИМ1 (ТТЛ); дворозрядні K155ИМ2 (ТТЛ); чотирирозрядні K155ИМ3 (ТТЛ), K555ИМ6 і K555ИМ7 (ДТТЛШ), K561ИМ1 (КМОП) та ін. На рис. 4.34 наведено умовне графічне позначення мікросхем одно-, дво- і чотирирозрядних суматорів. Входи А і В - входи однорозрядних двійкових чисел, вхід С - вибір кристала; Р - вихід переносу при підсумовуванні старших розрядів, S - виходи результатів підсумовування двох розрядів.

На основі суматорів можна формувати *порогові* схеми, коли необхідно аналізувати k сигналів із n входів, тобто коли k вхідних сигналів дорівнюють "1". Аналогічно можна формувати мажоритарні схеми, коли необхідно аналізувати "1" на входах $k = (n+1)/2$ або більше число вхідних сигналів рівних "1".

Перемножники. Комбінаційні суматори дякуючи високій швидкодії застосовують в різних пристроях обробки цифрової інформації. На їх основі будуються пристрої перемноження чисел. Для перемноження двох чисел А і В можна просто число А додати до самого себе В раз. Це можна виконати комбінаційними суматорами, але більш швидше і економічніше просте додавання замінити додаванням із зсувом. Як видно з прикладу, часткові добутки однозначно визначаються множенням і черговим бітом множника. Частковий i -й добуток або дорівнює множеному, якщо $V_i=1$, або дорівнює нулю, якщо $V_i=0$. кожен наступний частковий добуток зсунутий на один розряд по відношенню до попереднього. Остаточний добуток отримується послідовним додаванням часткових добутків. Функціональна схема, що реалізує даний алгоритм на основі повних комбінаційних суматорів, показана на рис. 4.35. Операнди повних суматорів A_i V_j отримують за допомогою 2-входових схем. І аналогічно $S_i = A_i V_i$.

Приклад.

$$\begin{array}{r}
 \times 1101 \text{ - множене} \\
 0101 \text{ - множник} \\
 \hline
 1101 \\
 0000 \\
 1101 \\
 0000 \\
 \hline
 1000001 \text{ - добуток}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{cccc}
 A_4 & A_3 & A_2 & A_1 \\
 \times & B_4 & B_3 & B_2 & B_1 \\
 \hline
 A_4B_1 & A_3B_1 & A_2B_1 & A_1B_1 \\
 A_4B_2 & A_3B_2 & A_2B_2 & A_1B_2 \\
 A_4B_3 & A_3B_3 & A_2B_3 & A_1B_3 \\
 A_4B_4 & A_3B_4 & A_2B_4 & A_1B_4 \\
 \hline
 S_8 & S_7 & S_6 & S_5 & S_4 & S_3 & S_2 & S_1
 \end{array}
 \end{array}$$

