

В. О. КОВАЛЬОВ, Р. В. ТЕЛЮТА, С.П. ПЛЄШКОВ.



***ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА
МІКРОСХЕМОТЕХНІКИ***

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Кропивницький 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

В. О. Ковальов, Р. В. Телюта, С.П. Плешков.

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКИ

Навчальний посібник
для студентів спеціальностей
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
151 «Автоматизовані та компютерно-інтегровані технології»

Кропивницький 2018

УДК 621.38 : 004.272.4 (07)

ББК 32.85 : 32.973.26 – 04

Затверджено Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету (протокол № 8 від 23.04.2018)

Затверджено цикловою комісією електротехнічних дисциплін Кропивницького коледжу механізації сільського господарства (протокол № 8 від 11.04.2018)

Рецензенти:

П.Г. Плешков, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Центральноукраїнського національного технічного університету;

С.І. Осадчий, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету.

КОВАЛЬОВ В.О., ТЕЛЮТА Р.В., ПЛЄШКОВ С.П. Основи електроніки та мікросхемотехніки: Навчальний посібник. – Кропивницький: РВЛ ЦНТУ, 2018. – 197 с.

У навчальному посібнику розглянуто фізичні основи електронних напівпровідникових приладів, побудову та конструктивно-технологічні особливості напівпровідникових активних елементів; фізичні процеси, які висвітлюють характеристики та параметри напівпровідникових активних та пасивних елементів; схемотехніку різноманітних підсилювальних каскадів, операційних підсилювачів та інші аналогові інтегральні структури; схемотехніку елементів логіки; приклади практичного застосування електронних елементів та пристроїв.

Посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 151 «Автоматизовані та комп'ютерно-інтегровані технології».

УДК 621.38 : 004.272.4 (07)

В. О. КОВАЛЬОВ, Р. В. ТЕЛЮТА, С. П. ПЛЄШКОВ.

© РВЛ ЦНТУ, 2018.

Зміст

Вступ.....	4
1. Фізичні основи електронних і напівпровідникових приладів.....	5
1.1. Основи електронної теорії.....	5
1.2. Електрофізичні властивості напівпровідників.....	9
1.3. Напівпровідникові резистори.....	15
2. Електронні і напівпровідникові прилади.....	24
2.1. Пасивні елементи електроніки.....	24
2.2. Напівпровідникові діоди.....	36
2.3. Перемикальні прилади.....	49
2.4. Біполярні транзистори.....	58
2.5. Польові транзистори.....	67
2.6. Інтегральні мікросхеми.....	74
2.7. Мікропроцесори.....	79
3. Основи аналогової електронної техніки.....	90
3.1. Підсилювачі електричних сигналів.....	90
3.2. Генератори синусоїдальних коливань.....	111
3.3. Пристрої для регулювання та перетворення електричної енергії.....	116
4. Імпульсні пристрої.....	133
4.1. Логічні елементи.....	141
4.2. Мультивібратори. Одновібратори.....	146
4.3. Тригери.....	152
4.4. Компаратори.....	158
Тестові завдання.....	161
Література.....	197

Вступ.

Електроніка – це галузь науки і техніки, що вивчає фізичні явища в напівпровідникових елементах, електричні характеристики та параметри напівпровідникових приладів, властивості пристроїв і систем, які побудовані на їх базі. Становлення електроніки як науки можна віднести до початку ХХ ст., коли було винайдено електронну лампу - діод (В. Флемінг, 1904 р.). В 50-х роках із винаходом напівпровідникового транзистора (У. Шоклі, У. Браттейн, Дж. Бардин, 1948 р.) розпочався етап напівпровідникової електроніки. Завдяки своїм перевагам порівняно з вакуумними приладами, транзистори зумовили бурхливий розвиток електроніки, що характеризувався малогабаритністю та відносно малим енергоспоживанням. Новий поштовх розвитку електроніки надали інтегральні схеми (мікросхеми), промисловий випуск яких розпочався у шістдесятих роках й особливо сприяв інформаційній електроніці. Це привело до створення надвеликих інтегральних схем, які стали основними компонентами мікропроцесорів і електронних обчислювальних машин (ЕОМ). Використання інтегральних схем дало змогу збільшити надійність систем, зменшити їх габарити та споживану енергію. Електронні елементи сучасних електронних пристроїв виготовляються промисловістю двох видів: у вигляді окремих дискретних компонентів (діодів, транзисторів, тиристорів та ін.); у вигляді мікросхем (інтегральних схем), в яких з одному корпусі в один функціональний вузол об'єднано ряд окремих елементів, виконаних, як правило, на одному кристалі напівпровідника.

Дисципліна розглядає: фізичні основи, будову, принцип дії, характеристики, параметри та область застосування напівпровідникових приладів; побудову, принцип дії, параметри, характеристики та область застосування електронних пристроїв на базі напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем: підсилювачів електричних сигналів, підсилювачів постійного струму, генераторів гармонійних коливань, імпульсних пристроїв, перетворювальних пристроїв.

1. Фізичні основи електронних і напівпровідникових приладів.

1.1 Основи електронної теорії.

Фізичні властивості напівпровідників. Всі речовини за своїми електричними властивостями розділяють на провідники, напівпровідники та діелектрики. Електричні властивості речовин та матеріалів обумовлені будовою їх атомів та енергетичних властивостей атомів. Електрони атомів, що знаходяться на зовнішній оболонці називаються валентними електронами. Вони обумовлюють активність речовин, тобто приймають участь в хімічних зв'язках атомів. Зв'язки атомів можуть змінюватися під дією температури, світла, електричних та магнітних полів. Під зовнішньою дією електрони отримавши енергію звільняються від всерединіатомних зв'язків - покидають зовнішню орбіту (стають вільними) і можуть приймати участь у зв'язках з іншими атомами. Чим більше вільних електронів має речовина, тим вища її електропровідність. Втрачаючи або отримуючи електрони, нейтральний атом становиться позитивно чи негативно зарядженим іоном. Електрони що під зовнішньою дією втратили енергію переходять на більш низький енергетичний рівень – ближче до ядра. В провідниках необхідно витратити незначну енергію для переходу електронів з валентної енергетичної зони в зону провідності. Для діелектриків необхідно затратити значну енергію (не менше 3 eV). Електропровідність напівпровідників нестійка і в значній мірі залежить від таких зовнішніх чинників як температура, світло, електричні та магнітні поля. Атоми речовин і матеріалів, що мають на зовнішній оболонці до 8 електронів, мають властивість об'єднуватися зі своїми сусідами. Коли на зовнішній оболонці атома знаходиться менше 4 електронів атом віддає свої електрони сусідам. Так ведуть себе провідники (метали). Саме ця властивість характеризує їх електропровідність. Коли на зовнішній оболонці знаходиться більше 4 електронів, атом відмовляється відпускати їх від себе. Таку будову мають діелектрики. До напівпровідників відносять речовини і матеріали, атоми яких на зовнішній оболонці мають 4 електрони. При певних умовах вони можуть віддавати свої електрони чи приєднувати до себе.

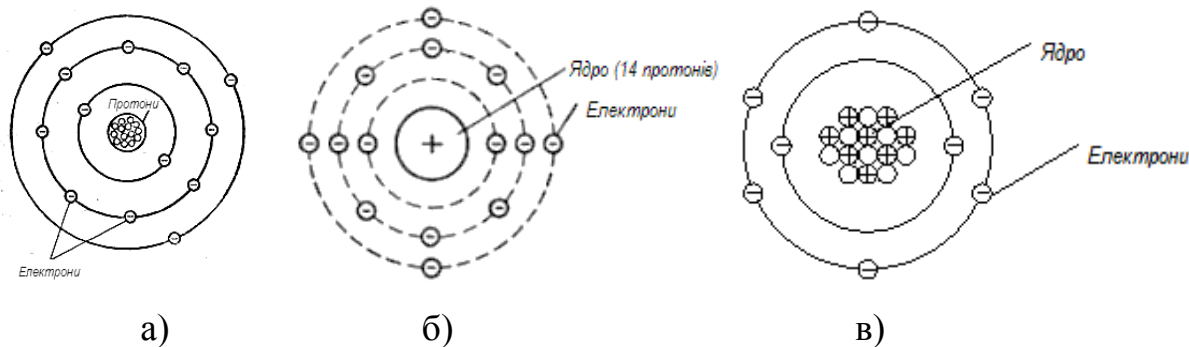
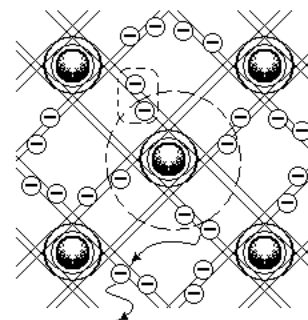


Рисунок 1.1. Атоми: а – алюмінію; б – кремнію; в – кисню.

Напівпровідники займають за електропровідністю проміжне положення між металами (провідниками електричного струму) і діелектриками. Питомий електричний опір провідників складає $\rho = 10^{-4}$ Ом · см, напівпровідників – $\rho = 10^{-4} \dots 10^{10}$ Ом · см, діелектриків – $\rho = 10^{10}$ Ом · см і вище.

Для виготовлення напівпровідникових приладів в даний час використовують крім германію і кремнію деякі хімічні сполуки, наприклад арсенід галію, окисел титану, антимонід індію, фосфід індію та ін. Найчастіше застосовують кремній і германій. Германій і кремній – елементи четвертої групи періодичної системи Д.І. Менделєєва, тобто є чотиривалентними елементами.

Атоми цих елементів утворюють кристал у формі тетраедра (трикутна піраміда). Завдяки цьому ядра всіх елементів знаходяться на однаковій малій відстані один від одного, утворюючи нерухомі вузли кристалічної решітки. Кожний з чотирьох валентних електронів знаходиться під впливом одного з чотирьох сусідніх ядер і обертається по орбіті, що охоплює своє і сусіднє ядро.



Носії електричного заряду в напівпровідниках. Чисті напівпровідники при нулі абсолютної температури ($T = -273^\circ\text{C}$) є ідеальними діелектриками. Проте в нормальних умовах, при кімнатній температурі, деякі валентні електрони кристалічної решітки отримують енергію, достатню для розриву ковалентного зв'язку. Внаслідок розриву одного парноелектронного зв'язку утворюються два носії заряду: електрон і дірка. Незаповнений електронний зв'язок в кристалічній решітці напівпровідника називається діркою. Дірка має позитивний заряд, по абсолютній величині рівний

заряду електрона, і, отже, є носієм позитивного заряду. Наявність носіїв зарядів в напівпровіднику пояснює його провідність.

Власна і домішкова провідність напівпровідників. Провідність чистого напівпровідника, яка обумовлена електронами і дірками, що виникають тільки в результаті розриву парноелектронних зв'язків, називається власною провідністю.

За відсутності зовнішнього електричного поля електрони і дірки переміщуються в об'ємі напівпровідника хаотично. Якщо ж до напівпровідника прикласти напругу, то в ньому виникає впорядкований рух електронів в одному напрямку і дірок в іншому – протилежному напрямку. Через напівпровідник протікає струм, який рівний сумі струмів електронного I_n і дірчастого I_p , тобто

$$I = I_n + I_p.$$

Струм, що протікає в напівпровіднику при рівноважній концентрації носіїв зарядів (електронів і дірок), називається дрейфовим струмом. Щільність дрейфового струму визначає питому електропровідність напівпровідників σ . Так, для германію питома електропровідність

$$\sigma_{Ge} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1},$$

а для кремнію

$$\sigma_{Si} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1},$$

тобто $\sigma_{Ge} \gg \sigma_{Si}$.

З підвищенням температури питома електропровідність збільшується по експоненціальному закону. Напівпровідник без домішок називають власним напівпровідником. Він характеризується власною електропровідністю, яка, як було показано, складається з електронної і дірчастої електропровідності.

Якщо в напівпровіднику є домішки інших речовин, то додатково до власної електропровідності з'являється ще домішкова електропровідність, яка залежно від роду домішки може бути електронною або дірчастою. Для отримання напівпровідника з електронною електропровідністю в чистий напівпровідник – германій або кремній – вводять невелику кількість елементу п'ятої групи періодичної системи елементів: сурми (Sb), миш'яку (As), фосфору (P). Їх атоми взаємодіють з атомами германію тільки чотирма своїми електронами утворюючи міцні парноелектронні зв'язки з чотирма сусідніми атомами германію. П'ятий валентний електрон, наприклад атома

миш'яку, в утворенні парноелектронного зв'язку не бере участь. Тому він виявляється слабо зв'язаним зі своїм атомом і може бути легко відірваний від нього. В результаті він перетворюється на вільний електрон, який може вільно переміщатися в об'ємі напівпровідника, створюючи електронну провідність (рисунок 1.2). Атом миш'яку, що втратив один електрон, перетворюється на позитивний іон, який виявляється нерухомим, оскільки він міцно утримується у вузлі кристалічної решітки парноелектронними зв'язками. Рухомі носії зарядів, концентрація яких в даному напівпровіднику переважає, називаються основними носіями зарядів. Напівпровідник, в якому основними носіями зарядів є електрони, називається електронним напівпровідником або напівпровідником n-типу.

Для отримання напівпровідника з дірчастою електропровідністю в кристал чистого германію вводять домішки тривалентних елементів: індій (In) і галій (Ga) для германію; бір (B) і алюміній (Al) для кремнію. При цьому три валентні електрони, наприклад індію, утворюють три парноелектронні зв'язки з сусідніми атомами германію. В результаті теплового руху електрон одного з сусідніх атомів германію може перейти в незаповнений зв'язок атома індію. В атомі германію з'явиться один незаповнений зв'язок – дірка (рисунок 1.3). Захоплений атомом індію, четвертий електрон утворює парноелектронний зв'язок і міцно утримується атомом індію. Атом індію стає при цьому нерухомим негативним іоном.

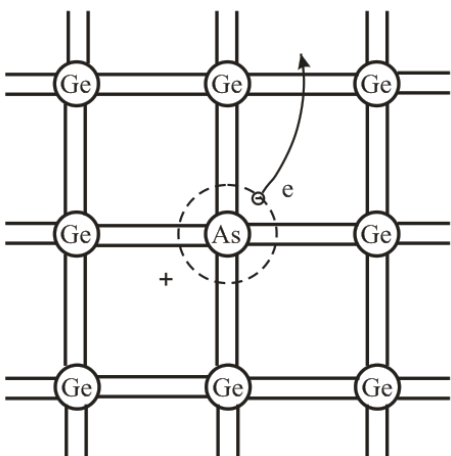


Рисунок 1.2 Виникнення вільного електрона в кристалі напівпровідника n-типу.

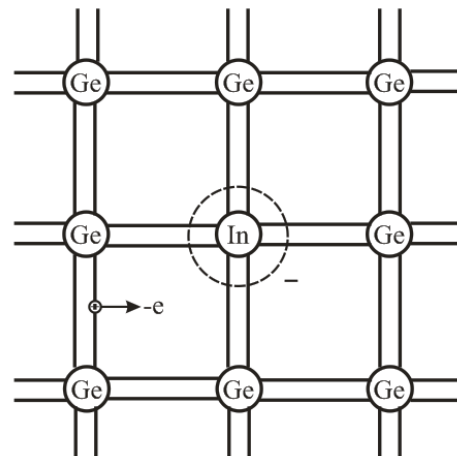


Рисунок 1.3 Виникнення дірки в кристалі напівпровідника p-типу.

Домішки, які створюють в напівпровіднику надлишок дірок називають акцепторними або акцепторами. Провідність, яка обумовлена наявністю в напівпровіднику надлишку рухомих дірок, тобто перевищенням їх концентрації над концентрацією електронів, називається дірчастою провідністю або провідністю р-типу.

Електричний струм в напівпровіднику може бути викликаний двома причинами: дією зовнішнього електричного поля; нерівномірним розподілом концентрації носіїв зарядів за об'ємом напівпровідника. Нерівномірність концентрації зарядів в якій-небудь частині напівпровідника може виникнути під дією світла, тепла електричного поля і ін.

Контрольні питання

1. Чим обумовлена провідність матеріалів?
2. Які основні електричні властивості напівпровідників?
3. Власна провідність напівпровідників.
4. Домішкова провідність напівпровідників.

1.2 Електрофізичні властивості напівпровідників.

В реальних напівпровідникових приладах використовують напівпровідники різної провідності та контактні метали зокрема для підведення струму. З'єднання контакт-напівпровідник в дискретних елементах переважно виконують методом наплавлення, напилення, а в інтегральних мікросхемах методом фотолітографії. Залежно від вибору матеріалів, що контактують, контакт метал-напівпровідник матиме випрямляючі чи омічні властивості.

Омічний контакт метал - напівпровідник - це контакт, в якого залежність струму від прикладеної напруги підпорядковується закону Ома. Ця залежність має лінійний характер і однакова як за умови прямого, так і зворотного поля. Коли до контакту, наприклад, до металу прикладено «-», до напівпровідника «+», електрони з металу проходять в напівпровідник. Якщо врахувати, що електрон рухається у вигляді хвилі і його енергія набуває суворо визначені значення. Він може проникати крізь дуже

високий і тонкий бар'єр без зміни енергії. Цей ефект називається тунельним (електрони пробиваються як через тунель). При цьому будемо мати майже лінійну залежність струму від прикладеної напруги. У випадку зворотного поля електрони в напівпровіднику, перебуваючи ніби над потенціальним бар'єром, скочуватимуться у метал без перешкод і вольт-амперна характеристика також буде лінійною. Для створення омичних виводів метал має бути електронейтральним - ні донором (віддає електрони), ні акцептором (захоплює електрони). У разі, коли важко підібрати електронейтральний метал, то можна до напівпровідника n -типу підібрати метал-донор, а до напівпровідника p -типу - метал-акцептор. Омичні контакти використовують для створення виводів до напівпровідникових елементів і мікросхем.

Випрямний контакт метал - напівпровідник. Якщо треба створити випрямляючий контакт до напівпровідника n -типу, метал має бути акцептором відносно даного напівпровідника. У випадку напівпровідника p -типу метал повинен бути донором. За такої умови матимемо надійний випрямляючий контакт. Підбір матеріалів проводять з урахуванням фізичних процесів, що відбуваються на контакті, а також, щоб забезпечити надійне з'єднання цих матеріалів, тобто надійний в процесі експлуатації приладу контакт.

В місці з'єднання випрямного контакт метал - напівпровідник створюється контактне електричне поле. Воно обумовлене виходом вільних електронів з напівпровідника і утворенні в зоні контактного шару з нерухомими позитивними іонами. Цей шар проникає вглибину напівпровідника, утворюючи так званий запірний шар, адже напрям струму, що створений контактним електричним полем протилежний напрямку переміщення основних носіїв. Саме наявність запірного шару на контакті метал - напівпровідник і визначає його властивості.

При прикладанні прямої зовнішньої напруги U (для напівпровідника n -типу), створене нею електричне поле діє у напрямі, протилежному внутрішньому контактному полю (рис. 1.4, а). Зовнішнє поле призведе до зменшення контактного поля і звузиться ділянка запірного шару. Зі збільшенням прикладеної напруги потенціал контакту й опір запірного шару зменшуватимуться, а струм I через контакт збільшуватиметься - така характеристика називається прямою вольт-амперною характеристикою (ВАХ), а прикладена напруга - прямою.

Якщо напрям зовнішнього поля співпадає з напрямом контактного поля (рис. 1.4, б), контактна різниця потенціалів збільшується, а також збільшується ширина запінного шару. При цьому збільшується опір проходження струму і через контакт проходить невеликий струм, який дістав назву зворотного струму, а прикладена напруга - зворотної напруги.

Контакт, який має такі властивості, називається випрямляючим. Такі контакти використовують для створення деяких випрямляючих діодів і діодів Шотткі.

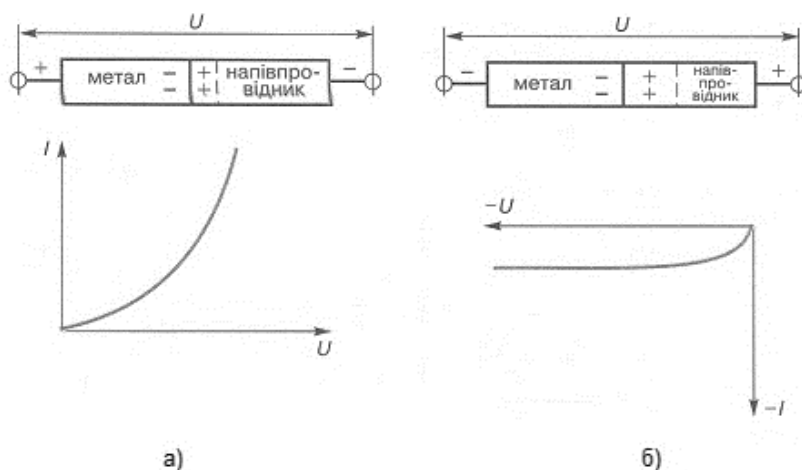


Рисунок 1.4 Випрямний контакт метал-напівпровідник та ВАХ: а - при прямій напрузі; б - при зворотній напрузі.

Електронно-дірковий перехід при відсутності зовнішньої напруги. Область на межі розділу двох напівпровідників з різними типами електропровідності називається електронно - дірковим переходом або р-n-переходом. У напівпровіднику р-типу основними носіями є дірки (позначаються знаком «+»), неосновними носіями - електрони, які позначаються «-» (рис. 1.5). У напівпровіднику n-типу, навпаки, основні носії - це електрони, неосновні – дірки.

При відсутності зовнішньої напруги в напівпровіднику з домішками здійснюють хаотичний тепловий рух та відбувається дифузія носіїв з одного напівпровідника в іншій з метою досягнення рівноваги. З напівпровідника n-типу в напівпровідник р-типу дифундують електрони, а у зворотному напрямку з напівпровідника р-типу в напівпровідник n-типу дифундують дірки. В результаті дифузії носіїв виникає дифузійний струм.

В контактному шарі напівпровідників зі сторони р-напівпровідника відбудеться рекомбінація дірок і утворяться нерухомі негативні іони, а у n- шарі відбудеться збіднення електронів і утворяться позитивні нерухомі іони. При цьому виникає контактна різниця потенціалів та протікає дрейфовий струм. Так як струм дифузії і струм дрейфу через р-n-перехід протікають назустріч один одному то вони взаємно компенсуються. Сумарний струм через р-n-перехід рівний нулю. Контактний шар має потенційний бар'єр, що створює підвищений опір проходженню основних носіїв і називається запираючим шаром. Товщина його декілька мікрон.

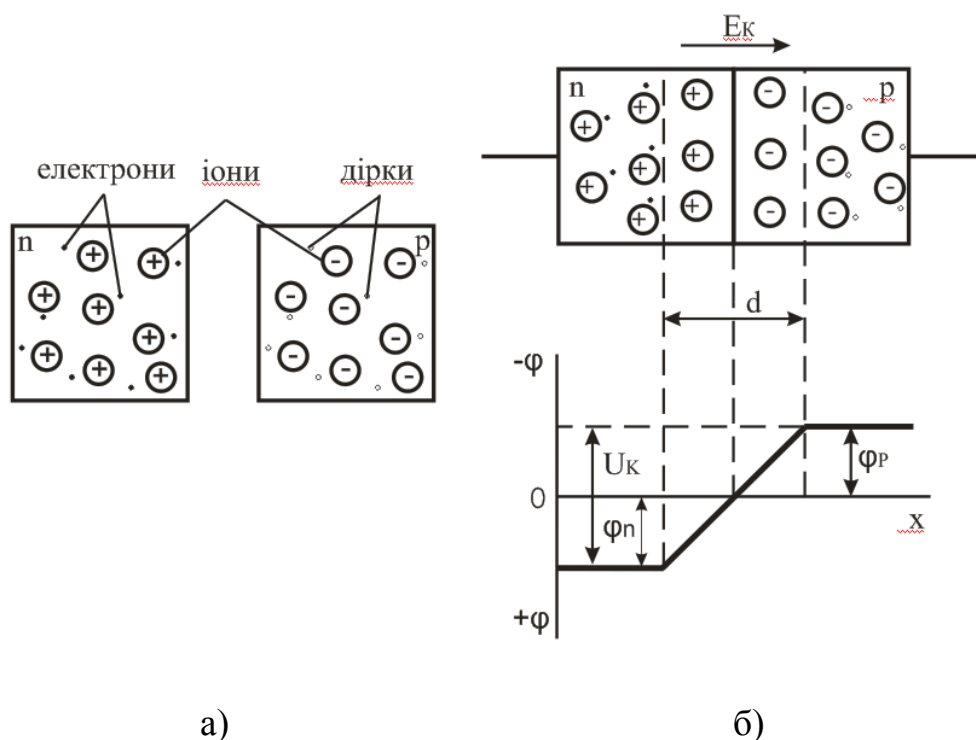


Рисунок 1.5. Електронно-дірковий перехід при відсутності зовнішньої напруги.

Електронно-дірковий перехід при наявності зовнішньої прямої напруги. При прикладанні зовнішньої $U_{пр}$ прямої напруги (рисунок 1.6) до р-n-переходу плюсом до р-області р-n-переходу, а мінусом до n-області зовнішнє електричне поле буде більшим ніж контактне електричне поле E_k . Так як вони направлені назустріч одне одному, то величина потенційного бар'єру знижується на величину зовнішньої напруги і зменшується товщина запираючого шару. Отже опір запираючого шару в прямому напрямку струму стає малим. Основну величину прямого струму складатиме дифузійний струм. Струм, що протікає через р-n-перехід під дією прикладеної до

нього прямої зовнішньої напруги, називається прямим струмом (направлений з р-області в n-область). Введення носіїв зарядів через р-n-перехід при дії прямої зовнішньої напруги в область напівпровідника, де ці носії є неосновними, називається інжекцією.

Під дією зворотної напруги (рисунок 1.7) $U_{ЗВ}$ (зовнішня напруга, яка прикладена “+“ джерела живлення до n-області р-n-переходу, а “-“ до р-області) через р-n-перехід протікає дуже невеликий зворотний струм $I_{ЗВ}$. Це пояснюється наступним: поле, що створюється зворотною напругою $E_{ЗВ}$, складається з полем контактної різниці потенціалів E_K . В результаті цього потенційний бар'єр підвищується, а товщина самого запираючого шару збільшується. Цей шар ще сильніше обідняється носіями, і його опір значно зростає.

Виведення неосновних носіїв через р-n-перехід електричним полем, яке створене зворотною напругою, називають екстракцією носіїв зарядів. Таким чином, р-n-перехід пропускає струм в одному напрямку – прямому, і не пропускає струм в іншому напрямку – зворотному, що визначає вентильні властивості р-n-переходу.