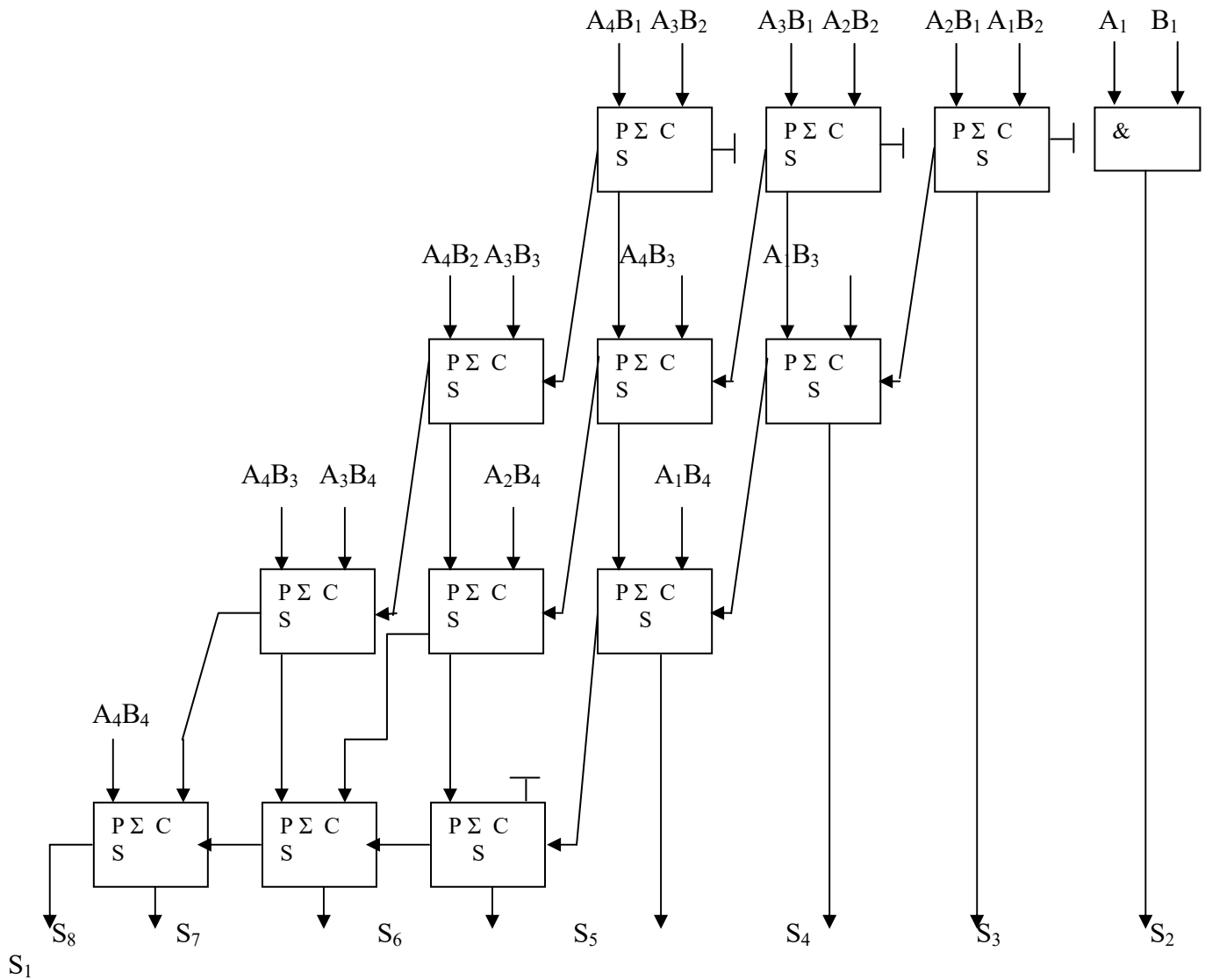


Рис. 4.35. Функціональна схема додавання із зсувом

Дешифратори (декодеру). Повним дешифратором називається комбінаційна схема, яка має n входів і 2^n виходів, що реалізують на кожному виході сигнал, який відповідає відповідній комбінації числа на вході, тобто кожній комбінації значень вхідних сигналів відповідає тільки один сигнал на виході. На рис. 4.35 наведено графічне позначення дешифратора. Функціонує дешифратор наступним чином. Якщо, для прикладу, на вхід мікросхеми К155ИДЗ подати двійкове число 0110, то на виводі № 14 буде сигнал.

Промисловість на сьогодні виготовляє низку спеціальних дешифраторів, які одночасно можуть керувати як індикаторами, так і аналоговим ключами.

Шифратори (кодеру) виконують функцію, зворотну дешифраторам, тобто перетворюють унітарний код у двійковий або двійково-десятковий. Якщо з вихідних шин знімається n -елементний код, то на вхід подається 2^n комбінацій у вигляді сигналів. Графічне зображення шифратора подано на рис. 4.36.