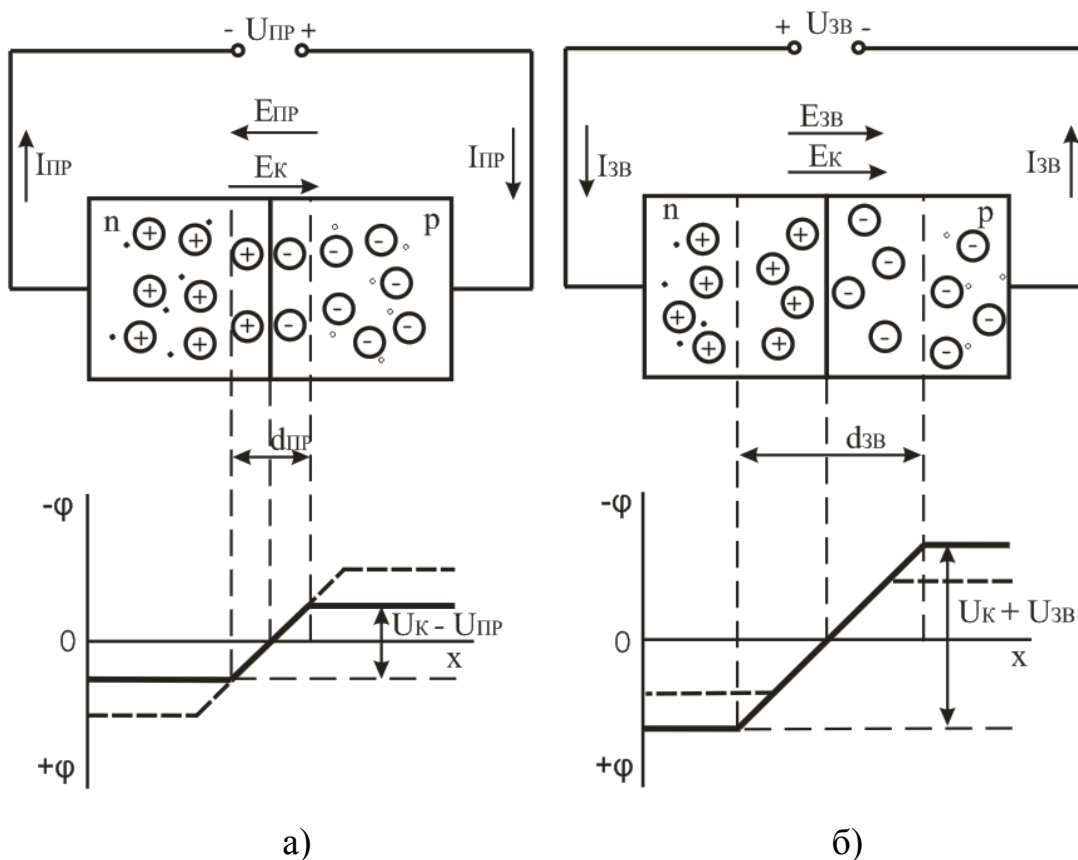


Рисунок 1.6. Електронно-дірковий перехід при наявності зовнішньої: а - прямої напруги; б - зворотної напруги.

Вольт-амперною характеристикою (рисунк 1.7) р-п-переходу називається залежність струму, що протікає через р-п-перехід від прикладеної зовнішньої напруги $I = f(U)$. Пряму і зворотну гілку ВАХ зображають в різному масштабі, оскільки в нормальному режимі роботи р-п-переходу зворотний струм на декілька порядків менше прямого.

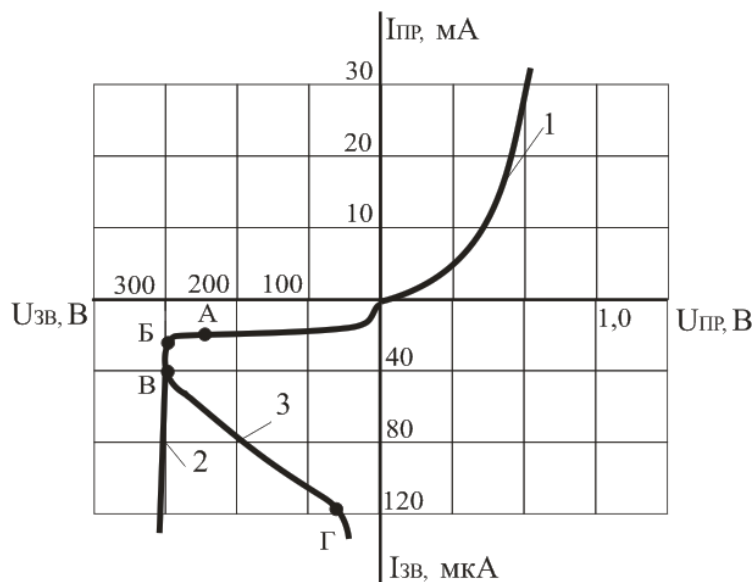


Рисунок 1.7. Вольт-амперна характеристика р-п-переходу: 1 – пряма гілка; 2 – зворотна гілка при лавинному пробії; 3 – зворотна гілка при тепловому пробії

При досягненні зворотною напругою деякої критичної величини $U_{проб}$ відбувається різке зменшення опору р-п-переходу. Це явище називається пробоем р-п-переходу, а відповідна йому напруга – напругою пробією. Розрізняють електричний і тепловий пробій. Електричний пробій є оборотним, тобто при цьому пробії в переході не відбувається необоротних змін (руйнування структури речовини). Тепловий пробій необоротний, оскільки він супроводжується руйнуванням структури речовини в місці р-п-переходу. Причиною теплового пробією є порушення стійкості теплового режиму р-п-переходу.

Запираючий шар р-п-переходу має високий опір і відіграє роль діелектрика, а по обидві його сторони розташовані два різнойменні об'ємні заряди, що створені іонізованими атомами донорної і акцепторної домішки. Тому р-п-перехід має ємність. Цю ємність називають бар'єрною.


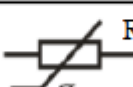
Контрольні запитання

1. Які властивості має і чому, контакт метал - напівпровідник?
2. Як впливає запірний шар на вольт-амперну характеристику контакту?
3. Механізм створення $p-n$ переходу.
4. Чому на контакті двох напівпровідників різного типу електропровідності відбувається процес дифузії носіїв заряду?
5. Чим визначається висота потенціального бар'єру на межі контакту двох напівпровідників?
6. Як зміниться питомий опір $p-n$ -переходу, якщо подати на нього зовнішню напругу в прямому і зворотному напрямках?
7. ВАХ $p-n$ переходу.

1.3 Напівпровідникові резистори.

Класифікація та умовне позначення напівпровідникових резисторів.

Таблиця 1. Умовні позначення напівпровідникових резисторів

Тип резисторів	Умовне позначення
Лінійні резистори	
Варистори	
Терморезистори: Термістори, позистори	
Тензорезистори	
Фоторезистори	

Перші дві групи напівпровідникових резисторів відповідно до цієї класифікації – лінійні резистори і варистори – мають електричні характеристики, слабо залежні від

зовнішніх чинників: температури навколишнього середовища, вібрації, вологості, освітленості та ін.

Для решти груп напівпровідникових резисторів, навпаки, характерна сильна залежність їх електричних характеристик від зовнішніх чинників. Так, характеристики терморезисторів істотно залежать від температури, характеристики тензорезисторів – від механічної напруги, фоторезистори - від освітленості.

Лінійний резистор - напівпровідниковий елемент, в якому звичайно використовується **слаболегований** кремній або арсенід галію. Питомий опір такого напівпровідника мало залежить від напруженості електричного поля і густини електричного струму. Тому опір лінійного резистора практично сталий в широкому діапазоні зміни напруги і струмів. Лінійні резистори знайшли широке застосування в інтегральних мікросхемах.

Варистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги і, який має нелінійну симетричну вольт-амперну характеристику (ВАХ). Варистори виготовляють методом керамічної технології, тобто шляхом високотемпературного випалення заготовки з порошкоподібного карбїду кремнію SiC з пов'язуючою речовиною, у якості якої використовують глину. Зовні варистори оформляються у вигляді стрижнів або дисків. Нелінійність вольт-амперної характеристики варисторів (рисунок 1.8) обумовлена явищами на точкових контактах між кристалами карбїду кремнію: збільшення в сильних електричних полях провідності поверхневих потенційних бар'єрів (при малій нарузі) і збільшення провідності точкових контактів між кристалами із-за розігрівання у зв'язку з потужністю, що виділяється на контактах (при великій нарузі на варисторі).

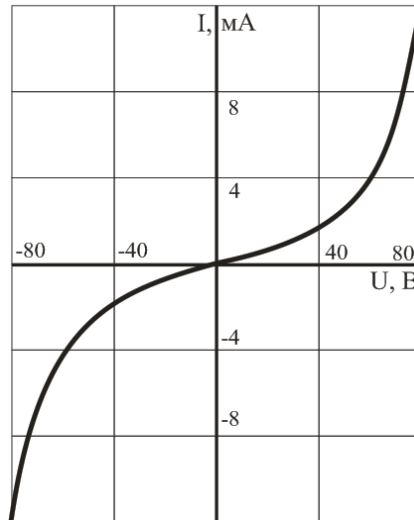


Рисунок 1.8 Вольт-амперна характеристика варистора.

Основні параметри варисторів:

- коефіцієнт нелінійності λ , який визначається відношенням опору постійному струму (статичного) R до опору змінному струму (диференціальному) r :

$$\lambda = \frac{R}{r} = \frac{U/I}{dU/dI},$$

де U і I – напруга і струм варистора. Для різних типів варисторів $\lambda = 2 - 6$;

- максимальна допустима напруга $U_{\text{МАХ доп}}$ (від десятків вольт до декількох кіловольт);
- номінальна потужність розсіювання $P_{\text{НОМ}}$ ($P_{\text{НОМ}} = 1 - 3$ Вт);
- температурний коефіцієнт опору ТКО (ТКО в середньому $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$); Величина ТКО характеризує відносну зміну опору резистора при зміні температури на 1К.
- гранична максимальна робоча температура $t_{\text{Р МАХ}}$ ($t_{\text{Р МАХ}} = 60 - 70$ °С).

В практиці використовується властивість варисторів до значного зменшення загального опору при зростанні напруги і відповідно до зростання струму, що проходять через варистор. Вони використовуються для захисту від перенапруг в колах на постійному і змінному струмі з частотою до декількох кілогерц. (рис.1.9), в стабілізаторах і обмежувачах напруги в різних схемах автоматики.

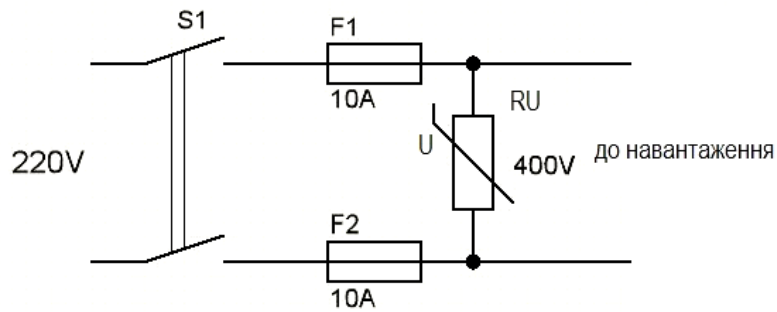


Рисунок 1.9. Принципова електрична схема включення варистора в електроприладах для захисту від перенапруг.

При перенапрузі струм протікає через F1 – RU – F2, що призводить до перегорання одного з запобіжників. При тривалому імпульсі значного струму відбувається перегрів та перегорання варистора.

Терморезистори – це напівпровідникові резистори, в яких використовується залежність електричного опору напівпровідника від температури. Розрізняють два типи терморезисторів: термістор, опір якого із зростанням температури падає (з негативним температурним коефіцієнтом опору ТКО), і позистор, у якого опір з підвищенням температури зростає (з позитивним ТКО).

У термісторах опір змінюється або під впливом тепла, що виділяється в них при проходженні електричного струму, або в результаті зміни температури навколишнього середовища в якому знаходиться терморезистор. Зменшення опору напівпровідника із збільшенням температури може бути обумовлене наступними причинами – збільшенням концентрації носіїв заряду і збільшенням їх рухливості. Основна частина термісторів, що випускаються промисловістю, виготовлена з полікристалічних окисних напівпровідників – з оксидів металів. Конструктивно термістори оформляють у вигляді: циліндрів, стрижнів, дисків, пластин або намистин і отримують методами керамічної технології, тобто шляхом випалення заготовок при високій температурі.

Матеріалом для виготовлення позисторів служить титан-барієва кераміка з домішкою рідкоземельних елементів. Такий матеріал має аномальну температурну залежність: у вузькому діапазоні температур його питомий опір збільшується на

декілька порядків із збільшенням температури. Конструктивно позистор оформляють аналогічно термісторам.

Основні параметри терморезисторів:

- номінальний опір – опір при певній температурі (зазвичай 20 °С) (від декількох Ом до декількох кОм з допустимим відхиленням від номінального опору ± 5 , ± 10 і ± 20 %);
- температурний коефіцієнт опору терморезистора ТКО – показує відносну зміну опору терморезистора при зміні температури на один градус. Температурний коефіцієнт опору залежить від температури, тому його записують з індексом, який вказує температуру, при якій має місце дане значення. Значення ТКО при кімнатній температурі різних термісторів знаходиться в межах $(0,8 - 6) \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$:

$$TKO|_T = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

- максимально допустима температура t_{MAX} – це температура, при якій ще не відбувається необоротних змін параметрів і характеристик терморезистора;
- допустима потужність розсіювання $P_{\text{MAX доп}}$ – це потужність, при якій терморезистор, що знаходиться в спокійному повітрі при температурі 20 °С, розігрівається при проходженні струму до максимально допустимої температури;
- постійна часу терморезистора τ_T – це час, протягом якого температура терморезистора зменшується в e разів по відношенню до різниці температур терморезистора і навколишнього середовища (наприклад, при перенесенні терморезистора з повітряного середовища з $t = 120$ °С в повітряне середовище з $t = 20$ °С). Для різних типів термісторів постійна часу τ_T лежить в межах від 0,5 до 140 с. Теплова інерційність терморезистора, що характеризується його постійною часу, визначається конструкцією і розмірами, і залежить від теплопровідності середовища, в якому знаходиться терморезистор. Температурна характеристика терморезистора $R = f(t)$ – це залежність його опору від температури (рисунок 1.10).

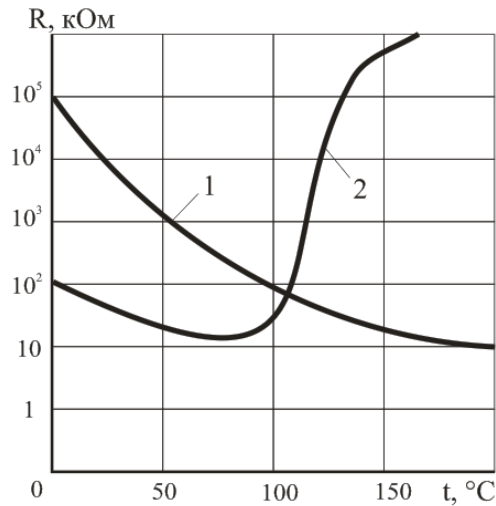


Рисунок 1.10. Температурні характеристики терморезисторів: 1 – термістор; 2 – позистор.

Терморезистори (термістори) застосовують для температурної стабілізації режиму транзисторних підсилювачів, а також в різних пристроях вимірювання, контролю і автоматики (вимірювання контролю і автоматичного регулювання температури, температурної і пожежної сигналізації і ін.). Позистори переважно використовуються в пристроях температурного захисту (електродвигунів), як датчики температури перегріву та в пристроях включення пускової обмотки однофазних електродвигунів з короткозамкненим ротором.

Тензорезистор – це напівпровідниковий резистор, в якому використовується залежність електричного опору від механічної деформації. Призначення тензорезисторів – вимірювання тиску і деформацій. Принцип дії напівпровідникового тензорезистора заснований на тензорезистивному ефекті – на зміні електричного опору напівпровідника під дією механічних деформацій.

Для виготовлення тензорезисторів найчастіше використовують кремній з електропровідністю n- і p-типів. Заготівки такого кремнію ріжуть на дрібні пластинки, шліфують, наносять контакти і приєднують виводи. Деформаційна характеристика тензорезистора (рисунок 1.11) – це залежність відносної зміни опору тензорезистора від відносної деформації.

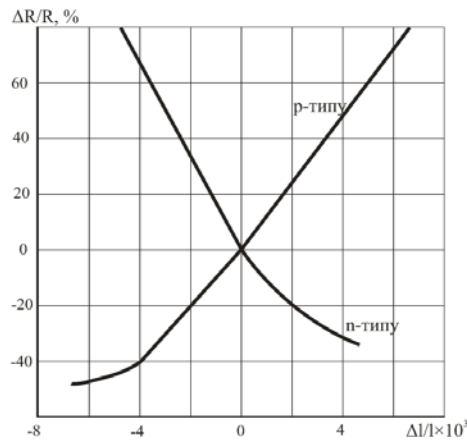


Рисунок 1.11. Деформаційні характеристики тензорезисторів з кремнію з електропровідністю р- та n-типів.

Основні параметри тензорезисторів:

- номінальний опір тензорезистора – це опір без деформації при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зазвичай має величину від декількох десятків до декількох тисяч Ом);
- коефіцієнт тензочутливості K – відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини тензорезистора. Для різних тензорезисторів K лежить в межах від -100 до $+200$;

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

- гранична деформація тензорезистора.

Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від освітленості. Основною частиною конструкції фоторезистора є напівпровідниковий фоточутливий шар напівпровідника 2 (рисунок 1.12, а), у якості якого використовують сульфід кадмію, селенід кадмію або сульфід свинцю. Пластинка або плівка напівпровідникового матеріалу 2 нанесена на діелектричну підкладку 1 зі скла або кераміки. На поверхню фоточутливого шару наносять металеві електроди 3.

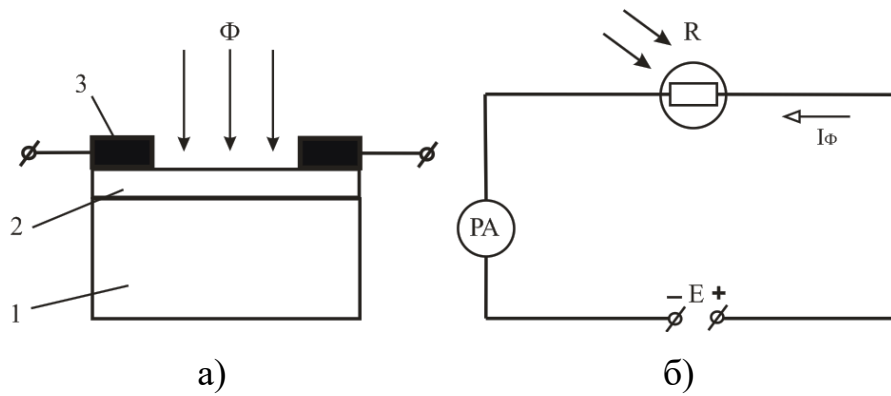


Рисунок 1.12. Фоторезистор: а – будова; б – схема увімкнення

Схема увімкнення фоторезистора наведена на рисунку 1.12,б. Полярність джерела живлення не грає ролі. Якщо до неосвітленого фоторезистора підключити джерело живлення E (рисунок 1.12, б), то в електричному колі з'явиться невеликий струм, який називають темновим струмом. Цей струм обумовлений наявністю в неосвітленому напівпровіднику деякої кількості вільних носіїв заряду.

При освітленні фоторезистора в ньому відбувається збільшення концентрації вільних носіїв заряду і його опір зменшується; струм у колі зростає. Різниця струмів при наявності та відсутності освітлення називається фотострумом, величина якого залежить від інтенсивності освітлення, величини прикладеної напруги, а також виду та розмірів напівпровідника, що використовується у фоторезисторі.

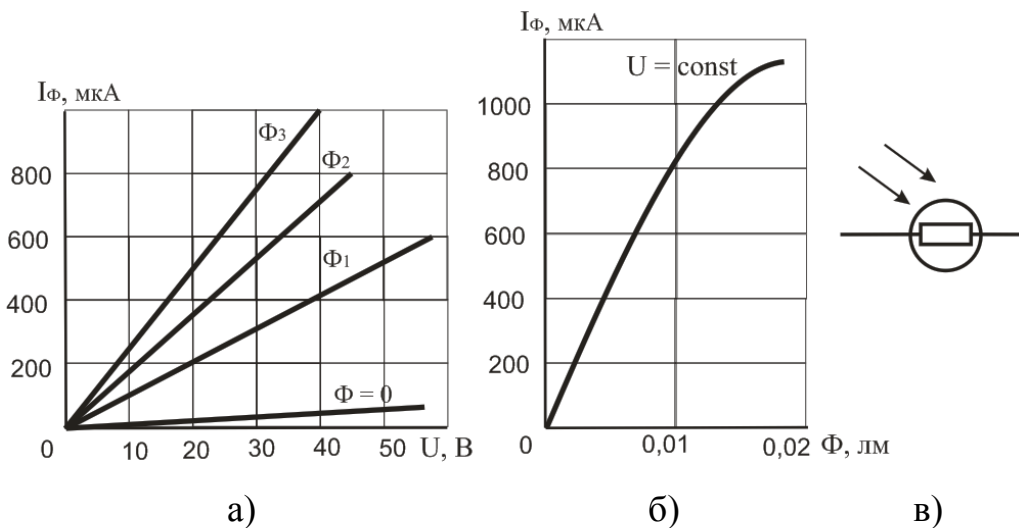


Рисунок 1.13. Характеристики фоторезисторів: а – вольт-амперна $I=f(U)$ при $\Phi=\text{const}$; б – світлова $I=f(\Phi)$ при $U=\text{const}$; в – умовне позначення.

Основні параметри фоторезисторів:

- темновий опір R_T – це опір фоторезистора при відсутності освітлення; ($R = 10^4 \dots 10^{10} \text{ Ом}$);
- питома інтегральна чутливість K_0 – це відношення фотоструму до світлового потоку і до прикладеної напруги: $K_0 = I_{\Phi}/(\Phi \cdot U)$. Для фоторезисторів вона досягає $5000 \text{ мкА/лм} \cdot \text{В}$;
- максимальна допустима робоча напруга $U_{P \text{ MAX}}$; ($U_{P \text{ MAX}} \leq 600 \text{ В}$).

Основна галузь застосування фоторезисторів – це схеми автоматики керування процесами у функції рівня освітленості.

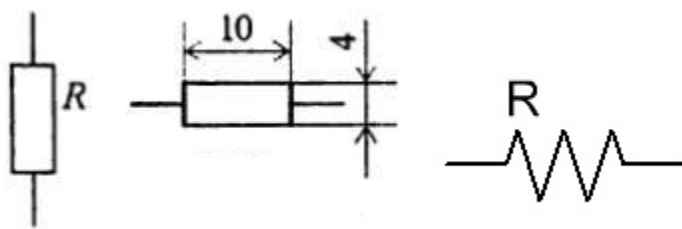
Контрольні запитання

1. Як класифікують напівпровідникові резистори?
2. Поясніть основні властивості напівпровідникових резисторів. Наведіть їх умовні позначення.
3. Дайте визначення варистора. Поясніть принцип дії, наведіть вольт- амперну характеристику та основні параметри варисторів.
4. Дайте визначення терморезистора. Поясніть принцип дії, наведіть температурну характеристику та основні параметри терморезисторів.
5. Дайте визначення тензорезистор. Поясніть принцип дії, наведіть деформаційну характеристику та основні параметри тензорезисторів.
6. Наведіть визначення фоторезистора. Поясніть будову і принцип дії, наведіть характеристики і умовні позначення.

2. Електронні і напівпровідникові прилади.

2.1 Пасивні елементи електроніки.

Резистор - це елемент електричного кола, який має власний опір. Практично ні одна електрична схема не обходиться без цих елементів. Найбільш широке розповсюдження здобули резистори постійного опору, рідше змінні резистори (опір яких може регулюватися рухомим контактом).

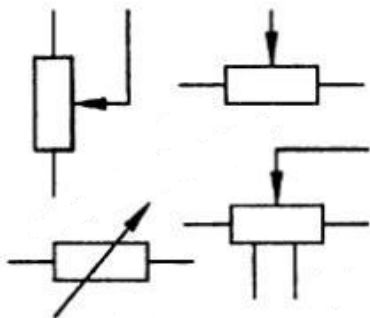


а)

б)



в)



г)



д)

Рисунок 2.1. Резистори: а) постійний резистор (умовне позначення); б) постійний резистор на схемах імпорتنних приладів; в) постійні резистори (зовнішній вигляд); г) змінний резистор (умовне позначення); д) змінні резистори (зовнішній вигляд).

В залежності від виду резистивного елемента резистори поділяються на дротові та бездротові. Дротові резистори виготовляють з високоомного дроту (манганін, константан, ніхром), що намотаний на діелектричний каркас. Бездротові резистори виготовляють з високоомного матеріалу (метал, оксидні з'єднання) шляхом його напилення на ізоляційну основу (керамічний стержень, на кінцях якого закріпленні вивідні контакти).

Основними характеристиками резистора є номінальний опір, номінальна потужність розсіювання (найбільша потужність, яку резистор може тривалий час витримувати і розсіювати у вигляді тепла), відхилення дійсного опору від номінального.

Маркування потужності можна визначити за розміром елемента. На схемах в середині умовного графічного позначення вказують символічне позначення потужності (рисунок 2.2). На резисторах типу МЛТ, потужність вказувалася, починаючи від одного вата: МЛТ-1 МЛТ-2 і МЛТ-3 відповідно.

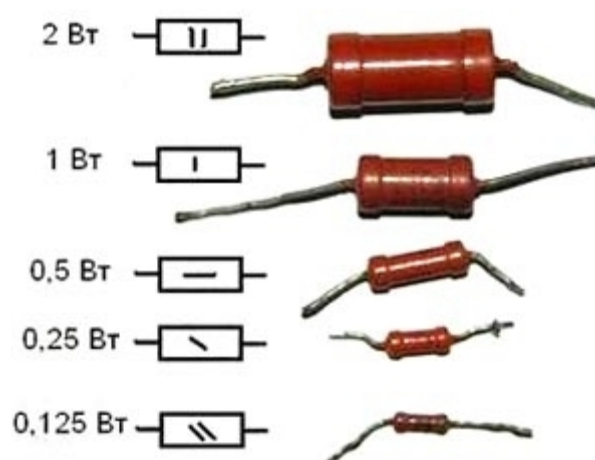


Рисунок 2.2. Маркування потужності резистора.

Опис маркування значення номінального опору буває трьох видів.

Перший - це цифрове маркування резисторів. Він використовується тільки для елементів, номінал яких менш 999 Ом. Наприклад, такий запис номінального опору буде мати наступний вигляд: 15; 150; 200. При цьому за замовчуванням прийнято, що номінал записаний в омах.

Другий вид - символний (цифрово-буквенна) кодування. При цьому виді маркування виключається такий символ, як кома. Замість неї використовують букви латинського алфавіту R(E), K, M. В тому випадку, коли при записі номінального опору використовується літера R (E), необхідно помножити число на 1; якщо K - то помножити на 1000; якщо літера M - то необхідно помножити на 1000000. Наприклад, номінальний опір 150R - означає 150Ом; 5K6 -означає 5600Ом; 1M5 - означає 1500 кОм.

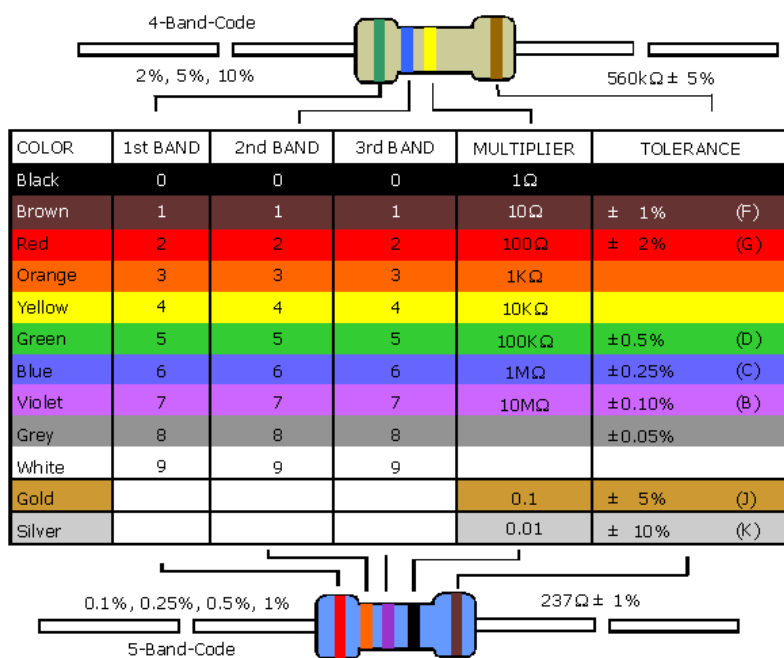


Рисунок 2.3. Кольорове маркування номіналу опорів резисторів.

Кольорове маркування резисторів Для декодування такого виду позначень необхідно визначити початок відліку. В сучасних елементах остання смуга буває або золотистого або сріблястого кольорів. Ця смуга означає точність резистора (5% або 10%), якщо маркування складається з трьох смуг, точність таких елементів складає 20%. У всіх типах колірного коду 1 і 2 смуги - це значення елемента. Коли штрихування складається з 3-4 смуг, то третя позначає число, на яке потрібно помножити номінальне значення. Якщо кодова штрихування резисторів містить 5 смуг, то третя теж відноситься до номіналу, а четверта означає множник, п'ята смуга -

точність. Якщо кодування складається з шести смуг, то остання - це надійність елемента або температурний коефіцієнт.

Маркування SMD (прилади, що монтуються на поверхню плати) резисторів ділиться на три типи: з 3 цифр, з 4 цифрами та з 3 символами. У першому випадку перші 2 цифри позначають номінал елемента у Ом, а остання - кількість нулів. Наведемо приклад: цифри на опорі 102 будуть означати 1000 Ом. У другому типі перші 3 цифри вказують номінал елемента в Ом, остання - кількість нулів. Код на резисторі 5602 означає 56000 Ом (56кОм). Третій вид запису означає: перші 2 цифри - це номінал Ом, який взято з кодової таблиці, а останній символ - множник: $S=10^{-2}$; $R=10^{-1}$; $V=10$; $C=10^2$; $D=10^3$; $E=10^4$; $F=10^5$.



Рисунок 2.4. SMD резистор.

Конденсатори - елемент з двох чи більше електродів (обкладок), які розділені діелектриком, товщина якого менша у порівнянні з розміром обкладок. Така система має взаємну електричну ємність і здатна зберігати електричний заряд. Конденсатор є пасивним електронним компонентом і широко застосовується в електронних схемах для блокування постійного струму, пропускаючи змінний струм. Конденсаторам знаходиться використання практично у всіх галузях електротехніки. Конденсатори використовуються як фільтри при перетворенні змінного струму на постійний. При з'єднанні конденсатора з котушкою індуктивності утворюється коливальний контур, який використовується у пристроях прийому-передачі. За допомогою конденсаторів можна отримувати імпульси великої потужності, наприклад, у фотоспалахах. Оскільки конденсатор здатний довгий час зберігати заряд, то його можна використовувати як елемент пам'яті. Цей принцип використовує динамічна оперативна пам'ять.

Основна класифікація конденсаторів проводиться за типом діелектрика в конденсаторі. Тип діелектрика визначає основні електричні параметри конденсаторів:

опір ізоляції, стабільність ємності, величину втрат тощо. За видом діелектрика розрізняють:

- вакуумні конденсатори (обкладки без діелектрика знаходяться у вакуумі);
- конденсатори з газоподібним діелектриком;
- конденсатори з рідким діелектриком;
- конденсатори з твердим неорганічним діелектриком: скляні, слюдяні, керамічні, тонкошарові із неорганічних плівок (K10, K15, K26, K32,);
- конденсатори з твердим органічним діелектриком: паперові, металопаперові, плівкові, комбіновані (K41, K42, K71, K72);
- електролітичні та оксидо-напівпровідникові конденсатори. Як діелектрик використовується шар оксиду металу. Наприклад для конденсаторів оксидо-алюмінієвих (K50) це Al_2O_3 , а для оксидо-танталових (K51) — Ta_2O_5 . Однією обкладинкою слугує металева фольга (анод), а друга (катод) — це або електроліт (у електролітичних конденсаторах) або шар напівпровідника (у оксидо-напівпровідникових), нанесений безпосередньо на оксидний шар. Анод виготовляється, в залежності від типу конденсатора, з алюмінієвої, ніобієвої чи танталової фольги. Такі конденсатори відрізняються від інших типів перш за все своєю великою питомою ємністю, але здатні працювати при відносно низьких напругах і мають значні діелектричні втрати.

Крім того, конденсатори розрізняються за можливістю зміни своєї ємності:

- постійні конденсатори — основний клас конденсаторів, який має сталу ємність (окрім як зменшення з часом використання);
- змінні конденсатори — конденсатори, які дозволяють зміни ємності в процесі функціонування апаратури. Керування ємністю може відбуватися механічно, електричною напругою (варіконди) та температурою (термоконденсатори). Використовуються, наприклад, у радіоприймачах для налаштування частоти резонансного контуру.
- конденсатори підлаштування — конденсатори, ємність яких змінюється при разовому чи періодичному регулюванні і не змінюється в процесі функціонування апаратури. Їх використовують для підлаштування та

вирівнювання початкових ємностей сполучених контурів, для періодичного підлаштування та регулювання ланцюгів схем, де потрібна незначна зміна ємності.

В залежності від призначення конденсатори можна умовно розділити на конденсатори загального та спеціального призначення. Конденсатори загального призначення використовуються практично у більшості видів і класів апаратури. Традиційно до них відносять найбільш розповсюджені низьковольтні конденсатори, до яких не висуваються особливі вимоги. Решта конденсаторів є спеціальними. До них відносяться високовольтні, імпульсні, дозиметричні, пускові та інші конденсатори.

За способом монтажу конденсатори поділяються на елементи навісного монтажу і поверхневого (друкованого), а також для використання у складі мікросхем та мікромодулів. Виводи конденсаторів для навісного монтажу можуть бути жорсткими або м'якими, аксіальними або радіальними з дроту чи стрічки, у вигляді пелюсток, кабельного вводу, шпильок чи опорних гвинтів. У більшості конденсаторів одна з обкладок сполучається з корпусом, який служить другим виводом.

Основною характеристикою конденсатора є його електрична ємність (точніше номінальна ємність), яка визначає накопичений заряд. Типові значення ємності конденсаторів складають від одиниць пікофарад до сотень мікрофарад. Але існують конденсатори з ємністю десятків фарад. Для отримання великих ємностей конденсатори з'єднують паралельно. Загальна ємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі ємностей всіх конденсаторів, які входять у батарею.

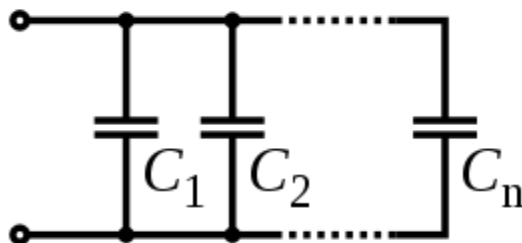


Рисунок 2.5. Паралельне з'єднання конденсаторів.

При послідовному з'єднанні конденсаторів заряди усіх конденсаторів однакові. Загальна ємність батареї послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

Ця ємність завжди менша мінімальної ємності конденсатора, який входить в батарею. Але при послідовному з'єднанні зменшується загроза пробією конденсаторів, оскільки на кожний конденсатор надходить лише частина різниці потенціалів джерела напруги.

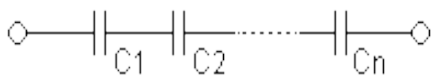


Рисунок 2.6. Послідовне з'єднання конденсаторів.

Як бачите, послідовне і паралельне з'єднання конденсаторів є повною протилежністю послідовного і паралельного з'єднання резисторів. Якщо послідовне з'єднання резисторів збільшує загальний опір, то послідовне з'єднання конденсаторів навпаки, зменшує загальну ємність. Якщо паралельне з'єднання резисторів зменшує загальний опір, то паралельне з'єднання конденсаторів навпаки, збільшує загальну ємність.

Іншою не менш важливою характеристикою конденсаторів є номінальна напруга - значення електричної напруги, при якому він може працювати у заданих умовах під час строку служби із зберіганням параметрів у допустимих межах. Номінальна напруга залежить від конструкції конденсатора і властивостей застосованих матеріалів. При експлуатації напруга на конденсаторі не повинна перевищувати допустимої. Для більшості типів конденсаторів із збільшенням температури допустима напруга знижується. Напругу, при якій впродовж 1-5 с виникає пробій, називають пробивною. Допустиму робочу напругу обирають у 3-10 разів меншою за пробивну.

Умовні графічні позначення конденсаторів на електричних схемах повинні відповідати ГОСТ 2.728-74 (таблиця 2.1) або міжнародному стандарту IEEE 315-1975. Літерне позначення конденсаторів на електричних схемах відповідно ГОСТ 2.710-81

складається з латинської літери «С» і порядкового номера елемента (цифрове позначення), починаючи з одиниці, в межах групи елементів, наприклад: С1, С2...Сп.

Номинальні значення ємностей стандартизовані. Міжнародною електротехнічною комісією (ІЕС) для ємностей встановлено 7 рядів переважних чисел серії Е: Е3, Е6, Е12, Е24, рідше Е48, Е96, Е192. Номинальну ємність вказують у вигляді конкретного значення, вираженого у пікофарадах (пФ) або мікрофарадах (мФ) (1 мкФ = 10⁶ пФ). При ємності до 0,01 мкФ, вона вказується у пікофарадах, при цьому можна не вказувати одиницю вимірювання (пФ). При зазначенні номіналу ємності в інших одиницях вказують одиницю вимірювання. Фактичне значення ємності може відрізнятись від номінального на величину відхилення.

Для електrolітичних конденсаторів, а також для високовольтних конденсаторів на схемах, після вказання номіналу ємності, вказують їх максимальну робочу напругу у вольтах (В) чи кіловольтах (кВ). Наприклад: «10 мкФ х 10 В».

Таблиця 2.1. Умовні графічні позначення конденсаторів.

Позначення за ГОСТ 2.728-74	Опис
	Конденсатор сталої ємності
	Поляризований конденсатор
	Поляризований електrolітичний конденсатор
	Підлаштувальний конденсатор змінної ємності
	Конденсатор змінної ємності

Маркування конденсаторів може бути літерно-цифровим, яке включає умовне позначення (тип) конденсатора, номінальну напругу, ємність, відхилення ємності, групу ТКЄ (температурний коефіцієнт ємності, який характеризує залежність ємності конденсатора від температури), місяць та рік виготовлення.

Кодоване значення ємності містить 3-4 знаки. Літера коду позначає десяткову крапку. Номінальну ємність 0...999пФ виражають в пікофарадах з позначенням літерою «р» (наприклад, 150р); від 1000 до 999999 пФ - в нанофарадах з позначенням літерою «п» (наприклад, n150); від 1 до 999 мкФ - в мікрофарадах з позначенням літерою «μ» (наприклад, 1μ5); від 1000 до 999999 мкФ - в міліфарадах з позначенням літерою «т» (наприклад, т100); більше цього значення - у фарадах з позначенням літерою «F».

Після значення номінальної ємності конденсатора вказується кодова літера відхилення ємності, за нею - кодова літера групи ТКЄ. Так, 33рKL означає, що конденсатор має ємність 33 пФ з допуском $\pm 10\%$ та температурною нестабільністю $-75 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Далі може бути вказана кодова літера номінальної напруги.



Рисунок 2.7. Зовнішній вигляд різних типів конденсаторів.

Трансформатори та котушки індуктивності. В електронних пристроях використовують переважно однофазні трансформатори малої потужності. Трансформатор - статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну

або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму. Найбільше розповсюдження здобули мережеві трансформатори живлення, узгоджувальні трансформатори, а також імпульсні трансформатори.

Для живлення різних вузлів електроприладів потрібні найрізноманітніші напруги. В основі блоків електроживлення у пристроях, які потребують кілька напруг різної величини, використовуються мережевий трансформатор живлення з декількома вторинними обмотками. Трансформатори на 50-60Гц є однією з найважчих деталей багатьох приладів. Розмір трансформатора можна зменшити, якщо збільшити частоту змінного струму. Тому сучасні імпульсні блоки живлення при однаковій потужності є значно легшими. У схемах живлення сучасних радіотехнічних та електронних пристроїв широко застосовуються високочастотні імпульсні трансформатори. В імпульсних блоках живлення змінну напругу мережі спершу випрямляють, а потім за допомогою інвертора перетворюють на високочастотні імпульси. Система управління за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) дозволяє стабілізувати напругу. Після чого імпульси високої частоти подаються на імпульсний трансформатор, на виході з якого, після випрямлення і фільтрації отримують стабільну постійну напругу. Незважаючи на свої недоліки мережевий трансформатор живлення на 50-60 Гц, продовжують використовувати в схемах живлення, в тих випадках, коли необхідно забезпечити мінімальний рівень високочастотних перешкод, наприклад при високоякісному звуковідтворенні.

Узгоджувальний трансформатор призначений для вмикання між двома колами з різними імпедансами з метою оптимізації потужності сигналу, що пересилається. Одночасно узгоджувальний трансформатор забезпечує створення гальванічної розв'язки між ділянками схем. Узгоджувальні трансформатори за особливостями використання поділяють на вхідні, вихідні та проміжні.

Більш детальна інформація про трансформатори розглядається у курсі "Електричні машини і апарати".

До числа елементів, без яких неможливо побудувати радіоприймач, телевізор, та багато інших радіоприладів, відносяться котушки індуктивності і дроселі. Котушка індуктивності - елемент електричного кола, що являє собою сукупність витків,

призначений для використання його індуктивності. Котушка індуктивності має вигляд звернутого у спіраль ізольованого дроту, що має значну індуктивність при відносно великій електричній провідності та малому активному опорі. Дріт може намотуватись на каркас з діелектрика циліндричної, тороїдальної або прямокутної форми. Котушки призначені для перетворення енергії змінного електричного поля в енергію змінного магнітного поля і навпаки, створення реактивного індуктивного опору змінному струму. За використанням котушки поділяють на: контурні, зв'язку і дроселі. Перші використовують у коливальних контурах, другі – для зв'язку електричних кіл, треті - для розділення постійного та змінного струмів. За характером зміни індуктивності котушки бувають постійної індуктивності, підстроювальні, зі змінною індуктивністю (варіометри), які відрізняються від підстроювальних ширшим діапазоном зміни номіналу.

Для збільшення індуктивності котушка здебільшого намотується на феромагнітне осердя з електротехнічної сталі, пермалою, карбонільного заліза, феритів. Котушку без осердя називають соленоїдом. Осердя використовують також для зміни індуктивності резонансних контурів в невеликих межах. Спеціальні котушки, що використовуються в певних електричних колах, називають дроселями. До основних параметрів котушок індуктивності належать: номінальне значення індуктивності, допустиме відхилення індуктивності, максимальний струм котушки, опір втрат, номінальна добротність, температурний коефіцієнт індуктивності (TKL), власна ємність, робочий діапазон температур. Їх найважливішою характеристикою є індуктивність. У колах змінного струму котушки і дроселі поведуться як резистори, опір яких зростає із збільшенням частоти. Оскільки котушки працюють на високих частотах і призначені переважно для створення в електричних колах реактивного індуктивного опору змінному струмові, забезпечення між ними електромагнітного зв'язку, високої вибіркової коливальних контурів, то для них основними є частотні характеристики, які виражають залежності їх реактивного та активного опорів, а також опору втрат у власній ємності та добротності від частоти. Реактивний опір котушки змінному струмові прямопропорційно збільшується зі збільшенням частоти струму. Індуктивність вимірюють у генрі (Гн), мілігенрі ($1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$), мікрогенрі ($1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$) і наногенрі ($1 \text{ нГн} = 10^{-9} \text{ Гн}$). Індуктивність котушок, що використовуються

в коливальних контурах радіомовних приймачів, залежно від діапазону частот становить від часток і одиниць мікрогенрі (УКВ і КВ) до декількох мілігенрі (ДВ).

У радіоприймальної і радіопередавальній апаратурі нерідко застосовують котушки з регульованою індуктивністю, які є основним органом налаштування коливального контуру в широкому діапазоні частот. Частина витків такої котушки намотують на каркасі більшого діаметру, а іншу частину – на каркасі меншого діаметру. Малу котушку поміщають всередину великої і закріплюють на валу, вісь якого перпендикулярна осі великої котушки, а виводи обмоток з'єднують послідовно. При повороті валика взаємний вплив котушок змінюється, а в результаті змінюється і індуктивність. Такі пристрої отримали назву варіометрів. Умовні зображення і позначення котушок на схемах наведено на рисунку 2.8.

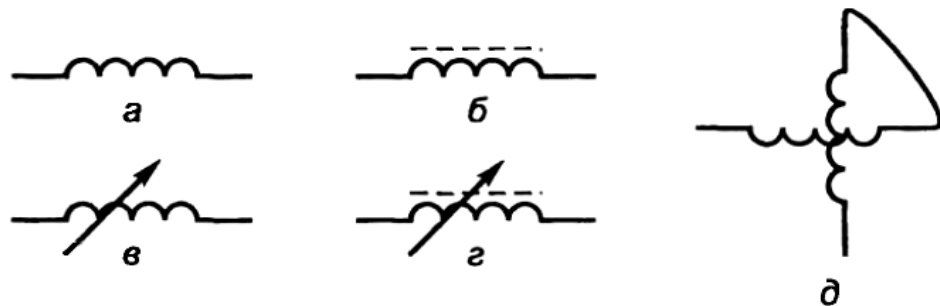


Рисунок 2.8. Умовні зображення котушок на схемах: а, б - котушки за відсутності та наявності магнітодіелектричного осердя; в, г - підстроювальні котушки; д – варіометр.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення резистора, призначення.
2. Основні параметри резисторів, умовне позначення, маркування.
3. Дайте визначення конденсатора, їх класифікація, призначення.
4. Основні параметри конденсаторів, умовне позначення та маркування.
5. Дайте визначення трансформаторів, їх класифікація, призначення, основні параметри.
6. Дайте визначення котушок індуктивності, призначення, основні параметри.

2.2 Напівпровідникові діоди.

Напівпровідниковий діод – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом і двома виводами, в якому використовуються властивості р-n-переходу.

Напівпровідникові діоди класифікуються:

- за призначенням: випрямні, високочастотні імпульсні, стабілітрони, варикапи, фотодіоди, світлодіоди та ін.;
- за конструктивно – технологічними особливостями: площинні і точкові;
- за типом вихідного матеріалу: германієві, кремнієві, арсеніде-галієві та ін.

У точковому діоді, що побудований за технологією метал-напівпровідник використовується пластинка германію або кремнію з електропровідністю n-типу (рисунок 2.9), завтовшки 0,1...0,6 мм і площею 0,5...1,5 мм²; з пластинкою стикається загострена проволока (голка) з нанесеною на неї акцепторною домішкою. При цьому з голки в основний напівпровідник дифундують домішки, які створюють р-область. Таким чином, біля голки утворюється мініатюрний р-n-перехід напівсферичної форми.

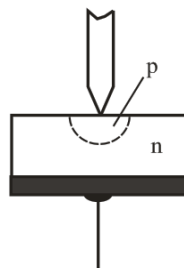


Рисунок 2.9. Будова точкових діодів.

У площинних діодах р-n-перехід утворюється двома напівпровідниками з різними типами електропровідності, причому площа переходу у різних типів діодів лежить в межах від сотих долей квадратного міліметра до декількох десятків квадратних сантиметрів (силові діоди). Площинні діоди виготовляються методами сплаву (вплавлення) або дифузії (рисунок 2.10).

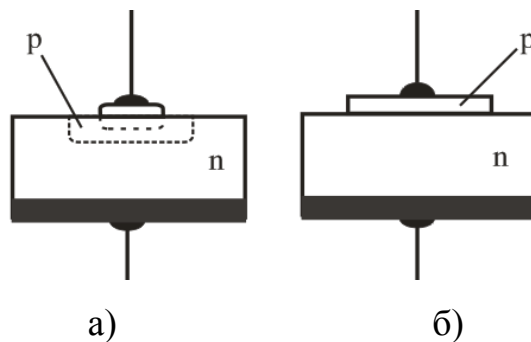


Рисунок 2.10. Будова площинних діодів: а - виготовлений сплавним методом;
б - виготовлений дифузійним методом

Випрямний діод – це напівпровідниковий діод, який призначений для перетворення змінного струму в постійний. Випрямні діоди виконуються на основі р-п-переходу і мають дві області. У основі роботи випрямних діодів лежить властивість односторонньої провідності р-п-переходу, яке полягає в тому, що останній добре проводить прямий струм (має малий опір) і практично не проводить зворотній струм (має дуже високий опір). Це пояснюється тим, що прямий струм діода створюється основними, а зворотний – неосновними носіями заряду. Концентрація основних носіїв заряду на декілька порядків перевищує концентрацію неосновних носіїв, чим і обумовлюються вентильні властивості діода.

Основні параметри випрямних напівпровідникових діодів:

- прямий струм діода $I_{\text{пр}}$, який нормується при певній прямій напрузі;
- максимально допустимий прямий струм $I_{\text{пр max}}$ діода;
- максимально допустима зворотна напруга діода $U_{\text{зв max}}$, при якій діод ще може нормально працювати тривалий час;
- постійний зворотний струм $I_{\text{зв}}$, що протікає через діод при зворотній напрузі, рівній $U_{\text{зв max}}$;
- середній випрямлений струм $I_{\text{в.сеп}}$, який може тривало проходити через діод при допустимій температурі його нагріву;
- максимально допустима потужність P_{max} , що розсіюється діодом, при якій забезпечується задана надійність діода.

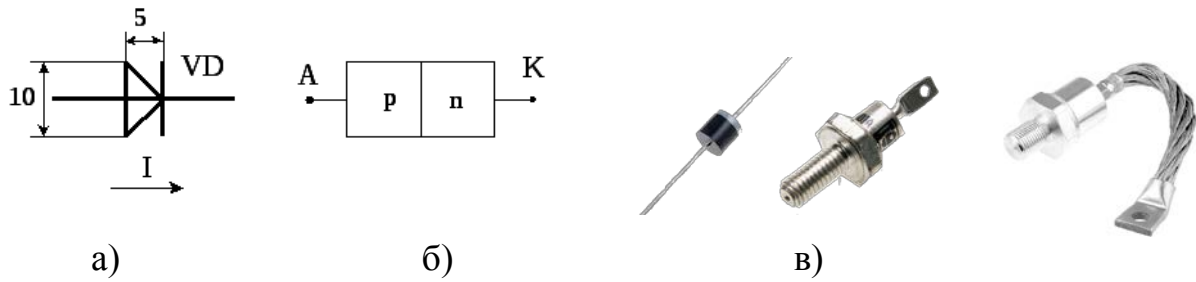


Рисунок 2.11. Випрямний діод: а - умовне графічне та літерне позначення; б - структура р-п-переходу; в - зовнішній вигляд.

Для збереження працездатності германієвого діода його температура не повинна перевищувати $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кремнієві діоди можуть працювати при температурі до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Падіння напруги при пропусканні прямого струму у германієвих діодів складає $\Delta U_{\text{пр}} = 0,3 - 0,6\text{ В}$, у кремнієвих діодів – $\Delta U_{\text{пр}} = 0,8 - 1,2\text{ В}$.

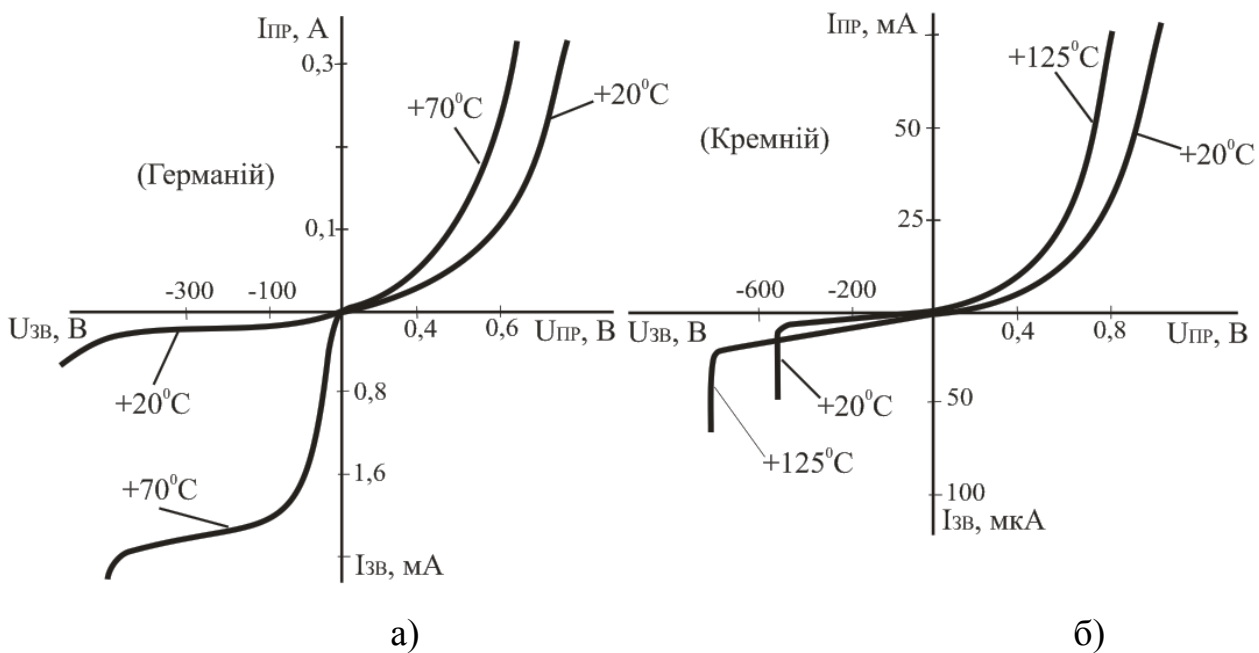


Рисунок 2.12 – Вольт-амперні характеристики напівпровідникових діодів при різній температурі: а - для германієвого діода; б - для кремнієвого діода

У разі прикладення до діода зворотної напруги в декілька сотень вольт зовнішнє електричне поле в запираючому шарі стає настільки сильним, що здатне вирвати

електрони з валентної зони в зону провідності (ефект Зенера). Зворотний струм при цьому різко збільшується, що викликає нагрів діода, подальше зростання струму і, нарешті, тепловий пробій (руйнування) р-n-переходу. Допустима зворотна напруга германієвих діодів досягає 100 – 400 В, а кремнієвих діодів 1000 – 1500 В.

Випрямні діоди застосовуються для випрямлення змінного струму в постійний, для обмеження паразитних викидів напруги та як елементи електричної розв'язки електричних кіл. В деякому потужному перетворювальному устаткуванні вимоги до середнього значення прямого струму та зворотної напруги перевищують номінальне значення параметрів існуючих діодів. У цих випадках задача вирішується паралельним або послідовним з'єднанням діодів.

Паралельне з'єднання діодів застосовують у тому випадку, коли потрібно отримати прямий струм, більший граничного струму одного діода. Для вирівнювання струмів використовують діоди з малою відмінністю характеристик (проводять їх підбір по провідності) або послідовно з діодами включають резистори з опором в одиниці Ом.

Послідовне з'єднання діодів застосовують для збільшення сумарної допустимої зворотної напруги. Для того, щоб зворотна напруга розподілялася рівномірно між діодами незалежно від їх зворотних опорів, застосовують шунтування (з'єднання в паралель) діодів резисторами.

Згідно з ОСТ 11 336.919-81 існує система позначень, складається з чотирьох елементів. Перший елемент (буква або цифра) вказує вихідний напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлений діод: Г або 1 – германій, К або 2 – кремній, А або 3 – арсенід галію, І або 4 – фосфід індію. Другий елемент – буква, що показує клас або групу діода. Третій елемент – Число, що визначає призначення або електричні властивості діода. Четвертий елемент вказує порядковий номер технологічної розробки діода і позначається від А до Я. Наприклад, діод КД202А розшифровується: К – матеріал, кремній, Д – діод випрямний, 202 – призначення і номер розробки, А – різновид.