До комбінаційних елементів належать і перетворювачі кодів, які використовуються для дешифрації і шифрації цифрової інформації і перетворюють m -елементний код у n -елементний,

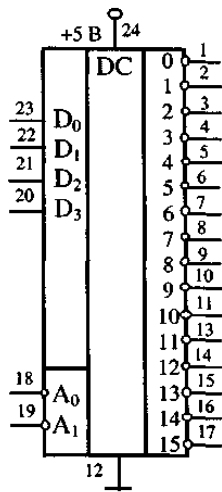


Рис. 4.35. Дешифратор K155ИД3

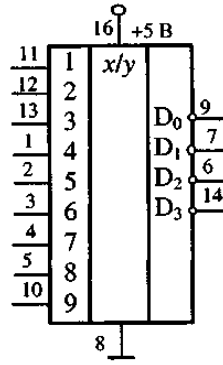


Рис. 4.36. Шифратор з пріоритетом K555ИВ3

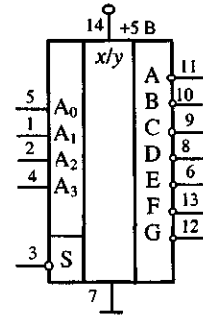


Рис. 4.37. Перетворювач коду K155ПП5

при цьому відношення між числами m і n може бути довільне. Графічне зображення перетворювача двійкового коду для 7-сегментного індикатора наведено на рис. 4.37.

Мультиплексори. Мультиплексором називають комбінаційну схему, яка має $n+2^n$ входів і один вихід, де n - число адресних входів, а 2^n - число інформаційних входів. Кожній адресі відповідає свій інформаційний вхід, сигнал якого при даній адресі і стробі проходить на вихід. Основним призначенням мультиплексора є комутація 2^n вхідних сигналів в один у вигляді послідовного коду.

Схема мультиплексора на 16 каналів зі стробуванням наведена на рис. 4.38. На входи D подається комбінація двійкового коду (дані у вигляді паралельного коду), послідовність передачі яких на вихід F задається адресою на входах A. Зміна адреси повинна відображатися у такт подачі стробуючого імпульсу на вхід SQ. Таким чином формується послідовний код інформації, яка надійшла на входи мікросхеми у вигляді паралельного коду.

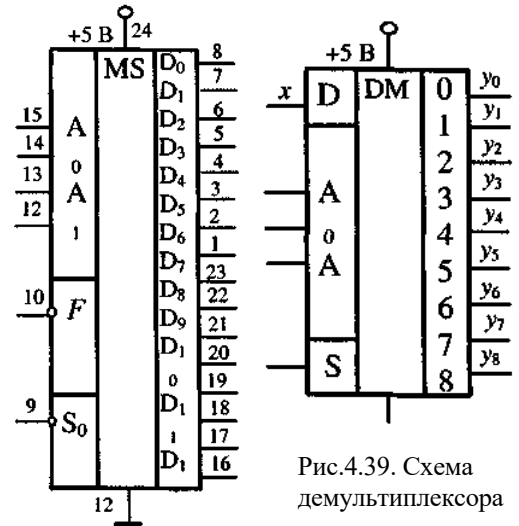


Рис.4.39. Схема демультимплексора

Рис.4.38. Мультиплексор

Демультимплексор. Демультимплексор (розподільувач) виконує функцію, протилежну функціям мультиплексора. У демультимплексора є один вхід і кілька виходів (рис. 4.39).

Принцип роботи демультимплексора аналогічний мультиплексору, тільки виконує функцію розподілення послідовного коду у паралельний відповідно до поданої адреси на входи A. Необхідна присутність стробуючого імпульсу на вході S, частота зміни адреси повинна відповідати частоті стробу.