Умовне позначення діода (анод і катод) вказує, як потрібно підключати діод на платах пристроїв. Діод має два виводи, один з яких катод (мінус), а інший – анод (плюс). Умовне графічне зображення на корпусі діода наноситься у вигляді стрілки,

що вказує прями́й напрямок, якщо стрілки немає, то ставиться знак «+». При нанесенні колірної коду, кольорову мітку, точку або смужку наносять ближче до анода. Для деяких типів діодів використовується кольорове маркування у вигляді крапок і смужок.

На верхній грані корпусу SMD діодів вказується тип діода, а широка полоса контрастного кольору вказує катод «-» (для більшості імпортованих діодів).

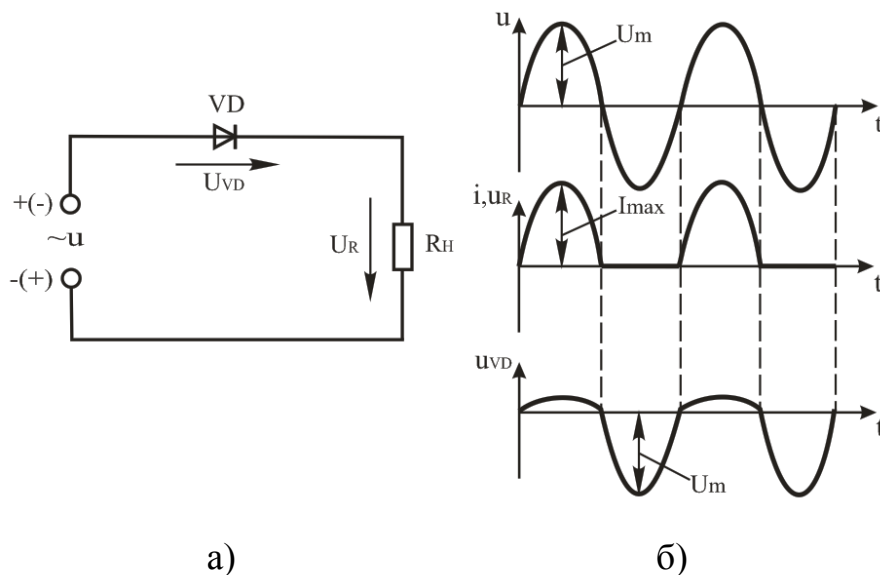


Рисунок 2.13. Однофазний однонапівперіодний випрямляч: а – схема; б – часові діаграми роботи.

Проста схема для випрямлення змінного струму показана на рисунку 2.13а. У ній послідовно з'єднані джерело змінної ЕРС, діод VD і резистор навантаження R_H . Ця схема випрямлення називається однонапівперіодною. Робота випрямляча відбувається наступним чином. Протягом одного півперіоду напруга для діода є прямою і проходить струм, що створює на резисторі R_H падіння напруги U_R . Протягом наступного напівперіоду напруга для діода є зворотною, струму практично немає і напруга на резисторі $U_R = 0$. Таким чином, через діод, резистор навантаження проходить пульсуючий струм у вигляді імпульсів, що тривають півперіоду. Цей струм називають випрямленим струмом. Він створює на резисторі R_H випрямлену напругу. Графіки на рисунку 2.13б ілюструють процеси у випрямлячі.

Стабілітрон (діод Зенера) - різновид діодів, що в режимі прямих напруг, проводять струм як звичайні діоди, а при зворотній напрузі струм різко зростає тільки в області напруг близьких до пробою («зенерівська напруга»). Це і є напруга стабілізації. Прилад отримав назву на честь імені його першовідкривача Кларенса Зенера. Стабілітрони застосовуються для стабілізації напруги.

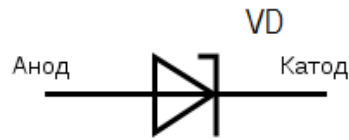


Рисунок 2.14 Умовне позначення стабілітрона.

Основні параметри стабілітронів:

- напруга стабілізації $U_{СТ}$ ($U_{СТ} = 1 - 1000 \text{ В}$);
- мінімальний $I_{СТ \text{ MIN}}$ і максимальний $I_{СТ \text{ MAX}}$ струми стабілізації ($I_{СТ \text{ MIN}} \approx 1,0-10 \text{ мА}$, $I_{СТ \text{ MAX}} \approx 0,05 - 2,0 \text{ А}$);
- максимально допустима розсіювана потужність P_{MAX} ;
- диференційний опір на ділянці стабілізації $r_D = \Delta U_{СТ} / I_{СТ}$, ($r_D \approx 0,5 - 200 \text{ Ом}$);
- температурний коефіцієнт напруги на ділянці стабілізації. ТКУ стабілітрона показує на скільки відсотків зміниться стабілізована напруга при зміні температури напівпровідника на 1°C , ($\text{TKU} = -0,5 \dots + 0,2 \text{ \%}/^\circ\text{C}$).

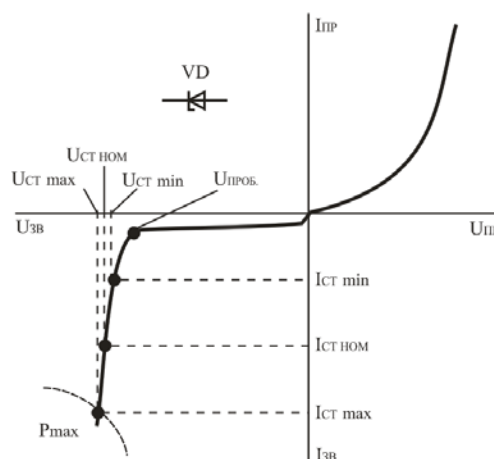


Рисунок 2.15. Вольт-амперна характеристика стабілітрона та його умовне графічне позначення.

Стабілітрони допускають послідовне увімкнення, при цьому результуюча стабілізуюча напруга дорівнює сумі напруги стабілітронів: $U_{СТ} = U_{СТ1} + U_{СТ2} + \dots$. Паралельне з'єднання стабілітронів недопустиме, оскільки через розкид характеристик і параметрів з усіх паралельно з'єднаних стабілітронів струм виникатиме тільки в одному, який має найменшу стабілізуючу напругу $U_{СТ}$, що викликає перегрів стабілітрона.

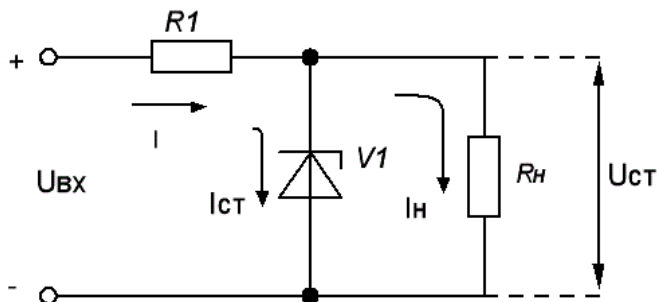


Рисунок 2.16. Схема стабілізатора напруги.

На рисунку 2.16 показана схема послідовного стабілізатора напруги, що виконаний на основі стабілітрона V1. Вхідна напруга $U_{вх}$ повинна бути більшою напруги, що потрібна для споживача (напруга стабілізації). При змінах вхідної напруги вихідна (напруга стабілізації $U_{ст}$) буде незмінною, а змінюватиметься струм через стабілітрон та падіння напруги на резисторі R1. Сума падіння напруги на опорі та стабілітроні дорівнює вхідній напрузі $U_{вх} = U_{R1} + U_{ст}$.

Варикап – це напівпровідниковий діод, в якому використовується залежність ємності від величини зворотної напруги і який призначений для застосування як елемент з електрично керованою ємністю. Варикапи широко застосовуються в різних схемах для автоматичного підстроювання частоти, в параметричних підсилювачах.

Напівпровідниковим матеріалом для виготовлення варикапів є кремній.

Основні параметри варикапів:

- номінальна ємність C_B – ємність при заданій зворотній напрузі ($C_B = 10 - 500$ пФ);
- коефіцієнт перекриття по ємності ($K_C = 5 - 20$) – відношення ємності варикапа при двох заданих значеннях зворотної напруги

$$K_C = \frac{C_{MAX}}{C_{MIN}}$$

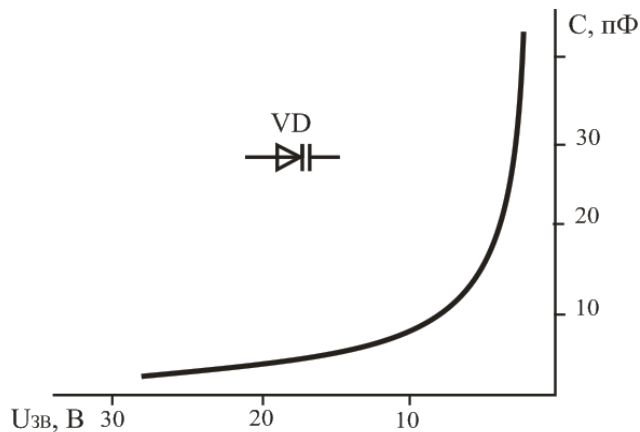


Рисунок 2.17. Вольт-фарадна характеристика варикапа та його умовне графічне позначення

Фотодіод - це приймач оптичного випромінювання, який перетворює подану на його фоточутливу область світло в електричний заряд за рахунок процесів в р-п-переході. Його можна класифікувати як напівпровідниковий діод, в якому використовується залежність його вольт-амперної характеристики від освітленості. Коли фотон, що має достатню енергію, потрапляє на фотодіод, в останньому відбувається внутрішній фотоефект: що призводить до зміни концентрації носіїв у зоні провідності (тобто зміни провідності) та виникненню фото ЕРС. Фотодіод може працювати в двох режимах: фотодіодний - із зовнішньою зворотною напругою та фотогальванічний (генераторний) - без зовнішньої напруги. Фотодіоди використовуються у різних пристроях як датчики світла.

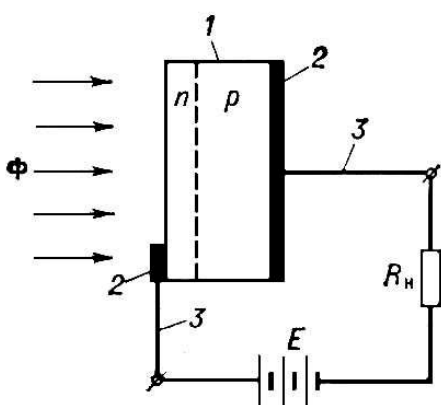


Рисунок 2.18. Структурна схема фотодіода і схема його включення при роботі у фотодіодному режимі: 1 - кристал напівпровідника; 2 - контакти; 3 - виводи; Φ - потік електромагнітного випромінювання; п і р - області напівпровідника відповідно з донорною і акцепторною домішками; E - джерело постійного струму; R_n - навантаження.

При роботі фотодіода у фотодіодному режимі джерело живлення вмикається на зворотну напругу. На рисунку 2.19 показано дану схему включення фотодіода і ВАХ

при різних рівнях освітленості. Струм і напруга на навантажувальному резисторі R_H можуть бути визначені графічно по точкам перетину ВАХ фотодіода і лінії навантаження, що відповідає опору резистора R_H . При відсутності освітленості фотодіод працює в режимі звичайного діода. Темновий струм у германієвих фотодіодів рівний 10 - 30 мкА, у кремнієвих 1 - 3 мкА.

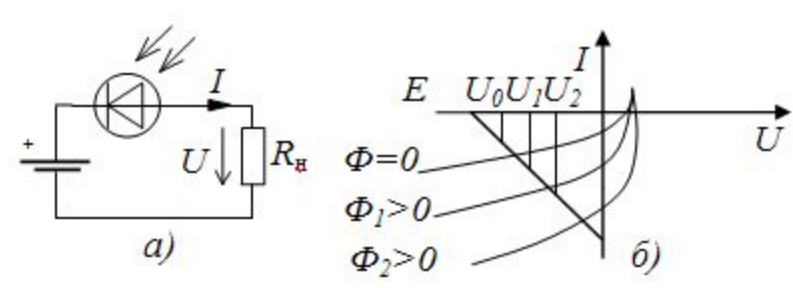


Рисунок 2.19. Схема включення фотодіода в фотодіодному режимі : а) схема включення, б) ВАХ фотодіода.

Основні параметри фотодіода:

- чутливість;
- еквівалентна потужність шуму, також зустрічаються назви рівноцінна потужність шуму, порогова чутливість є мірою чутливості детектуючих систем, зокрема, оптичних приймачів. Вона визначається як такий рівень корисного сигналу, що викликає реакцію приймача, що дорівнює рівневі шуму;
- спектральна характеристика;
- темновий рівень струму;
- інерційність

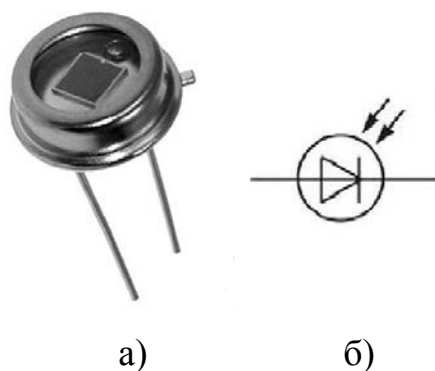


Рисунок 2.20. Фотодіод: зовнішній вигляд; умовне графічне позначення.

Світлодіод (англ. LED - light-emitting diode) - напівпровідниковий пристрій, що випромінює світло, при пропусканні через нього електричного струму (ефект, відомий

як електролюмінесценція). За своєю структурою, світлодіод подібний до звичайного напівпровідникового діоду, так само як і будь який напівпровідниковий діод, світлодіод має властивість односторонньої електропровідності, але, при протіканні електричного струму у "прямому" напрямі, на кристалі, в зоні контакту напівпровідників різного типу провідності, виникає світіння. (Принцип дії світлодіодів побудований на інжекції електронів при протіканні через діод прямого струму. Процес самовільної рекомбінації інжектованих електронів супроводжується їхнім переходом з високого енергетичного рівня на нижчий. Електрон після рекомбінації знаходиться у дуже нестабільному стані, оскільки він має зайву енергію. В такому стані електрон довго перебувати не може. Він перейде на стаціонарну орбіту з нижчим енергетичним рівнем і випромінить квант світла.)

Довжина світлової хвилі, яку ми сприймаємо як колір, залежить лише від структурних та хімічних особливостей напівпровідників. Ніякі зміни характеристик струму живлення світлодіода (сила струму, частота, напруга) не можуть вплинути на довжину хвилі випромінюваного світла. Сучасні світлодіоди мають ефективність 90%, тобто 90% електроенергії може бути перероблене на світло і можуть випромінювати світло від інфрачервоної ділянки спектру до ультрафіолету в тому числі білі.

Використовуючи світлодіоди можна одержати світло з високою насиченістю кольору. Світлодіоди застосовують в індикаційній техніці, при побудові світлодіодних джерел світла.

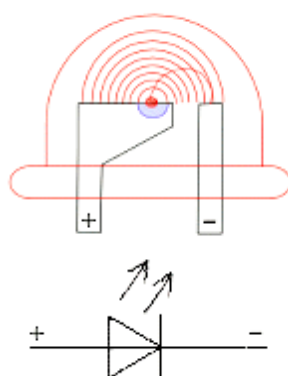


Рисунок 2.21. Зовнішній вигляд та умовне графічне позначення світлодіода.

Найбільшого розповсюдження серед світлодіодів білого світіння набули світлодіоди з люмінофорним покриттям. Головна перевага світлодіодів з

люмінофорами - їх дешевизна. За принципом дії такі світлодіоди подібні до люмінесцентних ламп. На кристал фіолетового, або ультрафіолетового світлодіода наноситься покриття люмінофору, що під дією ультрафіолетового випромінювання починає світитися сам, але вже білим світлом. Зрозуміло, так само як вигоряє люмінофор люмінесцентних ламп, зменшуючи світловіддачу, вигоряє і люмінофор світлодіода. Отже, якщо через світлодіод пропускати більший струм, ніж той на який він розрахований, світлодіод світитиме яскравіше, але внаслідок виділення тепла кристал швидко деградує. Замість сотень тисяч годин світлодіод пропрацює десятки, поступово втрачаючи яскравість.

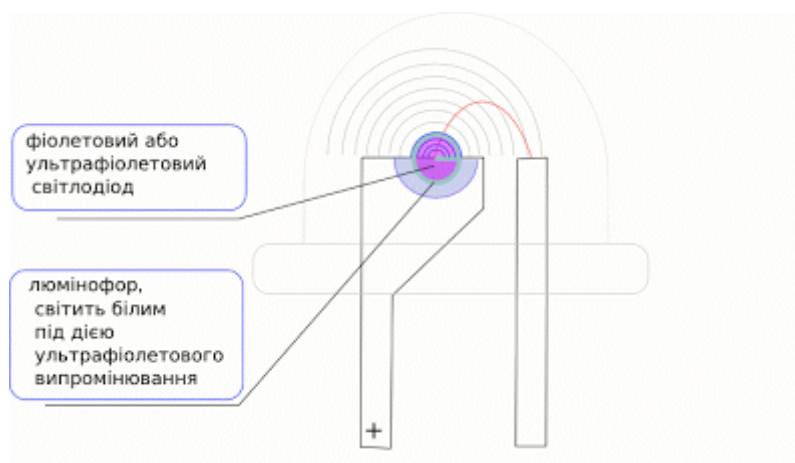


Рисунок 2.22. Будова білого світлодіода з люмінофорами.

Основні параметри світлодіодів:

- прямий допустимий імпульсний струм, $I_{пр.імп}$, мА;
- зворотна напруга, $U_{зв}$, В;
- прямий допустимий струм, $I_{пр}$, мА
- експлуатаційний діапазон температури, $T_{експ}$, °С;
- пряма максимальна напруга, $U_{пр.мах}$, В;
- Пряма експлуатаційна напруга, $U_{пр}$, В

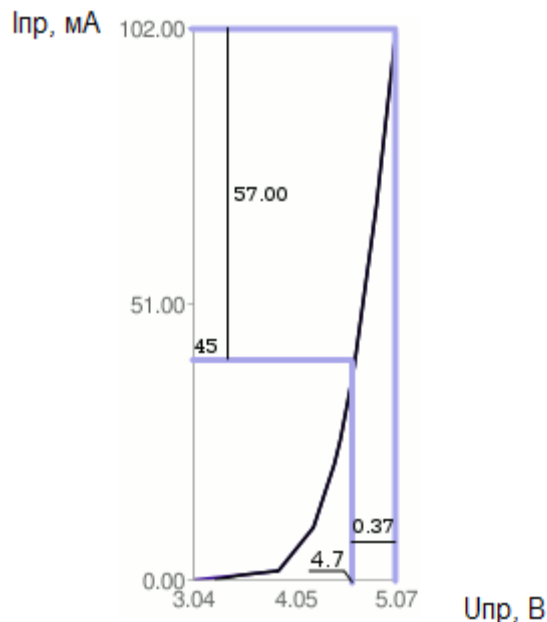


Рисунок 2.23. Вольт-амперна характеристика світлодіода.

В будь-якому світлодіоді є сильна залежність струму від напруги, яка описується ВАХ (рисунок 2.23). Що ми бачимо? Збільшення напруги живлення від 4.7 до 5.07 вольт, всього – нічого, на 0.37 вольта викликає зростання струму через світлодіод з 45мА до 100 мА. Так як вольт-амперна характеристика носить експоненціальний характер, то для живлення світлодіода необхідно задавати струм живлення. Для малопотужних індикаторних світлодіодів, як правило струм задають послідовно ввімкненим стосовно світлодіода резистором. У випадку, коли напруга живлення може змінюватися по величині, наприклад при живленні світлодіода від хімічного джерела струму (акумулятор) по мірі його розрядки зменшуватиметься напруга живлення та струм через світлодіод – світловий потік світлодіода зменшуватиметься. Тому для живлення освітлювальних (білих) світлодіодів використовують спеціальні драйвери – стабілізатори струму. Вони забезпечують оптимальний прямий струм через світлодіод – максимальну світловіддачу і при цьому забезпечують оптимальний температурний режим. Потужні світлодіоди додатково встановлюються на радіатори. На рисунку 2.24 показано схему включення світлодіода через стабілізатор LM317, що працює в режимі стабілізатора струму. Мінімальна напруга джерела струму в схемі повинна бути мінімум 2-4В більше чим напруга кристала світлодіода.

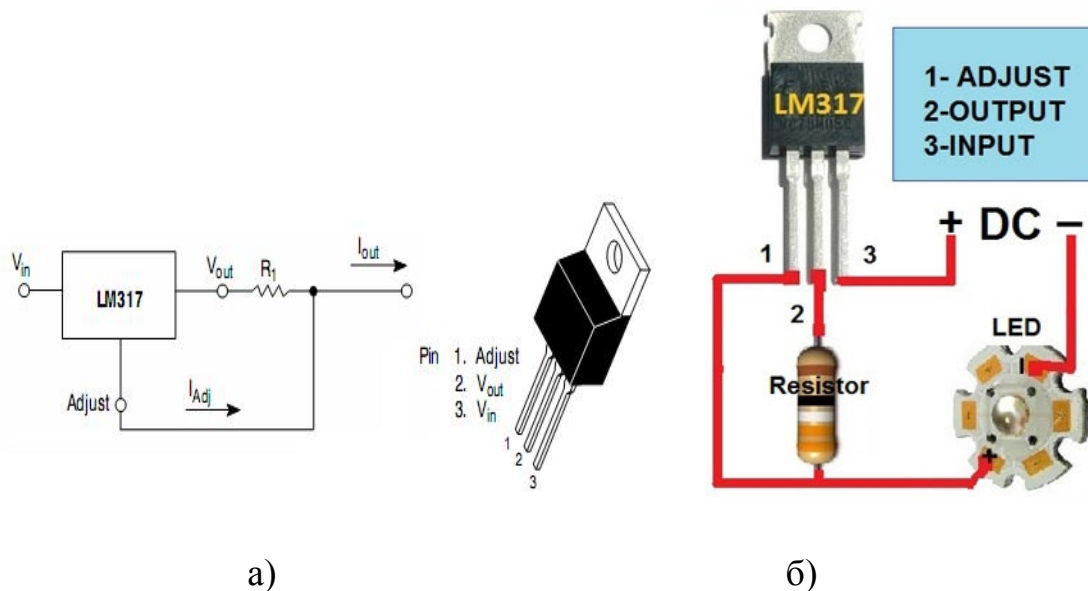


Рисунок 2.24. Схема включення світлодіода з використанням LM317: а - принципова схема; б - зовнішній вид схеми.

Схема дозволяє обмежувати струм від 10мА до 1,5А з максимальною вхідною напругою 35В. При великих перепадах падіння напруги чи при великих струмах мікросхему LM317 необхідно встановити на радіатор. Резистор розраховують по формулі: $R1=1.25V/I_{out}$, де струм приймають в А, а опір в Ом. Наприклад, світлодіод на струм 700 мА, $R=1.25/0.7A=1.785$ Ом. Якщо потрібно більші вхідні напруги чи струм, або менші втрати то доцільно використовувати спеціалізовані імпульсні драйвери.

Світлодіоди і фотодіоди часто використовуються в парі. При цьому вони розміщені в одному корпусі, таким чином, щоб світлочутлива площа фотодіода знаходилася напроти випромінювача світлодіода. Напівпровідникові прилади, що використовують пару "світлодіод – фотодіод", називаються оптронами (рисунок 2.25). Вхідні і вихідні ланцюги в таких приладах електрично не зв'язані, оскільки передача сигналу здійснюється через оптичне випромінювання.

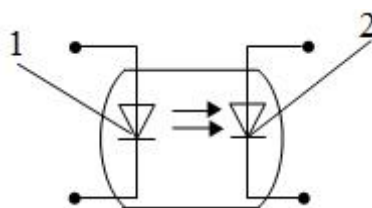


Рисунок 2.25. Оптодрон: 1 – світлодіод, 2 – фотодіод.

Контрольні запитання

1. Дати визначення випрямного діода. Навести параметри.
2. Замалювати умовне графічне і літерне позначення випрямного діода.
3. Які основні особливості вольт-амперної характеристики випрямного діода.
4. Дати визначення стабілітрона. Навести параметри.
5. Замалювати умовне графічне і літерне позначення стабілітрона.
6. Які основні особливості вольт-амперної характеристики стабілітрона.
7. Дати визначення варикапа. Навести параметри.
8. Замалювати умовне графічне і літерне позначення варикапа.
9. Дати визначення фотодіода. Навести параметри.
10. Замалювати умовне графічне і літерне позначення фотодіода.
11. Які основні особливості вольт-амперної характеристики фотодіода.
12. Дати визначення світлодіода. Навести параметри.
13. Замалювати умовне графічне і літерне позначення світлодіода.
14. Які основні особливості вольт-амперної характеристики світлодіода.

2.3 Перемикальні прилади

До перемикальних напівпровідникових приладів відносять тиристири (диністори, триністори, симістори) та одноперехідні транзистори.

Тиристор (загальна назва динисторів, тринисторів, симисторів) – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з трьома або більше р-п-переходами, вольт-амперна характеристика якого має ділянку з від’ємним диференціальним опором.

Двоелектродний тиристор (диністор) – це тиристор, що має два зовнішніх виводи (рисунок 2.26) - анод і катод.

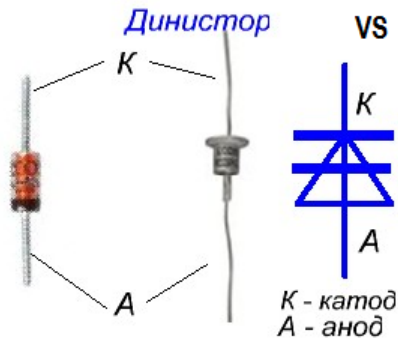
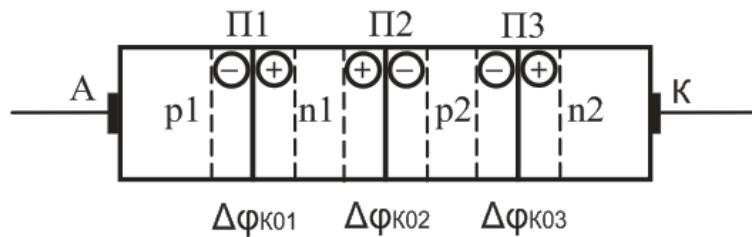
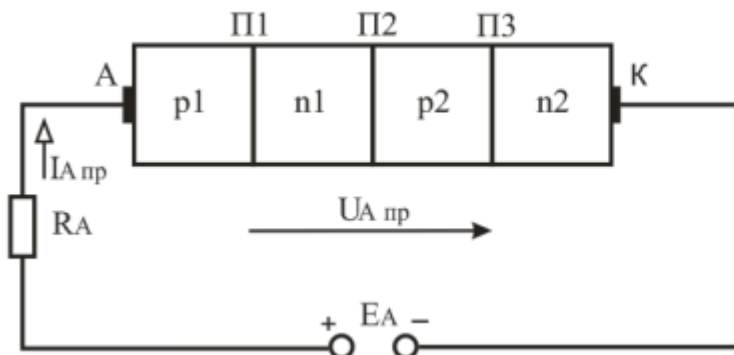


Рисунок 2.26. Диністор (зовнішній вигляд та умовне позначення).

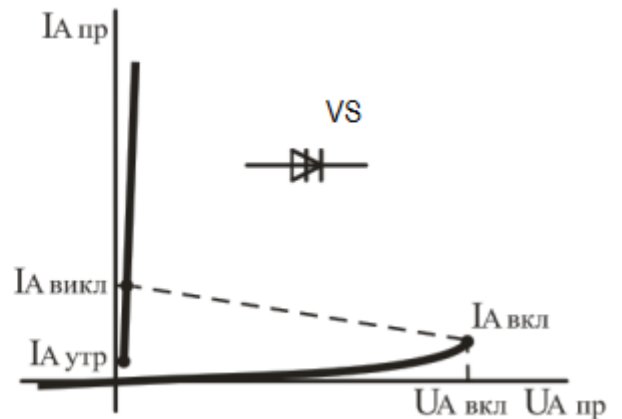
Диністор являє собою напівпровідниковий прилад, що складається з чотирьох областей з провідностями р- і п-типу, які послідовно чергуються (рисунок 2.27).



а)



б)



в)

Рисунок 2.27. Диністор: а – структура; б – схема увімкнення; в – вольт-амперна характеристика та умовне графічне позначення.

Диністор може перебувати у двох станах: закритому, яке характеризується значним падінням напруги на диністорі та протіканням малих струмів через нього, тобто великим опором, і у відкритому, яке характеризується малим падінням напруги на диністорі та протіканням значних струмів через нього, тобто малим опором. Для відкриття диністора до нього необхідно прикласти імпульс прямої напруги десятки вольт, а для закриття необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{A\text{ пр}} < I_{A\text{ утр}}$, (де $I_{A\text{ утр}}$ – струм утримання – мінімальний прямий струм, при якому диністор ще залишається в увімкненому стані) або подати на прилад напругу зворотної полярності. Основні параметри диністора характеризуються ВАХ.

Виходячи з принципу роботи диністорів, їх використовують в якості електронного ключа.

Триелектродний тиристор (триністор (рисунок 2.28)) – це керований напівпровідниковий прилад, що має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод). На відміну від диністора триністор має додатковий електрод КЕ, який називають керуючим.

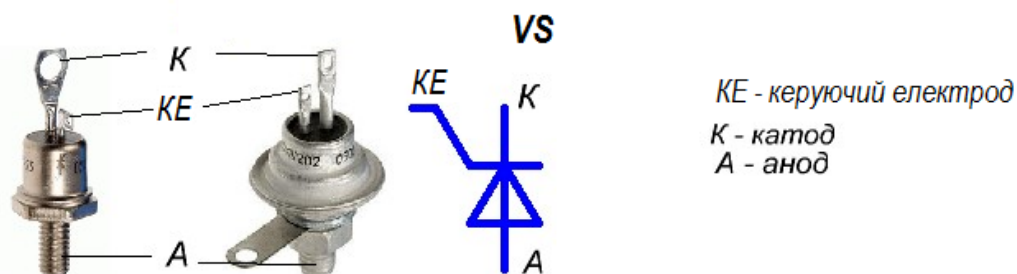
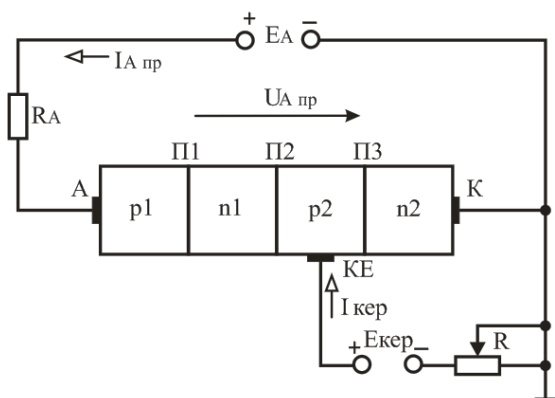


Рисунок 2.28. Триністор з керуванням по катоду (зовнішній вигляд, умовне позначення)

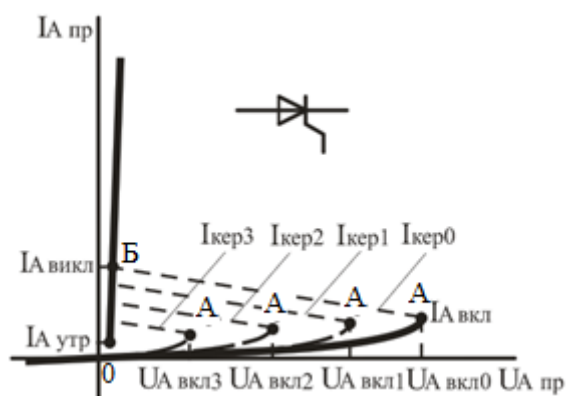
Для прикладу розглянемо найбільш широко використовуємий триністор з управлінням по катоду. Відкриття триністора при прикладанні на анод та катод прямої напруги здійснюється підведенням напруги близько одиниць вольт на керуючий електрод від додаткового зовнішнього джерела ЕК при певному заченні струму керування $I_{\text{кер}}$. Для триністора з управлінням по катоду (рисунок 2.28) на керуючий електрод необхідно подати імпульс "+" позитивної напруги. Згідно з ВАХ (рисунок 2.29), якщо на керуючому електроді $I_{\text{кер}0} = 0$ пряма напруга $U_{A\text{ пр}}$ при якій

тиристор знаходиться у закритому стані, сягає значної величини (ділянка 0А). При збільшенні струму керування від $I_{кер1}$ до $I_{кер3}$, $U_{А пр}$ при якій тиристор знаходиться у закритому стані зменшується. При струмі $I_{кер1}$ - $I_{кер3}$ та збільшенні прямої напруги більше точки А відбувається відкривання триністора. На ділянці АБ, що характеризується як ділянка від'ємного опору, триністор знаходиться в нестійкому стані. Якщо прямий струм через триністор перевищує точку Б, то він знаходиться у відкритому стані.

Для вимикання триністора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{А пр} < I_{А утр}$ (де $I_{А утр}$ – струм утримання – мінімальний прямий струм увімкненого тиристора при розімкненому колі керування) або подати на прилад напругу зворотної полярності.



а)



б)

Рисунок 2.29. Триністор: а - структура та схема увімкнення; б - вольт-амперна характеристика та умовне графічне позначення.

Триністори можуть бути використанні в якості електронного ключа та регулюємого випрямляча. Управління триністорними випрямлячами зводиться до керування моментом відмикання тиристора. Найбільш поширений спосіб управління тиристорами – імпульсно-фазовий; при цьому на керуючий електрод тиристора періодично подаються імпульси керуючого сигналу, які можуть зсуватися у часі. В результаті змінюється момент відмикання триністора, починаючи з якого і до кінця

додатної півхвилі напруги, тиристор знаходиться у відкритому стані. Цей зсув у часі імпульсів сигналу керування відносно переходу напруги мережі через нуль називається кутом керування α , який може змінюватися від 0 до 180° . Змінюючи α можна регулювати напругу на навантаженні від нуля до максимуму.

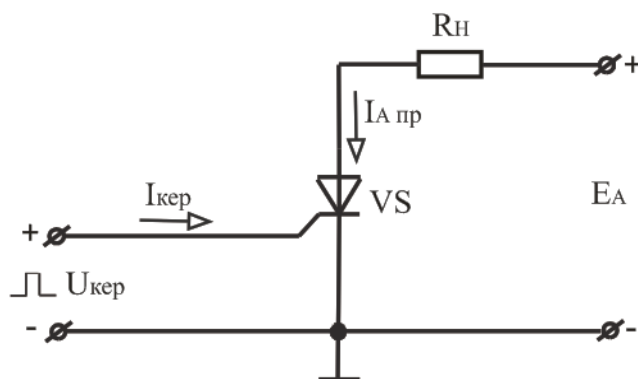


Рисунок 2.30. Схема увімкнення триністора.

Дана схема також може бути використана для перевірки триністорів. Для відкриття триністора на керуючий електрод необхідно подати напругу його вмикання, згідно з паспортними даними, а паралельно R_n приєднати вольтметр. У момент відкритого стану тиристора на R_n з'явиться напруга \approx джерелу живлення E_A . В якості R_n можна використати контрольну лампу і перевірити стан відкриття тиристора по її роботі.

Крім вказаних тиристорів в схемах автоматики використовуються триністори з керуванням по аноду (рисунок 2.31а), закриваємі триністори (рисунок 2.31б, в), симістори (рисунок 2.31г, д). Особливість керування триністора з керуванням по аноду повинна передбачати подачі на керуючий електрод імпульсу "-" потенціалу. При керуванні закриваєміми триністорами, у порівнянні зі звичайними, вони здатні переходити з відкритого стану у закритий при зміні полярності сигналу на керуємому електроді.

Симістор (симетричний тріодний тиристор) — напівпровідниковий прилад, є різновидом тиристора, використовується для комутації в ланцюгах змінного струму. У електроніці часто розглядається як керований вимикач (ключ) та регулятор напруги.

Це керований напівпровідниковий прилад, який має однакові ВАХ при різних полярностях і, який проводить струм в обох напрямках.

На відміну від тиристора, що має катод і анод, основні (силові) виводи симістора не називають катодом чи анодом, оскільки в силу структури симістора вони є тим і іншим одночасно. Однак за способом включення відносно керуючого електрода основні виводи симістора розрізняються, причому має місце їх аналогія з катодом і анодом тиристора. На наведеному рисунку правий за схемою вивід симістора називається умовним катодом, лівий - умовним анодом, вивід униз - керуючим електродом (рисунок 2.31д).

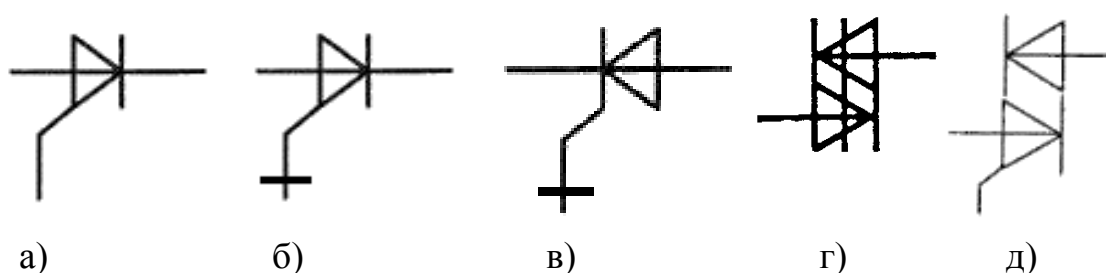


Рисунок 2.31. Умовні позначення тиристорів: а - триністори з керуванням по аноду; б - закриваємий триністор з управління по аноду; в - закриваємий триністор з управління по катоду; г - симетричний диністор; д - симетричний триністор.

Для управління живленням навантаження основні електроди симістора включають в ланцюг послідовно з навантаженням. У закритому стані провідність симістора відсутня, живлення навантаження вимкнене. При подачі на керуючий електрод відпираючого сигналу між основними електродами симістора виникає провідність, живлення навантаження виявляється включеним. Характерно, що симістор у відкритому стані проводить струм в обох напрямках. Іншою особливістю симістора, як і інших тиристорів, є те, що для його утримання у відкритому стані немає необхідності постійно подавати сигнал на керуючий електрод (на відміну від транзистора). Симістор залишається відкритим, поки протікаючий через основні виводи струм перевищує деяку величину, звану струмом утримання. Звідси випливає, що вимкнення навантаження відбувається поблизу моментів часу, коли напруга на

основних електродах симістора змінює полярність і переходить через нуль (зазвичай ці моменти збігаються в часі зі зміною полярності напруги в електромережі).

Симістор має п'ятишарову структуру напівпровідника. Спрощено симістор можна представити у вигляді еквівалентної схеми з двох тріодних тиристорів, включених зустрічно-паралельно. Слід, однак, зауважити, що управління симістором відрізняється від управління двома зустрічно-паралельними тиристорами. Полярність керуючої напруги, як правило, повинна збігатися з полярністю напруги на умовному аноді. Тому часто використовується такий метод управління симістором, при якому сигнал на керуючий електрод подається з умовного анода через струмообмежувальні резистор і вимикач. Для відмикання симістора на його керуючий електрод подається напруга щодо умовного катода. Управляти симістором зручно, забезпечуючи вибір певної сили струму керуючого електрода, достатньої для відкривання симістора. Деякі типи симісторів можуть відпиратися сигналом будь-якої полярності, хоча при цьому може знадобитися більший керуючий струм.

Одноперехідний транзистор - напівпровідниковий прилад з трьома електродами і одним р-п переходом. Одноперехідний транзистор належить до сімейства тиристорів. Підсилювальні і перемикаючі властивості ОПТ обумовлені зміною опору бази у результаті інжекції у неї неосновних носіїв заряду.

Основою транзистора є кристал напівпровідника (наприклад n-типу рисунок 2.32, б, в), який називається базою. На кінцях кристала є омичні контакти В1(Б1) і В2(Б2), між якими розташовується область, що має випрямляючий контакт Е з напівпровідником р-типу, що виконує роль емітера. Принцип дії одноперехідного транзистора зручно розглядати, скориставшись еквівалентною схемою заміщення (рисунок 2.32,в), де верхній опір R_{B2} і нижній опір R_{B1} - опори між відповідними виводами бази і емітера, а діодом зображено емітерний р-п-перехід. Струм, що протікає через опори R_{B2} і R_{B1} , створює на першому з них падіння напруги, яке зміщує діод у зворотному напрямку. Якщо напруга на емітері U_e менше напруги на опорі R_{B1} - діод закритий, і через нього тече тільки струм витoku. Коли ж напруга U_e стає вище за напругу на опорі R_{B1} , діод починає пропускати струм у прямому напрямі. При цьому опір R_{B1} зменшується, що призводить до збільшення струму у ланцюзі діод - R_{B1} , що у

свою чергу, викликає подальше зменшення опору R_{B1} . Відповідно і струм I_B , що протікає через навантаження та R_{B2} і R_{B1} зростає. Цей процес протікає лавиноподібно. Опір R_{B1} зменшується швидше, ніж збільшується струм через р-n-перехід, у результаті на вольт-амперній характеристиці одноперехідного транзистора з'являється область від'ємного опору. При подальшому збільшенні струму залежність опору R_{B1} від струму через р-n-перехід зменшується, і при значеннях більших за деяку величину $I_{вкл}$ опір не залежить від струму (область насичення).

При зменшенні напруги зсуву $U_{зс}$ вольт-амперна характеристика зміщується вліво і за відсутності його перетворюється у характеристику відкритого р-n-переходу.

При певному значенні напруги $U_{ЕБ1} \geq U_{ЕБ1 \text{ вмик}}$ вмик відбувається різке зростання струму I_E і зниження напруги $U_{ЕБ1}$, що приводить до появи ділянки з від'ємним диференціальним опором (ділянка ВС, рисунок 2.33, б). У відкритому стані одноперехідний транзистор знаходитиметься до тих пір, поки інжекція носіїв заряду через емітерний перехід підтримуватиме в базі надмірну концентрацію неосновних і основних носіїв заряду, тобто до тих пір, поки струм емітера I_E перевищуватиме значення струму вимикання $I_{вим}$.

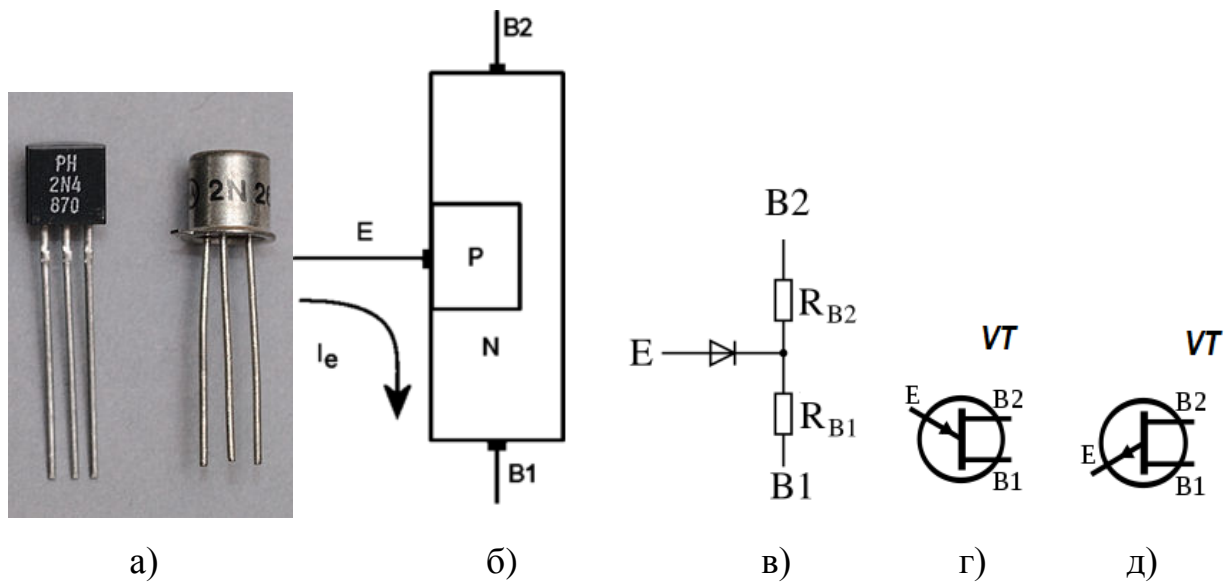


Рисунок 2.32. Одноперехідний транзистор: а - зовнішній вигляд; б - структура; в - еквівалентна схема заміщення; г - умовне позначення з n - каналом; д - умовне позначення p – каналом.

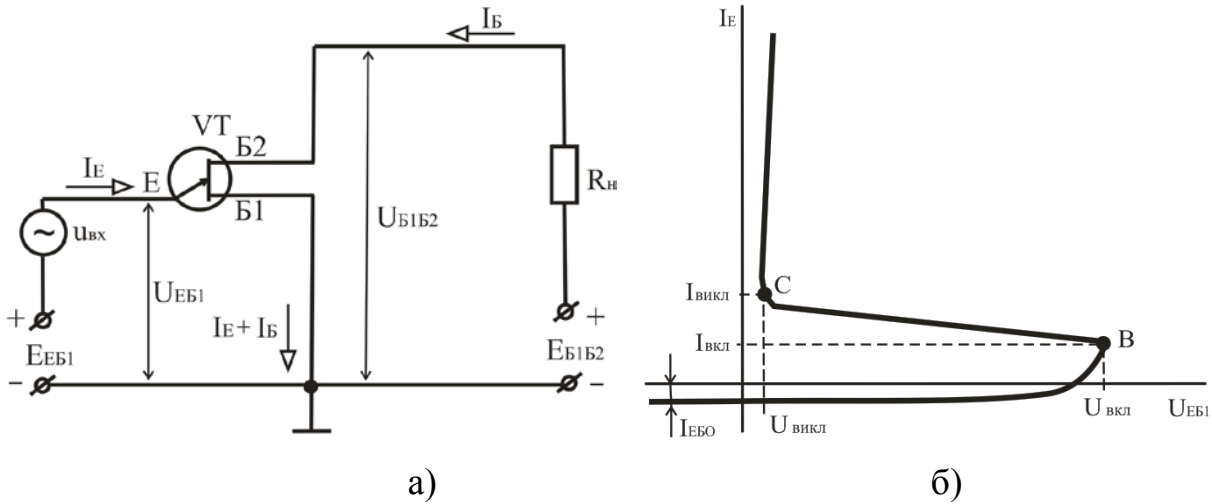


Рисунок 2.33. Одноперехідний транзистор: а - схема увімкнення та умовне графічне позначення; б - вольт-амперна характеристика.

Основними параметрами одноперехідних транзисторів є:

- міжбазовий опір;
- коефіцієнт передачі, H , що характеризує напругу перемикання;
- напруга спрацьовування $U_{вкл}$ - мінімальна напруга на емітерному переході, необхідна для переходу приладу зі стану з великим опором у стан з від'ємним опором;
- струм включення $I_{вкл}$ - мінімальний струм, необхідний для включення одноперехідного транзистора, тобто переведення його в область негативного опору;
- струм вимикання $I_{вкл}$ - найменший емітерний струм, що утримує транзистор у включеному стані;
- напруга вимикання $U_{вкл}$ - напруга на емітерному переході при струмі через нього, рівному $I_{вкл}$;
- зворотний струм емітера $I_{ез}$ - струм витoku закритого емітерного переходу

Одноперехідні транзистори отримали широке застосування у різних пристроях автоматики, імпульсної і вимірювальної техніки - генераторах, порогових пристроях, дільниках частоти, реле часу і т. д. Хоча основною їх функцією є перемикання.

Контрольні запитання

1. Поясніть призначення та наведіть основні параметри тиристорів.
2. Наведіть структуру і поясніть принцип дії диністорів. Наведіть вольт-амперну характеристику та умовне графічне позначення диністорів.
3. Наведіть структуру і поясніть принцип дії триністорів. Наведіть вольт-амперну характеристику та умовне графічне позначення триністорів. Що таке зона від'ємного опору ВАХ?
4. Наведіть структуру і поясніть принцип дії симісторів. Наведіть вольт-амперну характеристику та умовне графічне позначення симісторів.
5. Поясніть, як увімкнути і як вимкнути тиристор?
6. Поясніть призначення і принцип дії одноперехідних транзисторів. Наведіть вольт-амперну характеристику та умовне графічне позначення одноперехідних транзисторів.
7. У чому полягає принцип регулювання напруги змінного струму тиристорним регулятором?

2.4. Біполярні транзистори

Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад, що складається з трьох областей провідності, які утворюють два р-n-переходи і призначений для підсилення потужності. Біполярні транзистори, що випускаються в даний час, можна класифікувати за наступними ознаками:

- за матеріалом: германієві і кремнієві;
- за видом провідності областей: типу р-n-p і n-p-n;
- за потужністю: малої ($P_{MAX} \leq 0,3$ Вт), середньої ($0,3$ Вт $< P_{MAX} \leq 1,5$ Вт) і великої потужності ($P_{MAX} > 1,5$ Вт);
- за частотою: низькочастотні, середньочастотні, високочастотні і понадвисокочастотні.

Для більш детального знайомства з призначенням, параметрами, маркуванням конкретного типу транзистора доцільно скористатися довідниками, каталогами, детальним описом (datasheet).

У біполярних транзисторах струм визначається рухом носіїв заряду двох типів: електронів і дірок (або основними і неосновними носіями заряду). Звідси їх назва – біполярні. В даний час транзистори виготовляються і застосовуються виключно з площинними р-n-переходами. Будова площинного біполярного транзистора показана схематично на рисунку 2.34. Транзистор являє собою пластинку германію або кремнію, в якій створено три області з різною електропровідністю. У транзистора типу n-p-n середня область має дірчасту, а крайні області – електронну електропровідність. Транзистори типу p-n-p мають середню область з електронною, а крайні області з дірчастою електропровідністю. Середня область транзистора називається базою, одна крайня область – емітером, інша – колектором. Таким чином в транзисторі є два р-n-переходи: емітерний – між емітером і базою та колекторний – між базою і колектором. Площа емітерного переходу менше площі колекторного переходу. Емітером називається область транзистора призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базу. Колектором називають область, призначенням якої є екстракція носіїв заряду з бази. Базою є область, в яку інжектуються емітером неосновні для цієї області носії заряду. Концентрація основних носіїв заряду в емітері в багато раз більше концентрації основних носіїв заряду в базі, а їх концентрація в колекторі декілька менше концентрації в емітері. Тому провідність емітера на декілька порядків вища за провідність бази, а провідність колектора декілька менше провідності емітера. Від бази, емітера і колектора зроблені виводи.

Залежно від того, який з виводів є спільним для вхідного і вихідного електричних кіл, розрізняють три схеми вмикання біполярного транзистора: з спільною базою (СБ), з спільним емітером (СЕ), з спільним колектором (СК). Вхідне, або керуюче, коло служить для управління роботою транзистора. У вихідному, або керованому, колі отримують посилені коливання. Джерело коливань, що підлягають посилюванню, вмикається у вхідне коло, а у вихідне вмикається навантаження.

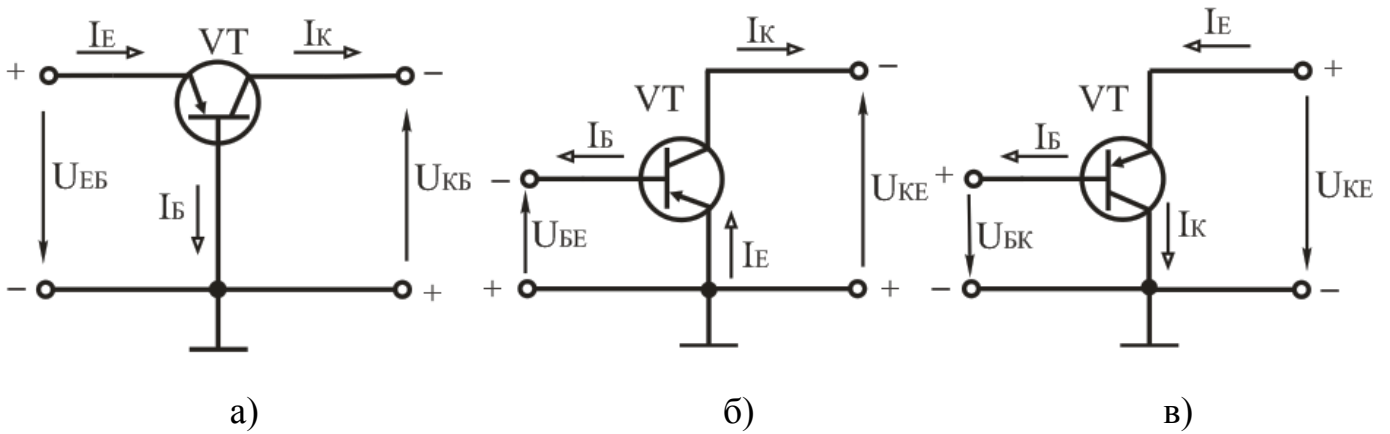


Рисунок 2.35. Схеми вмикання біполярних транзисторів: а - з спільною базою; б - з спільним емітером; в - з спільним колектором.

Таким чином, струм в колі колекторного переходу, буде визначатися сумою струмів

$$I_K = \alpha I_E + I_{KO},$$

Струм I_{KO} називають зворотним струмом колекторного переходу. Так-як I_{KO} значно менше I_E , то

$$I_K \approx \alpha I_E, \text{ звідки наближено } \alpha \approx I_K / I_E$$

Коефіцієнт пропорційності α називають статичним коефіцієнтом передачі струму емітера і визначають через h параметр $\alpha = h_{21b}$, де індекс "б" означає підключення транзистора по схемі зі спільною базою. Для сучасних транзисторів даний параметр має значення від 0,9 до 0,99, і чим він ближче до одиниці, тим транзистор вважається кращим.

Схема з загальною базою має низький вхідний опір, який в багатокаскадних схемах підсилення створює шунтуючу дію на опір навантаження попереднього каскаду і різко знижує підсилення цього каскаду по напрузі та потужності.

На рисунку 2.35б показана схема транзистора р-п-р типу, увімкненого за схемою з спільним емітером. В ній загальною точкою вхідного і вихідного кола є емітер. Базова напруга U_{BE} є вхідною і служить для інжекції основних носіїв із р-області емітера в п-область бази. Напруга колектора U_{KE} є вихідною і служить для створення прискорювального поля для перенесення неосновних носіїв з п-області бази в р-область колектора. Оскільки товщина бази незначна то більша частина дірок, що

інжектуються емітером, пролітають через базу до колекторного переходу. Тобто подальше процеси протікають аналогічно попередній схемі.

Для схеми з загальним емітером статичний коефіцієнт передачі струму β відносно вхідного базового струму визначається з формули $\beta = I_K / I_B$.

Статичний коефіцієнт передачі струму бази β визначають через h параметр, як $\beta = h_{21e}$, де індекс "e" означає підключення транзистора по схемі зі спільним емітером. В залежності від типу транзисторів даний параметр має значення від 10 до 300.

Вхідний опір транзисторів у схемі з загальним емітером значно більший ніж у схемі з загальною базою. Перевагою схеми зі СЕ також є можливість живлення від одного джерела, так-як на базу і колектор подається напруга одного знаку. Схеми зі СЕ отримали найбільше розповсюдження зокрема в підсилювачах.

На рисунку 2.35в показана схема транзистора р-п-р типу, увімкненого за схемою з спільним колектром. В ній загальною точкою вхідного і вихідного кола є колектор. Базова напруга U_{BK} є вхідною і служить для інжекції основних носіїв із р-області колектора в п-область бази. Напруга колектора U_{KE} є вихідною і служить для створення прискорювального поля для перенесення неосновних носіїв з п-області бази в р-область емітера.