Поєднання комбінаційних цифрових схем дозволяє розробляти системи розпізнавання об'єктів через присвоєння їм відповідного коду (числа), спростувати систему передачі і прийняття інформації по провідниках.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника / С. Г. Герман-Галкин // Лабораторные работы на ПК. – Спб. – 2002. – 304 с.
2. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка / В.І. Сенько, М.В. Панасенко, Є.В. Сенько // Т.4, кн.2: Силова електроніка. Підручник для ВНЗ (затв. МОН України). – Спб. – 2015. – 316 с.
3. Москатов Е. А. Силовая электроника. Теория і конструювання / Е. А. Москатов // КОРОНА-СТОЛІТТЯ. – 2015. – 256 с.
4. «Комп'ютери та комп'ютерні технології». Методичні вказівки до виконання курсових робіт студентами денної форми навчання ФМСГ. Напрямок підготовки 6.100101– „Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі”– Вінниця: РВВ ВНАУ, 2015. 58с.
5. Рубаненко О.О., Ковальчук О.С., Гурич А.Ю. Методичні вказівки для проведення лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електроніка і мікросхемотехніка» за спеціальністю 6.100101 «Енергетика і електротехнічні системи в агропромисловому комплексі» «Електроніка і мікросхемотехніка» та «Електроніка і мікропроцесорна техніка» за спеціальностями 6.050503 «Обладнання переробних та харчових виробництв» та 6.100102 «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» – Вінниця.: РВВ ВНАУ, 2015. – 69 с.
6. Аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Кудряшов Б. П., Назаров Ю. В., Тарабрин Б. В. и др.– М. : Радио и связь, 1985. –160 с.
7. Артамонов Б. И., Бокуняев А. А. Источники электропитания радиоустройств.– М. : Энергоиздат, 1982. –296 с.
8. Артамонов В. В. Маломощные выпрямители. Основы теории и расчет. – М.: Связь, 1970. –240 с.
9. Басовский В. Ф. Транзисторные преобразователи напряжения. –К.: Техніка, 1974. – 140 с.
10. Белополюский И. И., Репин А. М., Христианов А. С. Стабилизаторы низких и милливольтных напряжений.– М. : Энергия, 1974. –160 с.
11. Бочаров Л. Н., Жебрыков С. К., Колесников И. Ф. Расчет электронных устройств на транзисторах. – М. : Энергия, 1978. –208 с.
12. Векслер Г. С. Расчет электропитающих устройств. –К.: Техніка, 1978. – 208 с.
13. Векслер Г. С, Штильман В. И. Транзисторные сглаживающие фильтры. – К.: Техніка, 1972. –208 с.
14. Гурлев Д. С. Справочник по электронным приборам. –К.: Техніка, 1979.– 464 с.
15. Быстров Ю.А., Мироненко И.Г., Хижа Г.С. Электронные цепи и устройства. Учебник для вузов. С.-Пб.; Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 1999.-512 с.: ил.
16. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. М.: Радио и связь, 1991– 2 изд.(1 изд.– 1982 г.).
17. Куцевол О. М., Куцевол М. О. Електроніка та мікросхемотехніка. Виконання курсової роботи. Навчальний посібник. – Вінниця: ФОП Рогальська І.О., 2012. –224 с.
18. Нефедов А.В., Аксенов А.И. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры Микросхемы Часть 1 Справочник М Радио и связь, 1993 – 240 с ил – (Массовая радиобиблиотека Вып. 1193).
19. Как рассчитать радиатор. Корякин-Черняк С.Л. Электронный ресурс: <http://www.diagram.com.ua/list/elektriku/elektriku369.shtml>

Величко П.Г., Рубаненко О.О., Явдик В.В.

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКИ

*Навчально-методичний посібник для підготовки студентів освітнього ступеня «Бакалавр» з галузі знань 14
«Електрична інженерія» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка» –
Вінниця, видавничий центр ВНАУ: 2018р. – 151 с.*

Видання здійснюється в авторській редакції

Підписано до друку

Наклад 100 прим. Зам. №