Схеми включення транзистора з СЕ і СК схожі, але їх електричні параметри відрізняються по причині різної концентрації домішок у в областях переходів.

Схеми з СК мають порівняно значний коефіцієнт прямої передачі струму рівний $\beta+1$ і великий вхідний опір, але не дозволяють отримати підсилення по напрузі, тому використовуються значно рідше.

Статичні характеристики біполярних транзисторів. Статичним режимом роботи транзистора називається режим за відсутності навантаження у вихідному колі. Статичними характеристиками транзисторів називають графічно виражені залежності напруги і струму вхідного кола (вхідні ВАХ) і вихідного кола (вихідні ВАХ). Вид характеристик залежить від способу вмикання транзистора.

Таблиця 2.2. Параметри основних схем увімкнення транзисторів.

Параметр	Схема увімкнення		
	СЕ	СБ	СК
Вхідний опір, R_{BX}	200...2000 Ом	50...100 Ом	10...500 кОм
Вихідний опір, $R_{ВИХ}$	30...70 кОм	0,1...1,0 МОм	50...1000 Ом
Коефіцієнт підсилення за напругою, K_U	30...1000	30...400	≈ 1
Коефіцієнт підсилення за струмом, K_I	10...200	≈ 1	10...200
Коефіцієнт підсилення за потужністю, K_P	3000...30000	30...400	10...200
Фазовий зсув між $U_{ВИХ}$ і $U_{ВХ}$, φ	180°	0	0

Статичні характеристики транзистора, увімкненого за схемою з СЕ.

Вхідною характеристикою є залежність (рисунок 2.36, а) $I_B = f(U_{BE})$ при $U_{KE} = \text{const}$.

Вихідною характеристикою є залежність (рисунок 2.36, б) $I_K = f(U_{KE})$ при $I_B = \text{const}$.

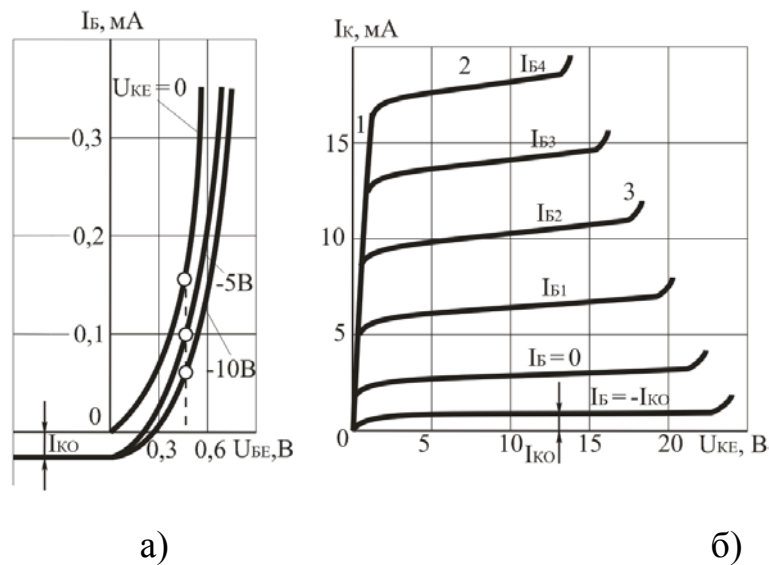


Рисунок 2.36. Статичні характеристики біполярного транзистора, увімкненого за схемою з СЕ: а - вхідна; б - вихідна.

Вихідні ВАХ мають три характерні області: 1 – сильна залежність I_K від U_{KE} ; 2 – слабка залежність I_K від U_{KE} ; 3 – пробій колекторного переходу. Особливістю характеристик в області 2 є їх невеликий підйом при збільшенні напруги U_{KE} .

На основі вхідних та вихідних характеристик визначають h параметри транзисторів та проводять вибір їх оптимального режиму роботи.

Основні параметри біполярних транзисторів.

Для аналізу і розрахунку електричних кіл з біполярними транзисторами

використовують так звані h – параметри транзистора. В систему h – параметрів входять наступні величини:

1. Вхідний опір - $h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1$ при $U_2 = \text{const}$ є опором транзистора змінному вхідному струму при короткому замиканні на виході, тобто за відсутності вихідної змінної напруги.

2. Коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою - $h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2$ при $I_1 = \text{const}$ показує, яка частина вихідної змінної напруги передається на вхід транзистора внаслідок зворотного зв'язку в ньому.

3. Коефіцієнт посилення за струмом (коефіцієнт передачі струму) - $h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1$ при $U_2 = \text{const}$

показує посилення змінного струму транзистором в режимі роботи без навантаження.

4. Вихідна провідність - $h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2$ при $I_1 = \text{const}$ є провідністю для змінного струму між вихідними затискачами транзистора.

5. Вихідний опір $R_{\text{вих}} = 1/h_{22}$.

Електричний стан транзистора, увімкненого за схемою з СЕ, характеризується величинами I_B , I_{BE} , I_K , U_{KE} . Для схеми з спільним емітером справедливі наступні рівняння:

$$h_{11E} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B \quad \text{при} \quad U_{KE} = \text{const};$$

$$h_{12E} = \Delta U_{BE} / \Delta U_{KE} \quad \text{при} \quad I_B = \text{const};$$

$$h_{21E} = \Delta I_K / \Delta I_B \quad \text{при} \quad U_{KE} = \text{const};$$

$$h_{22E} = \Delta I_K / \Delta U_{KE} \quad \text{при} \quad I_B = \text{const}.$$

Режими роботи біполярних транзисторів. Біполярний транзистор може працювати в трьох основних режимах, що визначаються полярністю напруги на емітерному та колекторному переходах.

При роботі транзистора в активному режимі емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному.

У режимі відтинання (закритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у зворотному напрямку (обидва р-n- переходи закриті).

У режимі насичення (відкритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у прямому напрямку (обидва р-n- переходи відкриті).

Режим роботи, у якому транзистор тривалий час знаходиться в режимах відтинання або насичення, називається ключовим режимом. У активному режимі транзистор працює як підсилювач сигналу, тобто виконує функцію активного елемента електричної схеми (посилення, генерування і т.п.).

Біполярні транзистори є напівпровідниковими приладами універсального призначення і широко застосовуються в різних підсилювачах, генераторах, в імпульсних і ключових пристроях.

Динамічним режимом роботи транзистора називається такий режим, при якому у вихідному колі стоїть навантажувальний резистор, а зміна вхідного струму або напруги буде викликати зміну вихідної напруги.

Розглянемо роботу транзистора, ввімкненого за найбільш поширеною схемою з СЕ, в динамічному режимі (рисунок 2.37). В цій схемі напруга джерела живлення E_k ділиться між ділянкою колектор – емітер (виходом схеми) і навантажувальним опором R_k . За другим законом Кірхгофа:

$$E_k = U_{RK} + U_{KE},$$

$$\text{де } U_{RK} = I_k \cdot R_k; \quad U_{KE} = E_k - I_k \cdot R_k$$

Рівняння динамічного режиму є рівнянням вихідної динамічної характеристики. Так як це рівняння лінійне, вихідна динамічна характеристика являє собою пряму лінію й будується на вихідних статичних характеристиках (рисунок 2.37б). Вихідна динамічна характеристика АВ одержала назву навантажувальної прямої і будується за двома точками.

Точка А перетину навантажувальної прямої з віссю струмів співпадає з точкою, для якої виконується умова:

$$I_k = E_k / R_k, \text{ при } U_{KE} = 0$$

Точка В перетину навантажувальної прямої з віссю струмів співпадає з точкою, в якій напруга на колекторі визначається умовою:

$$U_{KE} = E_k, \text{ при цьому } I_k = 0.$$

Точка перетину навантажувальної прямої з однієї з віток вихідної статичної характеристики для заданого струму бази називається робочою точкою транзистора (РТ). Робоча точка дозволяє визначати струми й напруги, що реально існують у схемі.

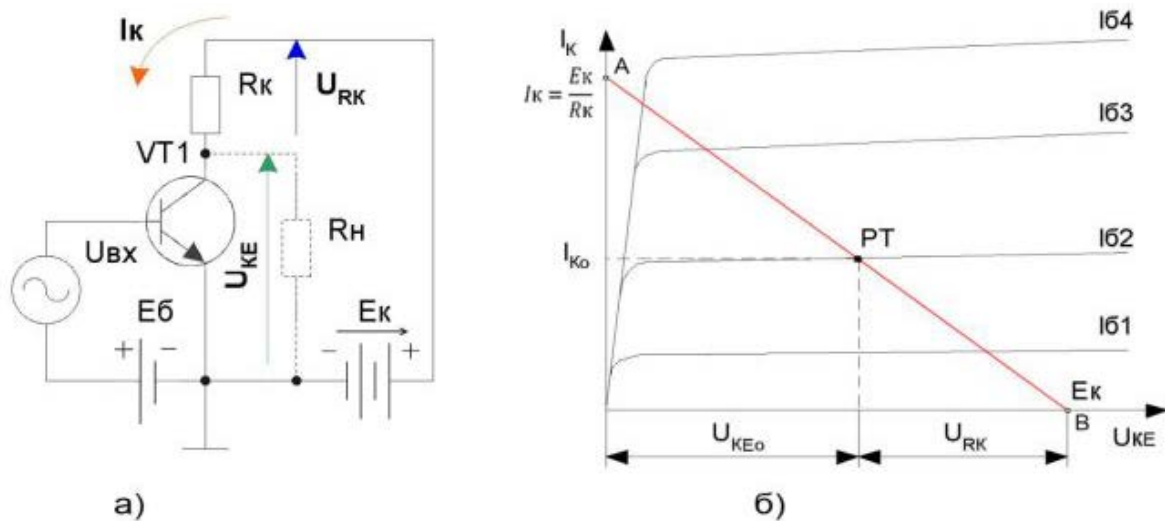


Рисунок 2.37. Динамічний режим роботи транзистора: а – схема ввімкнення; б – динамічна характеристика на сімействі статичних вихідних характеристик.

Контрольні запитання

1. Поясніть призначення та принцип дії біполярних транзисторів.
2. Поясніть, за якими ознаками класифікують біполярні транзистори?
3. Назвіть основні типи біполярних транзисторів та наведіть їх умовне графічне позначення.
4. Назвіть та наведіть схеми вмикання біполярних транзисторів.
5. Наведіть вольт-амперні характеристики біполярного транзистора при вмиканні за схемою із спільною базою, із спільним емітером, із спільним колектором.
6. Назвіть h - параметри біполярного транзистора і поясніть як вони визначаються.
7. Назвіть режими роботи біполярних транзисторів.

2.5. Пільові транзистори.

Пільовий транзистор – це електроперетворювальний прилад, в якому струм, що протікає через канал, керується електричним полем, яке виникає при прикладенні напруги між затвором і витоком, і який призначений для підсилення потужності електромагнітних коливань.

До класу пільових відносять транзистори, принцип дії яких заснований на використанні носіїв заряду тільки одного знаку (електронів або дірок). Керування струмом в пільових транзисторах здійснюється зміною провідності каналу, через який протікає струм транзистора під впливом електричного поля. Внаслідок цього транзистори називають пільовими.

Виділяють два різновиди пільових транзисторів:

- з керуючим р-п переходом (канальні транзистори);
- з ізольованим затвором.

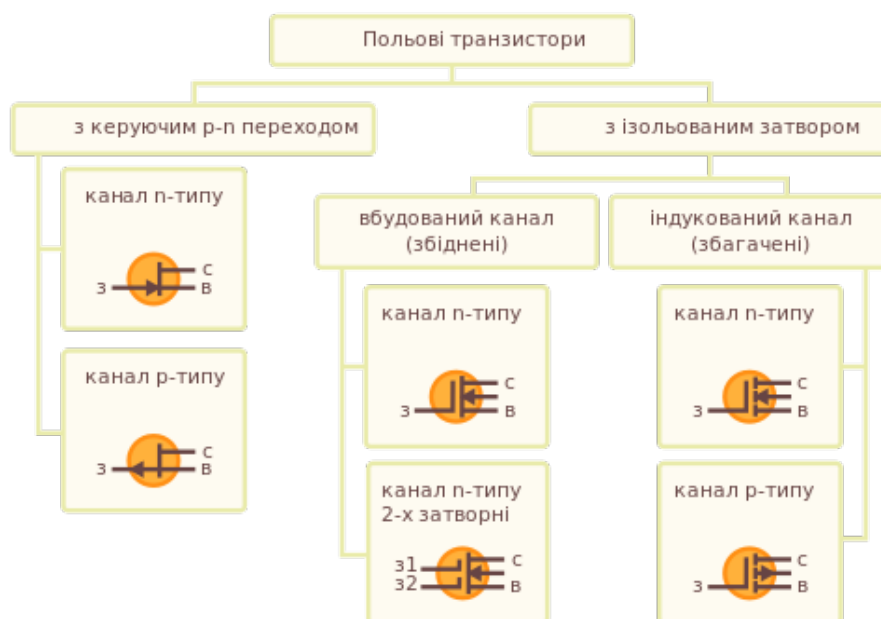


Рисунок 2.38. Типи та умовні позначення пільових транзисторів.

Характерною особливістю всіх пільових транзисторів є високий вхідний опір за постійним струмом ($10^8 \dots 10^{10}$ Ом). У цьому полягає найважливіша відмінність пільового транзистора від біполярного. Тому інколи кажуть, що пільовий транзистор

– це прилад, що керується напругою (електричним полем), а біполярний транзистор – прилад, що керується струмом.

Польовий транзистор з керуючим р-п переходом – це напівпровідниковий прилад, в якому струм створюється тільки основними носіями зарядів під дією повздовжнього електричного поля. Керування цим струмом здійснюється поперечним електричним полем, яке створюється напругою, що прикладена до керуючого електроду.

Виділяють два типи польових транзисторів з р-п переходом:

- з р-каналом;
- з n-каналом.

На рисунку 2.39 приведена будова і умовно-графічне позначення польових транзисторів з р та n-каналами. Канал протікання струму являє собою шар напівпровідника n або р-типу і розташований між двома р-п переходами. Канал має контакти із зовнішніми електродами. Електрод (вивід), від якого витікають основні заряди називається виток(В), а електрод до якого вони стікаються (рухаються), називається стоком(С). На бічні поверхні каналу наносять шар напівпровідника з протилежним (в порівнянні з каналом) типом провідності. Обидва шари електрично з'єднані і мають зовнішній електрод, що називається затвором (З) або керуючим електродом. Між затвором і каналом виникають два р-п переходи (затвор має підвищену концентрацію основних носіїв).

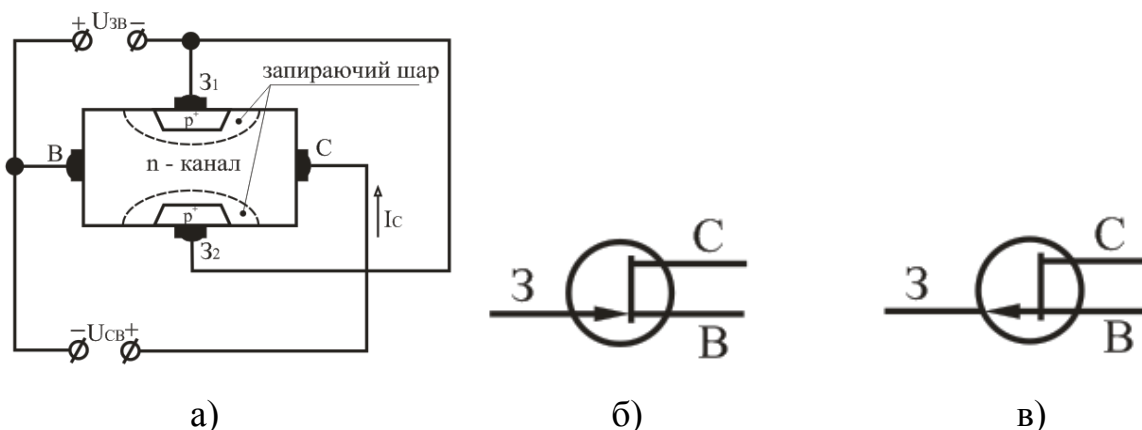


Рисунок 2.39. Польовий транзистор: а - будова ПТ з керуючим р-п переходом (каналом n-типу); б - умовне позначення ПТ з каналом n-типу; в - умовне позначення з каналом р-типу.

Принцип дії польових транзисторів з n і p -каналом аналогічні і відрізняються лише полярністю напруги джерел живлення. Принцип дії транзистора розглянемо на прикладі транзистора з n-каналом. Вхідна (керуюча) напруга $U_{зв}$ подається між затвором і витокком. При чому на затвор подається зворотна, щодо витокку напруга (зворотне ввімкнення p-n переходів). Вихідна напруга $U_{св}$ подається між стоком і витокком і створює в каналі повздовжнє електричне поле, за рахунок якого через канал рухаються основні носії зарядів (електрони), створюючи струм стоку I_c . При зміні вхідної напруги $U_{зв}$ змінюється ширина p-n переходів, при цьому змінюється переріз каналу, а отже його провідність і відповідно вихідний струм стоку I_c . Розглянемо наступні випадки:

- При відсутності напруги на затворі p-n переходи закриті власним внутрішнім полем, ширина їх мінімальна, ширина каналу максимальна і струм стоку буде максимальний, тобто:
 $U_{зв} = 0 ; I_{c1} = I_c \max$
- При збільшенні закриваючої напруги на затворі ширина p-n переходів збільшується, а ширина каналу і струм стоку зменшується:
 $|U_{зв}| > 0 ; I_{c2} < I_{c1}$
- При досить великих напругах на затворі ширина p-n переходів може збільшитися настільки, що вони перекриються, струм стоку стане рівний нулеві:
 $|U_{зв}| \gg 0 ; I_{c3} = 0$

Напруга на затворі при якій струм стоку наблизений до нуля, називають напругою відтинання $U_{зв \text{ відт.}}$.

На провідність каналу польового транзистора з керуючим p-n переходом впливає як напруга $U_{зв}$ так і напруга $U_{св}$. Зміна напруги на затворі $U_{зв}$ при $U_{св} = 0$ приводить до зміни провідності каналу за рахунок зміни його перерізу, причому величина перерізу вздовж всього каналу однакова. Так як $U_{св} = 0$, то вихідний струм $I_c = 0$. Якщо напруга на затворі відсутня ($U_{зв} = 0$), то при $U_{св} > 0$ через канал протікає струм I_c . Внаслідок цього виникає спад напруги, що зростає у напрямку стоку. Відповідно, потенціали точок каналу вздовж нього неоднакові: зростають у напрямку стоку від нуля до $U_{св}$. Потенціали точок p-області відносно витокку визначається потенціалом затвора відносно витокку (в даному випадку рівний нулеві). А тому, прикладена до p-n

переходів зворотна напруга, зростає у напрямку витік-стік і р-п переходи розширюються у напрямку стоку. Це приводить до зменшення ширини каналу. Підвищення напруги $U_{св}$ викликає збільшення спаду напруги у каналі і подальше зменшення його ширини, а отже і провідності каналу. При деякому значенні напруги $U_{св}$ звуження каналу настає до його перекриття. Наступає стан, при якому зростає опір каналу, що приводить до обмеження і зупинки росту струму I_c (режим насичення).

Характеристики і параметри польових транзисторів.

Для оцінки польового транзистора як активного елемента електронних схем використовують стік-затворні і стокові статичні характеристики. Стік-затворні (вхідні) характеристики, відображають залежність струму стоку від напруги на затворі при фіксованій напрузі стік – витік:

$$I_c = f(U_{зв}) \mid U_{св} = \text{const}$$

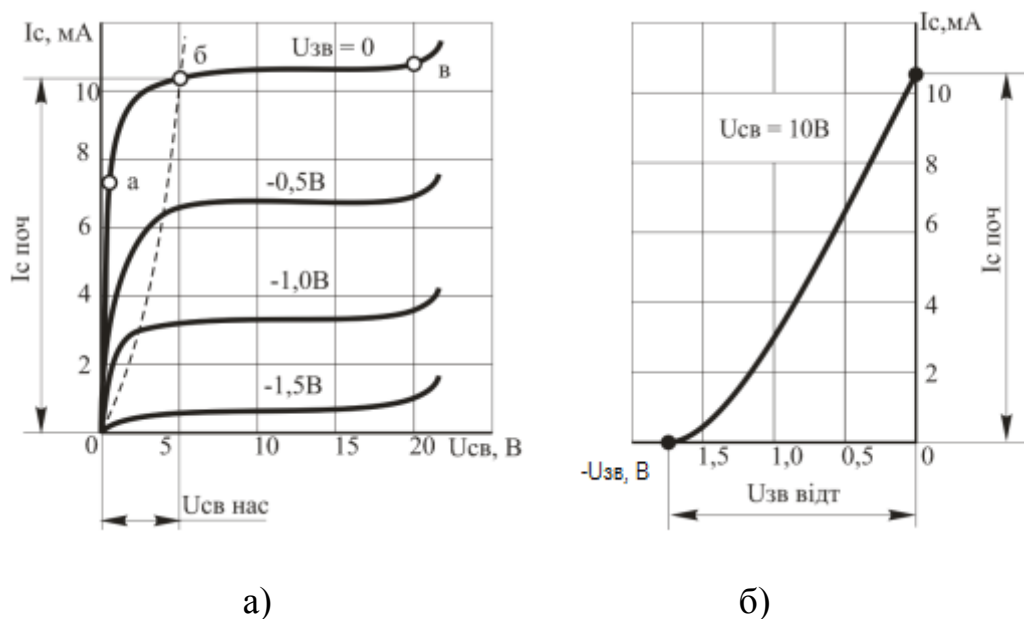


Рисунок 2.40. Вольт-амперні характеристики польового транзистора з р-п-переходом і каналом п-типу: а – стікові (вихідні); б – стік-затворна (вхідна).

Стокзатворна характеристика дозволяє визначити напругу відсікання (відтинання) $U_{відт}$, при якій струм стоку стає рівним нулеві, та початковий струм стоку $I_{с.поч.}$, що протікає через канал при $U_{зв}=0$

Стокові (вихідні) характеристики відображають залежність струму стоку від напруги на стоці відносно витоку при фіксованій напрузі на затворі:

$$I_c = f(U_{св}) \mid U_{зв} = \text{const}$$

Основні параметри

- максимальний струм стоку $I_{C \text{ MAX}}$ (при $U_{зв} = 0$);
- максимальна напруга стік-витік $U_{св \text{ MAX}}$;
- напруга відтинання $U_{зв \text{ відт}}$;
- внутрішній (вихідний) опір r_i – являє собою опір транзистора між стоком і витоком (опір каналу) для змінного струму. Вхідний опір польових транзисторів з р-n-переходом досить великий (досягає одиниць і десятків мегом), що вигідно відрізняє їх від біполярних транзисторів.

Польовий транзистор з ізолюваним затвором (МДН - транзистор) – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу шаром діелектрика. МДН - транзистори (структура: метал-діелектрик-напівпровідник) виконують з кремнію. Як діелектрик, використовують оксид кремнію SiO_2 . Звідси інша назва цих транзисторів – МОН – транзистори (структура: метал-окисел-напівпровідник). Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір даних транзисторів ($10^{12} - 10^{14}$ Ом).

Принцип дії МДН - транзисторів заснований на ефекті зміни провідності приповерхневого шару напівпровідника на межі з діелектриком під впливом поперечного електричного поля. Приповерхневий шар напівпровідника є струмопровідним каналом цих транзисторів. МДН - транзистори виконують двох типів – з вбудованим та з індукованим каналом.

Наявність шару діелектрика МДН - транзисторів з вбудованим каналом дозволяє в такому польовому транзисторі подавати на затвор керуючу напругу обох полярностей. При прикладенні до затвору позитивної напруги, електричним полем, яке при цьому створюється, канал збагачується основними носіями заряду – електронами, його провідність збільшується і струм стоку зростає. Цей режим називають режимом збагачення. При прикладенні до затвору від'ємної напруги відносно витоку, в каналі

створюється електричне поле, канал збіднюється основними носіями заряду, його провідність зменшується і струм стоку зменшується. Такий режим роботи транзистора називають режимом збіднення. У таких транзисторах при $U_{зв} = 0$, якщо прикласти напругу між стоком і витком ($U_{св} > 0$), протікає початковий струм стоку $I_{с\text{ поч}}$, що являє собою потік електронів.

МДН - транзистори з індукованим каналом відрізняється від попереднього тим, що за відсутності напруги на затворі канал відсутній, так як n-області витoku і стоку утворюють з p -підкладкою два p-n-переходи, включені назустріч один одному, і значить, при будь-якій полярності напруги $U_{св}$ один з переходів замкнений. Польові транзистори з індукованим n-каналом (n-МОП-транзистори), на відміну від розглянутих раніше польових транзисторів, управляються тільки позитивним сигналом $U_{зв}$. Відмінність стокових характеристик полягає в тому, що управління струмом транзистора здійснюється напругою однієї полярності, співпадаючої з полярністю напруги $U_{св}$. Струм $I_{с} = 0$ при $U_{зв} = 0$.

Основні параметри МДН – транзисторів аналогічні параметрам польових транзисторів з керованим p-n-переходом. Що стосується вхідного опору то МДН - транзистори мають кращі показники, ніж транзистори з керованим p-n-переходом. Вхідний опір у них складає $r_{вх} = 10^{12} - 10^{14}$ Ом.

Польові транзистори застосовуються в підсилювальних каскадах з великим вхідним опором, ключових і логічних пристроях, при виготовленні інтегральних схем та ін.

Схеми вмикання польових транзисторів. Польовий транзистор можна вмикати за однією з трьох основних схем: з спільним витком (СВ), спільним стоком (СС) і спільним затвором (СЗ) (рисунок 2.41).

На практиці найчастіше застосовується схема з СВ, аналогічна схемі на біполярному транзисторі з СЕ. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі, увімкненого за схемою з СВ дає дуже велике посилення струму і потужності. Схема з СЗ аналогічна схемі з СБ. Вона не дає посилення струму, і тому посилення потужності в ній в багато разів менше, ніж в схемі з СВ. Каскад з СЗ має низький вхідний опір, у зв'язку з чим він має обмежене практичне застосування.

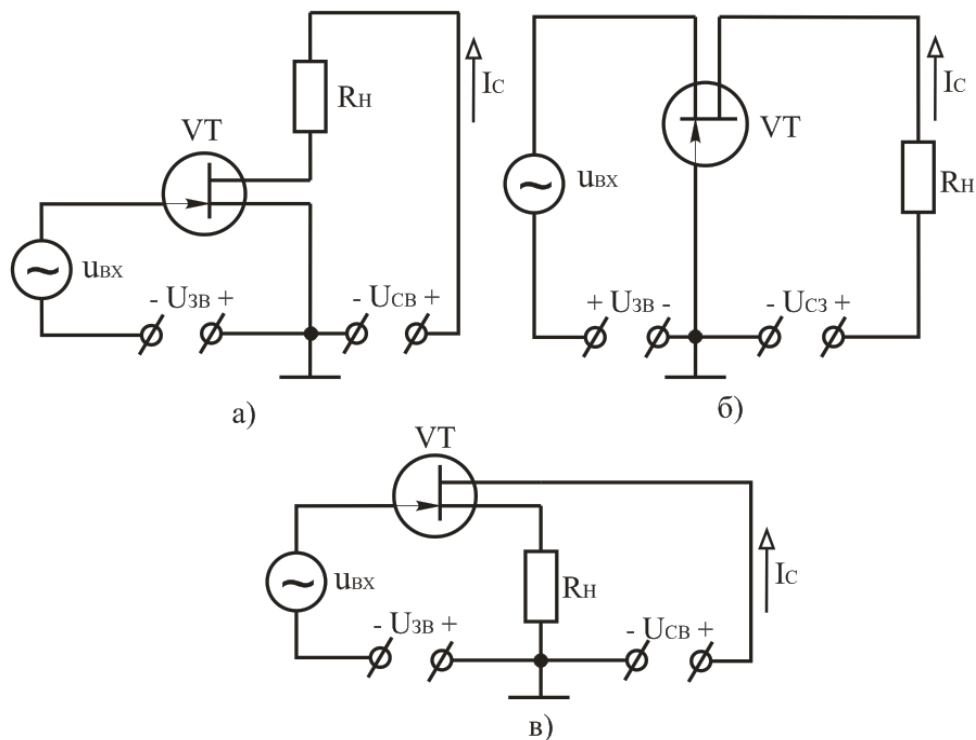


Рисунок 2.41 – Схеми вмикання польового транзистора а – з спільним витоком; б – з спільним затвором; в – з спільним стоком.

Незалежно від типу польові транзистори на принципових електричних схемах мають умовне літерне позначення VT. Для знайомства з призначенням, маркуванням виводів та параметрами транзисторів доцільно скористатися довідниками, каталогами, детальним описом (datasheet).

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення польового транзистора. Які є різновиди польових транзисторів? Поясніть їх будову і принцип дії, наведіть умовні графічні позначення.
2. У чому полягає відмінність між біполярними та польовими транзисторами?
3. У чому особливість МДН- (МОН-) транзисторів?
4. Назвіть та наведіть схеми вмикання польових транзисторів.
5. Наведіть вольт-амперні характеристики польових транзисторів з керованим р-п-переходом, МДН - транзисторів.

2.6. Інтегральні мікросхеми.

Інтегральна мікросхема – це мікроелектронний виріб, що виконує певну функцію перетворення та обробки сигналу і має не менше п'яти елементів (транзисторів, діодів, резисторів, конденсаторів), які неподільно зв'язані і електрично з'єднані між собою так, що пристрій розглядається як єдине ціле.

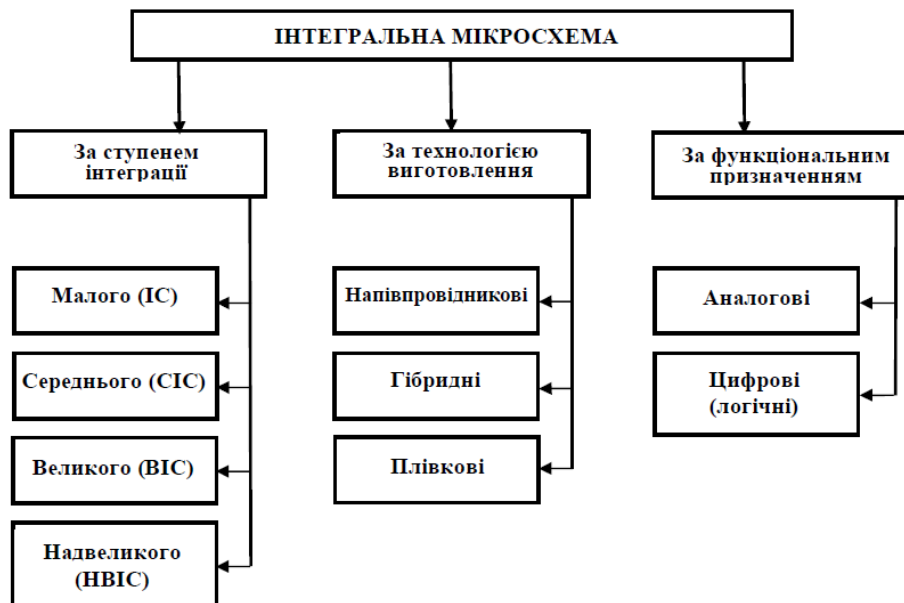


Рисунок 2.42 Класифікація інтегральних мікросхем.

З погляду інтеграції, тобто об'єднання багатьох елементів електронної схеми в одному монокристалі напівпровідника, основними параметрами інтегральних мікросхем є щільність упакування і ступінь інтеграції. Щільність упакування – це число елементів електронної схеми в одному кубічному сантиметрі об'єму інтегральної мікросхеми. Ступінь інтеграції визначається кількістю елементів, що входять до складу інтегральної мікросхеми: якщо ІМС містить до 10 елементів, то її називають інтегральною мікросхемою малого ступеня інтеграції; від 10 до 100 – середнього ступеня; від 100 до 1000 – великого ступеня; більше 1000 – надвеликого ступеня інтеграції.

За конструктивно-технологічною ознакою ІМС розділяють на напівпровідникові, гібридні та плівкові.

Гібридна ІМС – це інтегральна мікросхема, пасивні елементи якої виконані за допомогою нанесення різних плівок на поверхні діелектричної підкладки зі скла, кераміки, а активні елементи – навісні напівпровідникові прилади без корпусів. Щільність упакування гібридних інтегральних мікросхем до 150 ел./см^3 , а ступінь інтеграції звичайно середній і малий.

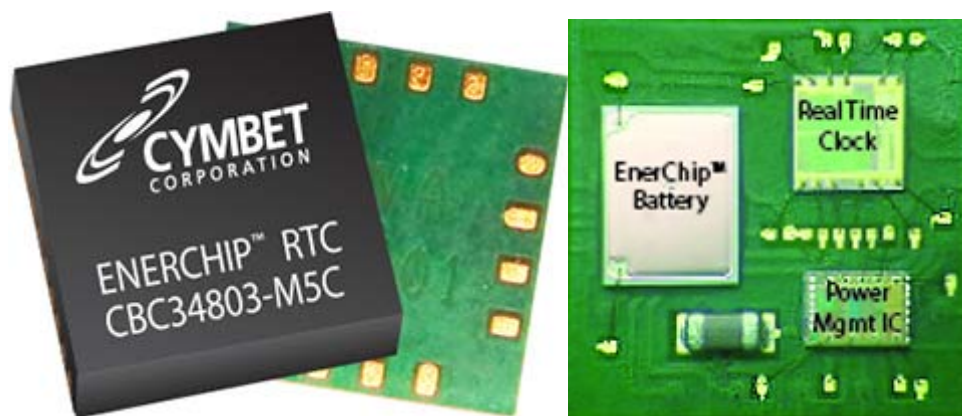


Рисунок 2.43. Гібрида мікросхема, зовнішній вигляд та будова.

Напівпровідникова ІМС – це інтегральна мікросхема, всі елементи і міжелементні з'єднання якої виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідника. Щільність упакування напівпровідникових інтегральних мікросхем до 10^4 ел./см^3 , ступінь інтеграції – великий та надвеликий. Лінійні розміри окремих елементів напівпровідникових ІМС можуть бути дуже малі (близько 2 мкм), а відстань між окремими елементами близько 5 мкм.

В напівпровідникових інтегральних мікросхемах як активний елемент застосовують біполярний або польовий МДН - транзистор. Відповідно до цього напівпровідникові мікросхеми підрозділяють на біполярні і МДН - мікросхеми.

Основні переваги напівпровідникових ІМС – це мала потужність, що споживається (до 200 мВт, а для логічних ІМС – до 100 мкВт), а також висока тривалість роботи – до 10^8 годин.

За функціональним призначенням ІМС підрозділяють на дві групи: логічні (цифрові) та аналогові (лінійно - імпульсні). На принципових електричних схемах літерне позначення мікросхем складається з літери D. Друга літера вказує вид

елемента, наприклад DA – інтегральна аналогова мікросхема; DD - інтегральна цифрова мікросхема.

Цифрові ІМС призначені для перетворення або обробки дискретних сигналів, виражених у двійковому або іншому цифровому коді - логічні елементи, тригери, лічильники, регістри, шифратори, цифровий компаратор, суматори, ключі, мікроконтролери, мікропроцесори.

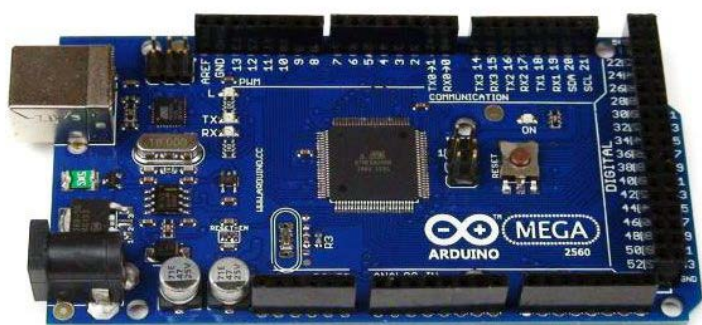


Рисунок 2.44. Плата ардуіно з мікроконтролером АТmega2560

Аналогові ІМС призначені для перетворення або обробки безперервних (аналогових) сигналів – це операційні підсилювачі, компаратори, генератори сигналів, фільтри, стабілізатори напруги і струму, мікросхеми управління імпульсних блоків живлення, перетворювачі сигналів, різні датчики.

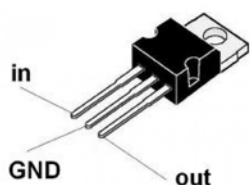


Рисунок 2.45. Стабілізатор напруги КР142ЕН8Б

До основних параметрів аналогових мікросхем відносяться:

- напруга живлення $U_{\text{ж}}$;
- коефіцієнт підсилення за напругою K_U ;
- вхідний опір $R_{\text{вх}}$;
- вихідний опір $R_{\text{вих}}$;

- максимальна вихідна напруга $U_{\text{вих max}}$;
- робочий частотний діапазон $f_{\text{н}}$ та $f_{\text{в}}$,
де $f_{\text{н}}$ та $f_{\text{в}}$ – відповідно нижня і верхня робочі частоти;
- потужність, що споживається елементом від джерела живлення $P_{\text{спож}}$.

До основних параметрів цифрових мікросхем відносяться:

- напруга живлення $U_{\text{ж}}$;
- час переходу ІМС зі стану логічного нуля в стан логічної одиниці t^{01} ;
- напруга логічного нуля U^0 ;
- напруга логічної одиниці U^1 ;
- потужність, що споживається від джерела живлення $P_{\text{спож}}$;
- коефіцієнт об'єднання по входу $K_{\text{об}}$ – число входів ІМС, по яких реалізується логічна функція;
- завадостійкість $U_{\text{зав}}$ – найбільша напруга перешкоди на вході ІМС, що не викликає порушення правильності її роботи.

Цифрові та аналогові інтегральні мікросхеми використовують в засобах автоматики, в пристроях промислової електроніки і обчислювальній техніці, в радіоапаратурі та ін.

Для більш детального знайомства з будовою, призначенням, параметрами, структурною, функціональною та схемою підключень мікросхем доцільно скористатися довідниками, каталогами, детальним описом (datasheet). Наприклад, в детальному описі мікросхеми КР142ЕН8Б (рисунок 2.45) вказано, що мікросхема є лінійним стабілізатором позитивної напруги. Він використовується в радіоелектронних пристроях в складі джерел живлення для стабілізації напруги живлення. Мікросхема виготовлена в корпусі ТО-220. Розташування виводів: 1 – вхід; 2 – загальний, 3 – вихід. Стабілізатор має вбудований захист від перегріву, обмежувач струму КЗ.

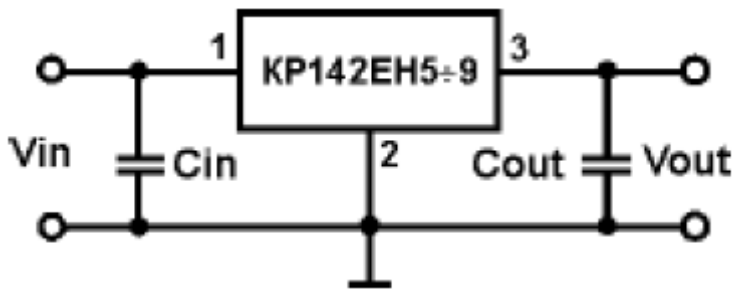


Рисунок 2.46. Типова схема включення.

Основні параметри:

- Вихідна номінальна напруга – 12В
- Вихідна мінімальна напруга – 11,64В
- Вихідна максимальна напруга – 12,36В
- Вихідний максимальний струм – 1,5А
- Коефіцієнт нестабільності напруги – 0,05%
- Коефіцієнт нестабільності струму – 1%
- Робочий діапазон температур кристалу $-45\dots+125^{\circ}\text{C}$

Контрольні запитання

1. Поясніть поняття інтегральної схеми.
2. Як поділяються ІМС за кількістю елементів?
3. Як поділяються мікросхеми за технологією виготовлення?
4. Як поділяються мікросхеми за функціональним призначенням?
5. Наведіть основні параметри аналогових ІМС.
6. Наведіть основні параметри цифрових ІМС.
7. Що можна віднести до недоліків ІМС?
8. У чому полягають переваги інтегральних мікросхем перед електронними пристроями на дискретних елементах?

2.7. Мікропроцесори.

Мікропроцесор - інтегральна схема, яка виконує функції центрального процесора (ЦП), що призначений для виконання команд мови машинної програми. Основною функцією є обробка даних по заданій програмі шляхом виконання арифметичних і логічних операцій - програмне керування роботою пристроїв або спеціалізованого процесора. Сьогодні слово мікропроцесор є практично повним синонімом слова процесор, оскільки функціональний блок, що на ранніх стадіях розвитку обчислювальної техніки займали цілу плату чи навіть шафу, тепер вміщається в одну невеличку інтегральну схему із сотнями мільйонів транзисторів всередині. З середини 1980-х мікропроцесори витіснили інші види ЦП. Першим загальнодоступним мікропроцесором був 4-розрядний Intel 4004.

Є два основні напрями розвитку індустрії виробництва мікропроцесорів. Перше - розробка архітектури, що включає вибір тих або інших функцій і особливостей майбутніх схем, мікросхемотехніку і компоновку на кристалі функціональних блоків і їхніх елементів, що втілюють вибрані функції. Другий основоположний напрям - це власне напівпровідникові технології виробництва мікросхем. Сюди входять наукова розробка і втілення в «кремній» все швидших і менших транзисторів, ланцюгів зв'язку між ними і іншим «обрамленням» мікроструктур на кристалі, створення технологій виготовлення малюнка ліній і транзисторів на поверхні кремнію, нових матеріалів і устаткування для цього, а також «manufacturability» - область знань про те, як створити мікросхеми вищої якості, швидші, з великою кількістю придатних кристалів на пластині, меншим числом дефектів і розкидом робочих параметрів.



Рисунок 2.47. Сучасний мікропроцесор Intel Core i7 2600K Socket LGA1155, вигляд зверху.

З погляду програмістів, під архітектурою процесора мається на увазі його здатність виконувати певний набір машинних кодів. Більшість сучасних десктопних процесорів відносяться до сімейства x86, або Intel-сумісних процесорів архітектури (архітектура 32, 64- бітових процесорів Intel). Її основа була закладена компанією Intel в процесорі i8086, проте в подальших поколіннях процесорів вона була доповнена і розширена як самою Intel (введені нові набори команд MMX, SSE, SSE2 і SSE3), так і сторонніми виробниками (набори команд EMMX, 3DNow! і Extended 3DNow!, розроблені компанією AMD).

В рамках однієї і тієї ж архітектури різні процесори можуть досить сильно відрізнятися один від одного. І відмінності ці утілюються в різноманітних процесорних ядрах, що володіють певним набором суворо обумовлених характеристик. Найчастіше ці відмінності втілюються в різних частотах системної шини (FSB), розмірах кеша другого рівня, підтримці тих або інших нових систем команд або технологічних процесах, за якими виготовляються процесори. Перший багатоядерний процесор створила Rockwell у 1984 році, об'єднавши два ядра R6502B. У 2005 році з'явилися перші двоядерні мікропроцесори архітектури x86 - Intel Pentium D та AMD Athlon 64 X2. До того часу класичні одноядерні CPU певною мірою вичерпали резерви зростання продуктивності за рахунок підвищення робочої частоти. Каменем спотикання стало не тільки дуже високе тепловиділення процесорів, що працюють на високих частотах, але і проблеми з їхньою стабільністю. Отже, екстенсивний шлях розвитку процесорів вичерпався і виробникам довелося освоювати новий, інтенсивний шлях підвищення продуктивності продукції.

Типова структура мікропроцесора наведена на рисунку 2.48. В загальному випадку можна виділити три основні блоки: арифметико-логічний пристрій, блок внутрішніх реєстрів і пристрій керування. Для передачі даних між цими блоками використовується внутрішня шина даних. Внутрішня шина даних безпосередньо приєднана до шини даних МП-системи.

Перелік функцій арифметико-логічного пристрою (АЛП) залежить від типу МП. Основу АЛП складає двійковий суматор, реєстри для тимчасового зберігання операндів – буферні реєстри, та логічні схеми для виконання логічних операцій.

В більшості мікропроцесорів цей пристрій виконує за керуючими сигналами кілька найпростіших операцій: додавання, віднімання, збільшення на 1 (додатне збільшення – інкрементування і від’ємне – декрементування), зсув даних вліво і вправо, інверсію, логічне додавання (АБО), логічне множення (І), додавання за модулем 2.

Важлива складова частина МП – реєстри: реєстр-акумулятор (РГА). Більшість арифметичних і логічних операцій здійснюється через використання АЛП і акумулятора. Будь-яка з таких операцій над словами даних (операндами) передбачає розміщення одного з них в РГА, а іншого в пам’яті або в одному з реєстрів МП. Результат виконання операції розміщується в РГА, попередній вміст якого втрачається.); лічильник команд (РГліч). Лічильник команд забезпечує формування адреси чергової команди, що записана в пам’яті)); реєстр адреси (Ргадр) містить адресу вічка пам’яті і має вихід безпосередньо на шину адрес МП-системи. При кожному звертанні до пам’яті МП-системи Ргадр вказує адресу вічка, вміст якого передбачається використати мікропроцесором, незалежно від того, чи то адреса команди або адреса даного)). Деякі реєстри мають спеціальне призначення, інші – багатоцільове. Останні називаються реєстрами загального призначення (Ргзп) і можуть використовуватись в програмуванні. АЛП може здійснювати операції над вмістом Ргзп без виходу на зовнішні шини адрес і даних і ці операції здійснюються набагато швидше, ніж операції над даними, що зберігаються в пам’яті. Тому іноді реєстри загального призначення називають надоперативною пам’яттю.

Пристрій керування управляє роботою АЛП і внутрішніх реєстрів в процесі виконання команди. Згідно з кодом операції, що знаходиться в команді, він формує внутрішні сигнали керування блоками мікропроцесора. Більшість пристроїв керування реалізовані за принципом мікропрограмного керування. Кожна команда, що входить до репертуару команд мікропроцесора, виконується не миттєво, а поступово такт за тактом в суворій послідовності, що визначається кодом команди і синхронізується в часі сигналами тактового генератора. За кожним тактом виконується певні елементарні дії, під час яких реєстри МП змінюють свій вміст. Тактність підтримується тактовими синхронізуючими імпульсами, які надходять до пристрою керування із зовнішнього генератора

імпульсів тактової частоти. Послідовність певних дій, що виконуються за кожним тактом при виконанні певної команди, визначається мікропрограмою виконання команди. Мікропрограма складається з мікрокоманд. Виконання мікрокоманди призводить до утворення певного керуючого сигналу, який надходить до задіяного в цій мікрокоманді блоку МП або до шини керування МП-системи. Мікропрограми зберігаються в постійній пам'яті пристрою керування. Отже можна сказати, що мікропрограмний пристрій керування уявляє собою деякий процесор в мікропроцесорі, який реалізує певний алгоритм виконання команди.

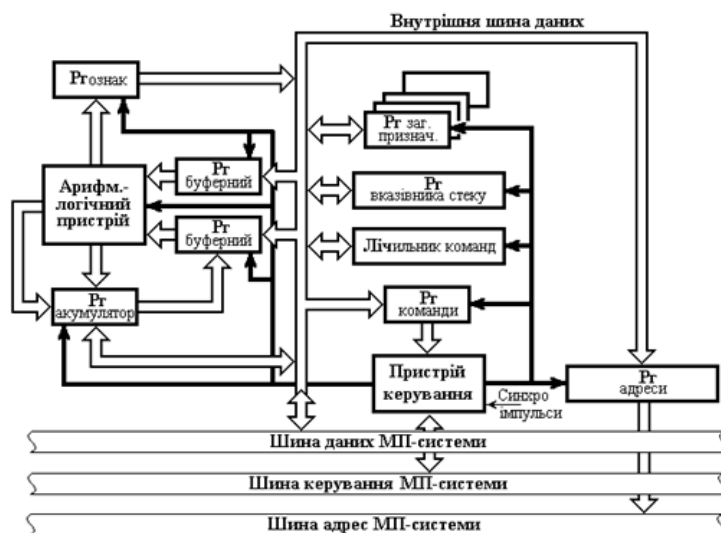


Рисунок 2.48. Типова структурна схема мікропроцесора

Для керування технологічними процесами в різних галузях широкого розповсюдження здобули мікроконтролери. **Мікроконтролер**, або однокристальна мікроЕОМ - виконана у вигляді мікросхеми спеціалізована мікропроцесорна система, що включає мікропроцесор, блоки пам'яті для збереження коду програм і даних, порти вводу-виводу і блоки зі спеціальними функціями (лічильники, компаратори, АЦП та інші). Вони призначені для керування різноманітними електронними пристроями. По суті, це - однокристальний комп'ютер, здатний виконувати прості завдання. Використання однієї мікросхеми значно знижує розміри, енергоспоживання і вартість пристроїв, побудованих на базі мікроконтролерів. Мікроконтролери можна зустріти в багатьох сучасних приладах, таких як телефони, пральні машини, вони відповідають за роботу двигунів і систем гальмування сучасних автомобілів, з їх допомогою створюються системи контролю і системи збору інформації. Більшість процесорів, що випускаються у світі - мікроконтролери.

Якщо перекладати слово "мікроконтролер" (англ. «microcontroller») дослівно, то вийде "мініатюрний пристрій, призначений для управління". Тут прийнято до уваги, що термін "control" в англomовних текстах набагато частіше має значення "керувати", ніж "контролювати". На практиці у функції МК входить контроль і управління виробничими процесами, побутовими приладами, спецтехнікою, системами збору інформації, принтерами, факсами, стільниковими телефонами і т.д.

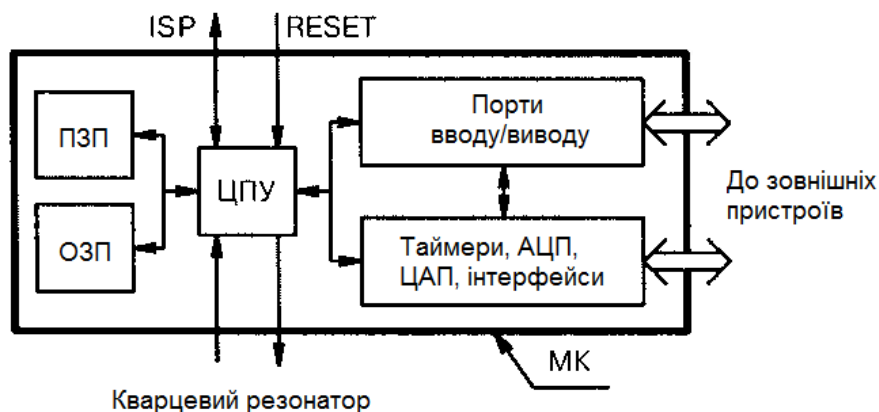


Рисунок 2.49. Структурна схема мікроконтролера.

Якщо до ЦПУ на кристал додати оперативне і постійне запам'ятовуючі пристрої (ОЗП, ПЗП), таймери, лічильники, аналого-цифрові і цифроаналогові перетворювачі (АЦП, ЦАП), інтерфейсні вузли та порти вводу/виводу, то мікропроцесор перетвориться на мікроконтролер (рисунок 3). Відповідно до одного з багатьох визначень, мікроконтролер – це спеціалізований мікропроцесор, оснащений приладовими інтерфейсами. Головною відмінністю між мікропроцесором і МК є самодостатність останнього. Наприклад, тактові імпульси виробляє вбудований синхрогенератор, який може працювати як автономно, так і від зовнішнього кварцового резонатора. Порти введення / виводу гнучко перебудовують свої функції і можуть безпосередньо з'єднуватися з датчиками і виконавчими пристроями. Керуюча програма зберігається у внутрішньому, а не в зовнішньому ПЗП. Її легко читати і модифікувати, оскільки сучасні МК містять багато разів перезаписуваний флеш-пам'ять (FLASH). Для програмування звичайно використовується інтерфейс ISP (In-System Programming), який не вимагає вилучення МК з панельки в друкованій платі.

Програмування (розглядається як кодування - реалізація у вигляді програми одного чи кількох взаємопов'язаних алгоритмів контролю та керування з застосуванням мов програмування) мікроконтролерів зазвичай здійснюється на асемблері або Сі, хоча існують компілятори для інших мов.

Для більш детального знайомства з призначенням, параметрами, структурною, функціональною та схемою підключень мікропроцесорів і мікроконтролерів доцільно скористатися довідниками, детальним описом (datasheet).

Загальні характеристики мікроконтролера Arduino Uno. Arduino Uno мікроконтролер побудований на базі мікроконтролера ATmega328. Поняття Arduino має три значення: фізичний пристрій; середовище розробки (програмування); Arduino громада. Пристрої Arduino – являють собою - апаратно обчислювальну платформу для аматорського конструювання систем автоматичного контролю, керування та робототехніки. Основними компонентами даних пристроїв є плата мікроконтролера з елементами вводу/виводу. Середовище розробки Arduino передбачає програмування на мові, що є підмножиною C/C++. Arduino може використовуватися як для створення автономних інтерактивних об'єктів, так і підключатися до програмного забезпечення, яке виконується на комп'ютері (наприклад: Processing, Adobe Flash, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider). Інформація про плату (рисунок друкованої плати, специфікації елементів, програмне забезпечення) знаходяться у відкритому доступі і можуть бути використані тими, хто воліє створювати плати власноруч. призначенні для створення проектів.

Плата Arduino складається з мікроконтролера, а також елементів обв'язки для програмування та інтеграції з іншими пристроями. На багатьох платах наявний лінійний стабілізатор напруги +5В або +3,3В. Тактування здійснюється на частоті 16 або 8 МГц кварцовим резонатором. У мікроконтролер записаний завантажувач (bootloader), тому зовнішній програматор не потрібен. На концептуальному рівні усі сучасні плати програмуються через USB, що можливо завдяки мікросхемі конвертера USB-to-Serial FTDI FT232R. У версії платформи Arduino Uno як конвертер використовується контролер Atmega8 у SMD-корпусі. Дане рішення дозволяє програмувати конвертер таким чином, щоб платформа відразу розпізнавалася як

пристрій за вибором розробника зі всіма необхідними додатковими сигналами керування.

Плати Arduino дозволяють використовувати значну кількість виводів мікроконтролера як вхідні/вихідні контакти у зовнішніх схемах. Наприклад, у платі Arduino Uno доступно 14 цифрових входів/виходів, 6 із яких можуть генерувати ШІМ сигнал, і 6 аналогових входів. Ці сигнали доступні на платі через контактні площадки або штирові роз'єми. Також існує багато різних зовнішніх плат розширення, які називаються «shields» («щити»), які приєднуються до плати Arduino через штирові роз'єми. Сторонніми виробниками випускається велика гамма всіляких датчиків і виконавчих пристроїв, в тій чи іншій мірі сумісних між собою і з процесорними платами Ардуіно.

Характеристики Arduino Uno

Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендуєма)	7-12 В
Вхідна напруга (гранична)	6-20 В
Цифрові Входи/Виходи	14 (6 з яких можуть використовуватися, як виходи ШІМ)
Аналогові входи	6
Постійний струм через вхід/вихід	40 мА
Постійний струм для виводу 3.3 В	50 мА
Флеш-пам'ять	32 Кб (ATmega328) з яких 0.5 Кб використовуються для завантажувача
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц

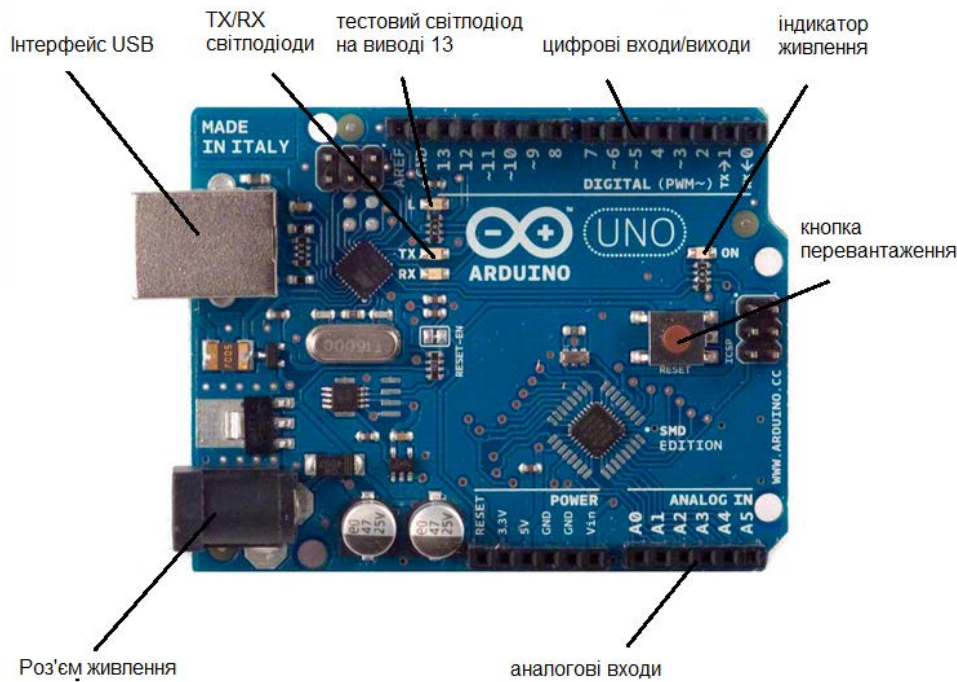


Рисунок 2.50. Зовнішній вигляд Arduino Uno.

Інтегроване середовище розробки Arduino це багатоплатформовий додаток на Java, що включає в себе редактор коду, компілятор і модуль передачі прошивки в плату. Середовище розробки засноване на мові програмування Processing та спроектована для програмування новачками, не знайомими близько з розробкою програмного забезпечення. Строго кажучи, це C++, доповнений деякими бібліотеками. Програми обробляються за допомогою препроцесора, а потім компілюється за допомогою AVR-GCC.

Програми Arduino пишуться на мові програмування C або C++. Середовище розробки Arduino поставляється разом із бібліотекою програм, яка називається «Wiring», яка бере початок від проекту Wiring, який дозволяє робити багато стандартних операцій вводу/виводу набагато простіше. Користувачам необхідно визначити лише дві функції, для того щоб створити програму, яка буде працювати за принципом циклічного виконання.

При створенні проектів користувач може використовувати стандартні бібліотеки з можливістю внесення в них змін. Програми проектів, що створюються в середовищі Arduino називаються «скетч». Середовище програмування, як текстовий редактор в

якому створюються, редагуються програми, а потім завантажуються в мікроконтролер.

Установка Arduino. Для роботи з апаратними пристроями Arduino на персональному комп'ютері необхідно встановити програму розробки Arduino та драйвер плати Arduino. Програму розробки Arduino можна скачати з офіційного сайту <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Там же чи на форумах по Arduino можна скачати драйвер для відповідної плати Arduino (для різних плат можуть відрізнятись) та відповідної системної оболонки комп'ютера (Windows).

Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою кабеля USB. Живлення при програмуванні чи малій потужності зовнішніх плат, і елементів також здійснюється через USB. В інших випадках живлення подається на відповідний роз'єм за допомогою адаптера AC/DC 6 - 20В, чи батареї.

Після підключення плати до комп'ютера необхідно встановити драйвер. В програмному середовищі Arduino необхідно вибрати com ? порт до якого приєдналась плата та вказати тип плати Arduino (в нашому випадку Arduino UNO). Скриншот вибору типу плати вказаний на рисунку 2.51.

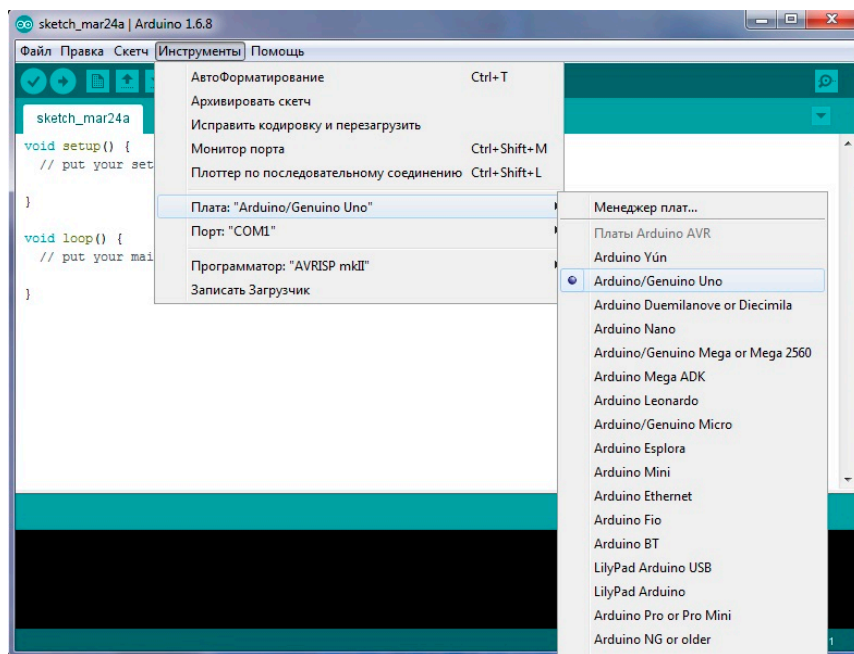


Рисунок 2.51. Скриншот вибору типу плати в програмному середовищі Arduino.

Для подальшої роботи в середовищі Arduino необхідно (згідно з рисунком 2.52):

- написати скетч;
- скомпілювати скетч (Compile);
- завантажити скетч (Upload).

Якщо в програмі відсутні помилки, після завантаження вона почне працювати. (при наявності помилок в статусних повідомленнях вони будуть вказані червоним кольором).

Для первинної перевірки плати можна використати скетч "Blink" з бібліотеки (бібліотека знаходиться по шляху: Файл/Примеры/Basics/Blink). Після завантаження скетча повинен моргати тестовий світлодіод.

Базова структура програми для Arduino складається з двох частин. В її функціях (setup і loop) міститься код програми для виконання. Де setup() – це підготовка, а loop() – виконання програми. Перед функцією setup – на початку програми проводяться коментарії та вказуються всі змінні. В ній проводиться ініціалізація портів (pinMode). Дана функція виконується один раз.

Нижче наведено зміст скетчу "Blink". Після коментарію в функції "setup" вказано ініціалізацію цифрового виводу pin 13, як виходу.

Функція "loop" включає код, який виконується постійно - читаються входи, перемикаються виходи і т.д. Дана функція - ядро всієї програми. В скетчі "Blink" функція "loop" спочатку має коментарій про те, що функція повторюється. Потім записується, що цифровий pin 13 матиме високий рівень (викається) з затримкою 1000 мілісекунд. Подальше цифровий pin 13 матиме низький рівень (вимикається) з затримкою 1000 мілісекунд.

```
// the setup function runs once when you press reset or power the board  
void setup() {  
  // initialize digital pin 13 as an output.  
  pinMode(13, OUTPUT);  
}  
// the loop function runs over and over again forever  
void loop() {  
  digitalWrite(13, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
```

```

delay(1000);           // wait for a second
digitalWrite(13, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
delay(1000);           // wait for a second
}

```

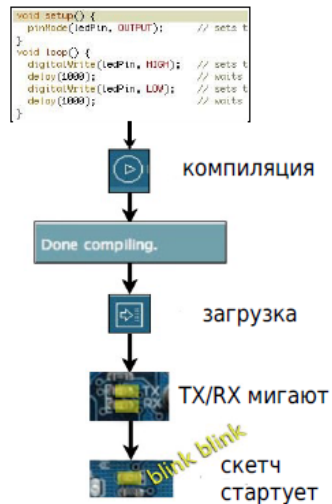


Рисунок 2.52. Послідовність дій та завантаження скетчу.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте поняття мікропроцесор.
2. Напрямки розвитку архітектури та технологій виробництва мікропроцесорів.
3. Структурна схема мікропроцесора.
4. Охарактеризуйте поняття мікроконтролер.
5. Структурна схема мікроконтролера.
6. Охарактеризуйте поняття Arduino.
7. Наведіть основні характеристики плати Arduino UNO.
8. Вкажіть згідно зі схемою маркування виводів Arduino UNO.
9. Наведіть основні принципи роботи у програмному середовищі Arduino.
10. Як протестувати роботу мікроконтролера Arduino.

3. Основи аналогової електронної техніки.

3.1. Підсилювачі електричних сигналів.

Підсилювачем називають пристрій, який призначений для збільшення параметрів електричного сигналу (напруги, струму, потужності). Підсилювач має вхідне коло, до якого підключається джерело вхідного сигналу (рисунок 3.1), і вихідне коло, з якого вихідний сигнал знімається і подається на навантаження. Підсилювачі мають активні (польові і біполярні транзистори) і пасивні (резистори, конденсатори, індуктивності) елементи, а також джерело живлення постійної напруги.

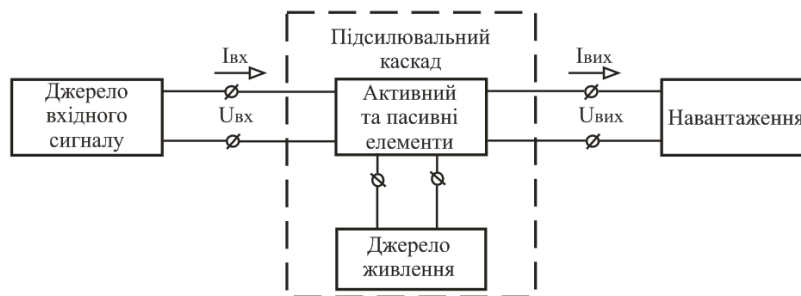


Рисунок 3.1. Структурна схема підсилювального каскаду

Основні параметри і характеристики підсилювачів:

- коефіцієнт підсилення за напругою:

$$K_U = \frac{U_{ВИХ}}{U_{ВХ}};$$

- коефіцієнт підсилення за струмом:

$$K_I = \frac{I_{ВИХ}}{I_{ВХ}};$$

- коефіцієнт підсилення за потужністю:

$$K_P = \frac{P_{ВИХ}}{P_{ВХ}} = K_U \cdot K_I;$$

- робочий діапазон частот Δf_p – діапазон частот від нижньої робочої частоти f_H до верхньої робочої частоти f_B в межах якої коефіцієнт підсилення не виходить за гранично допустимі значення;

- вхідний опір $R_{ВХ}$ – опір між вхідними затискачами підсилювача для змінного вхідного струму:

$$R_{ВХ} = \frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta I_{ВХ}};$$

- вихідний опір $R_{ВИХ}$ – опір між вихідними затискачами підсилювача для змінного струму при відключеному опорі навантаження:

$$R_{ВИХ} = \frac{\Delta U_{ВИХ}}{\Delta I_{ВИХ}};$$

- коефіцієнт корисної дії підсилювача η – відношення потужності, що віддається підсилювачем в навантаження, до потужності, що споживається від джерела живлення:

$$\eta = \frac{P_{ВИХ}}{P_0};$$

- динамічний діапазон D – відношення максимальної вхідної напруги до мінімальної вхідної напруги, при яких нелінійні викривлення не перевищують встановлених норм:

$$D = \frac{U_{ВХ \max}}{U_{ВХ \min}};$$

- лінійні викривлення – це викривлення, які обумовлені залежністю параметрів підсилювача від частоти і незалежні від амплітуди вхідного сигналу. Вони підрозділяються на частотні, фазові і перехідні. Вони викликані наявністю в колах підсилювача реактивних елементів (індуктивності і ємності), опори яких залежать від частоти, а також залежністю від частоти фізичних параметрів напівпровідникових приладів;
- нелінійні викривлення – це викривлення, які обумовлені залежністю коефіцієнта підсилення підсилювача від амплітуди підсилюваного сигналу. Нелінійні викривлення викликані нелінійністю вольтамперних характеристик активних елементів підсилювача (транзистори та ін.)

До основних характеристик підсилювачів відносяться:

- амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – залежність модуля коефіцієнта підсилення від частоти $K_U = F(f)$ (рисунок 2, а);
- фазо-частотна характеристика (ФЧХ) – залежність кута зсуву фази між вихідною і вхідною напругами від частоти $\varphi = F(f)$ (рисунок 3.2, б);
- амплітудна характеристика підсилювача – залежність амплітуди вихідного сигналу $U_{\text{вих м}}$ від амплітуди вхідного сигналу $U_{\text{вх м}}$ на деякій постійній частоті $U_{\text{вих м}} = F(U_{\text{вх м}})$ (рисунок 3.2, в).

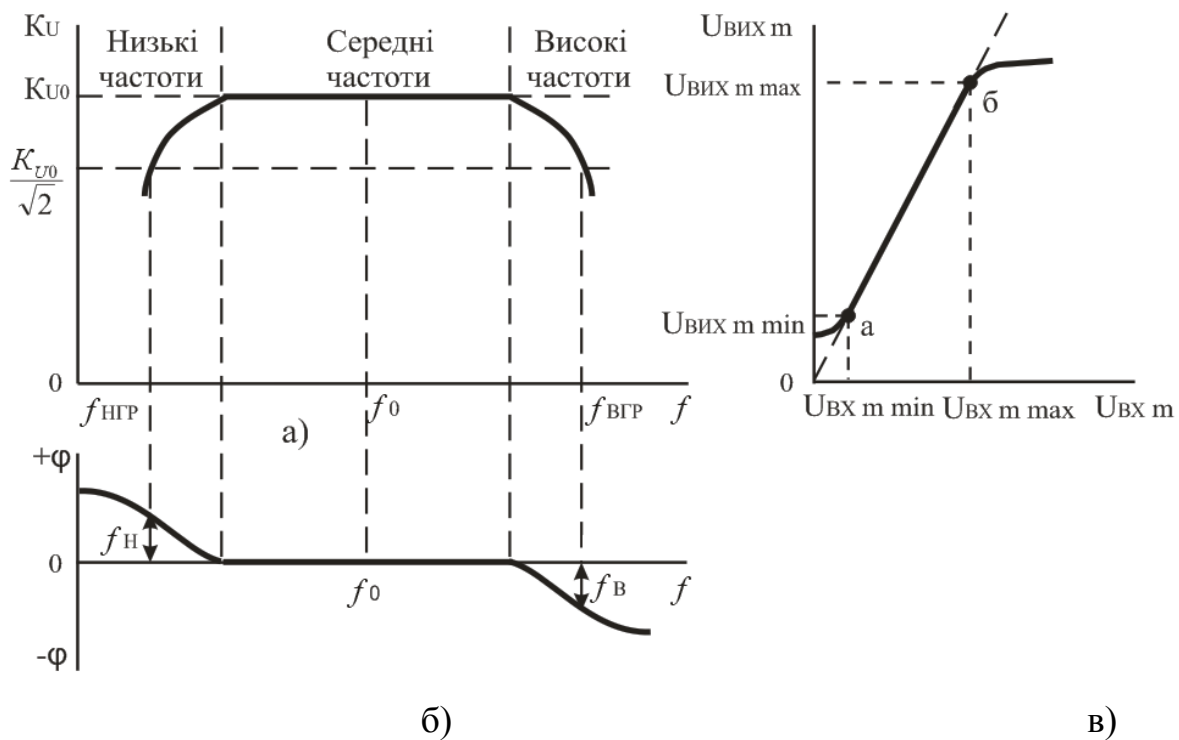


Рисунок 3.2. Характеристики підсилювачів: а – амплітудно-частотна (АЧХ); б – фазо-частотна (ФЧХ); в – амплітудна.

Всі підсилювачі можна підрозділити на два класи (рисунок 3.3) – з лінійним і нелінійним режимом роботи. У підсилювачах з лінійним режимом роботи вихідний сигнал повинен бути близьким за формою до вхідного. Викривлення форми сигналу, що вносяться підсилювачем, повинні бути мінімальними. Залежно від виду АЧХ підсилювачі з лінійним режимом роботи підрозділяють на:

- підсилювачі сигналу, що повільно змінюється (підсилювачі постійного струму – ППС);

- підсилювачі звукових частот (ПЗЧ);
- підсилювачі високої частоти (ПВЧ);
- широкосмугові підсилювачі (ШСП);
- вузькосмугові підсилювачі (ВСП).

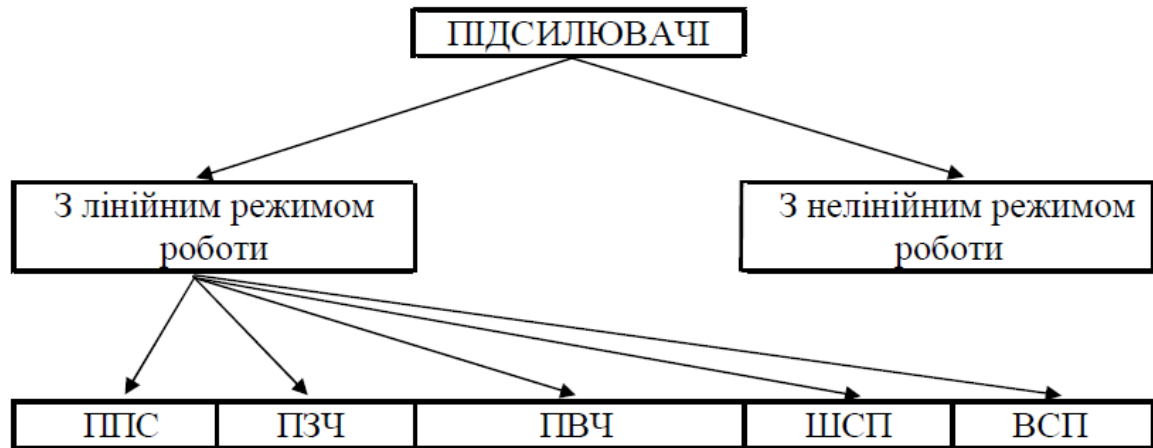


Рисунок 3.3. Класифікація підсилювачів

У підсилювачах з нелінійним режимом роботи пропорційність в передачі вхідного сигналу відсутня. Після досягнення деякої величини напруги вхідного сигналу при його збільшенні сигнал на виході підсилювача залишається без зміни (обмежується на деякому рівні). Такі підсилювачі використовуються для перетворення вхідного сигналу, наприклад синусоїдального, в імпульсний сигнал, а також для підсилення імпульсів.

Принцип побудови підсилювальних каскадів. Багато підсилювачів складаються з декількох ступенів, що здійснюють послідовне підсилення сигналу і зазвичай названих каскадами. Число каскадів в таких багатокаскадних підсилювачах залежить від необхідних значень коефіцієнтів підсилення K_I , K_U , K_P . Залежно від виконуваних функцій підсилювальні каскади підрозділяють на каскади попереднього підсилення і вихідні каскади. Каскади попереднього підсилення призначені для підвищення рівня сигналу за напругою, а вихідні каскади – для отримання необхідних значень струму або потужності сигналу в навантаженні.

Підсилювачі на біполярних транзисторах. Показники підсилювальних каскадів залежать від способу увімкнення транзистора, що виконує роль керованого елемента. У зв'язку з цим аналіз підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах

проводиться для трьох способів включення: з спільним емітером (СЕ), з спільним колектором (СК) і спільною базою (СБ).

Таблиця 3.1. Параметри основних схем увімкнення транзисторів.

Параметр	Схема увімкнення		
	СЕ	СБ	СК
Вхідний опір, R_{BX}	200...2000 Ом	50...100 Ом	10...500 кОм
Вихідний опір, $R_{ВИХ}$	30...70 кОм	0,1...1,0 МОм	50...1000 Ом
Коефіцієнт підсилення за напругою, K_U	30...1000	30...400	≈ 1
Коефіцієнт підсилення за струмом, K_I	10...200	≈ 1	10...200
Коефіцієнт підсилення за потужністю, K_P	3000...30000	30...400	10...200
Фазовий зсув між $U_{ВИХ}$ і U_{BX} , φ	180°	0	0

Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі за схемою із спільним емітером є найбільш розповсюджений, так як характеризується значним коефіцієнтом підсилення: за напругою $K_U = 30...1000$, за струмом $K_I = 10...200$, за потужністю $K_P = 3000...30000$.

Основними елементами схеми (рисунок 3.4) є джерело живлення E_K , керуючий елемент – транзистор VT і резистор R_K . Ці елементи утворюють головне коло підсилювального каскаду. Підсилена змінна напруга на виході схеми - колекторний струм створюється за рахунок протікання струму бази. Резистор R_K підбирається для забезпечення початкового положення робочої точки - початкового струму $I_{КС}$. Решта елементів виконує допоміжну роль. Конденсатори C_{P1} , C_{P2} є роздільними. Конденсатор C_{P1} виключає вплив постійної складової джерела струму вхідного каскаду на роботу транзистора. Функція конденсатора C_{P2} зводиться до пропускання в коло навантаження змінної складової напруги і затримання постійної складової.

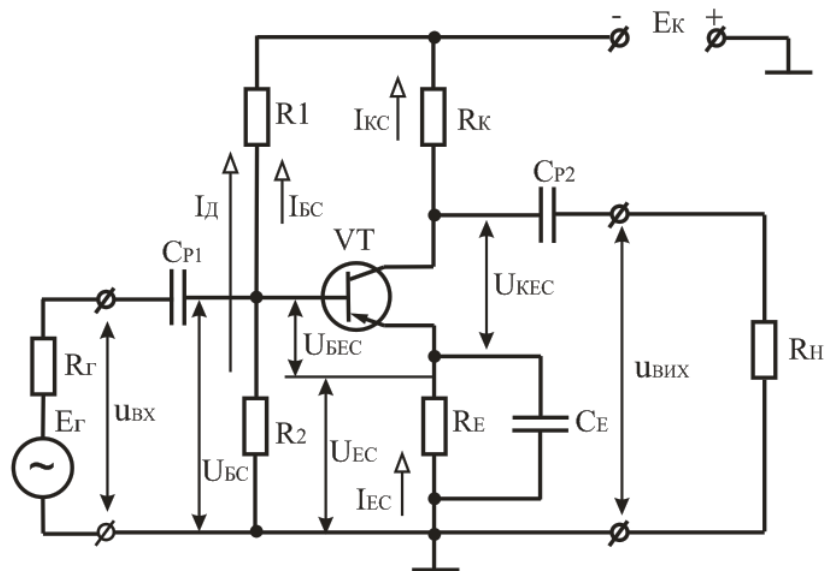


Рисунок 3.4. Схема підсилювального каскаду з C_E

Резистори R_1 , R_2 використовуються для задання режиму спокою каскаду. Оскільки біполярний транзистор керується струмом, то струм спокою (в даному випадку струм I_{KC}) створюється заданням відповідної величини струму бази спокою I_{BC} . Резистор R_1 призначений для створення кола протікання струму I_{BC} . Спільно з R_2 резистор R_1 забезпечує початкову напругу на базі U_{BC} відносно затискача «+EK» джерела живлення. При забезпеченні режиму роботи транзистора необхідно здійснити температурну стабілізацію положення робочої точки (зменшити вплив температури на початкове положення робочої точки). Для цього в емітерне коло введений резистор R_E , на якому створюється напруга від'ємного зворотного зв'язку ВЗЗ за постійним струмом U_{RE} . Наприклад при зростанні температури транзистора зростає струм колектора I_{KC} . Так як $I_{EC} = I_{KC} + I_{BC}$ то зростання струму колектора призводить до зростання струму емітора і відповідно до зростання падіння напруги на резисторі R_E . В результаті цього зменшується напруга між базою та емітером U_{BEC} , що призводить до зменшення струму бази I_{BC} , а відповідно і струму колектора I_{KC} . Для усунення ВЗЗ за змінним струмом за наявності вхідного змінного сигналу резистор шунтують конденсатором C_E , опір якого на частоті підсилювального сигналу повинен бути незначним. Для температурної стабілізації паралельно R_2 включають термістор, в якому при зростанні температури зменшується опір і відбувається зменшення

від'ємної напруги на базі. При цьому зменшується струм бази та відповідно струм колектора.

Процес підсилення ґрунтується на перетворенні енергії джерела живлення постійної напруги в енергію змінної напруги у вихідному колі за рахунок зміни опору емітера-колектора згідно зі змінами вхідного сигналу. Принцип дії каскаду з C_E полягає в наступному. При підключенні до входу підсилювача джерела синусоїдальної напруги E_T на базі транзистора з'являється синусоїдальна напруга u_{BX} , яка змінює початкову напругу $U_{БЕС}$. Під впливом напруги u_{BX} в колі бази з'являється змінна складова струму $i_{B\sim}$, яка викликає появу змінної складової струму в колі колектора $i_{K\sim} = \beta \cdot i_{B\sim}$.

Аналіз каскаду за постійним та змінним струмом проводять графоаналітичним методом.

Основне призначення підсилювального каскаду із спільним колектором – узгодження високоомного джерела вхідного сигналу з низькоомним резистором навантаження. Емітерним повторювачем схему називають внаслідок того, що її вихідна напруга, що знімається з емітера транзистора, близька за величиною до вхідної напруги і співпадає з нею за фазою.

Режими роботи підсилювачів на біполярних транзисторах. Розрізняють три основні режими роботи підсилювальних каскадів: А, В, АВ, які визначаються початковим положенням робочої точки за відсутності вхідного змінного сигналу. Це положення визначається на характеристиках транзистора сукупністю постійних складових струмів і напруг у вихідному $I_{КС}$, $U_{КЕС}$ і вхідному $I_{БС}$, $U_{БЕС}$ колах.

При роботі транзистора в активному (підсилювальному) режимі (клас А) початкове положення робочої точки повинне бути таким, щоб струм через активний елемент (біполярний транзистор) протікав впродовж всього періоду зміни вхідного сигналу, а амплітудне значення вихідного струму I_{Km} не перевищувало початкового струму $I_{КС}$. Тому в підсилювачах класу А положення робочої точки вибирають посередині лінії навантаження. Це забезпечує лінійне підсилення змінного вхідного сигналу. Такий режим використовують в каскадах попереднього підсилення або в

малопотужних вихідних каскадах. Недоліком такого підсилювача є низький ККД ($\eta_{\text{MAX}} = 50 \%$).

У підсилювачах класу В робоча точка вибрана при струмі колектора I_K в стані спокою рівним нулю. У такому режимі транзистор відкритий тільки впродовж половини періоду змінного вхідного сигналу. Особливістю цього режиму є високий ККД підсилювача ($\eta_{\text{MAX}} = 78,5 \%$), так як постійна складова значно менше ніж підсилювачах класу А. В даному режимі підсилювачі характеризуються більшими нелінійними спотвореннями сигналу, тому його застосовують у вихідних двотактних каскадах підсилення потужності.

Режим класу АВ є проміжним між режимами А і В. При малих і середніх вхідних сигналах він має властивості режиму А, а при великому вхідному сигналі – режиму В. ККД в режимі класу АВ – $\eta_{\text{MAX}} = 50 - 78,5 \%$.

Принцип побудови підсилювальних каскадів на польових транзисторах такий самий, як і каскадів на біполярних транзисторах. Особливість полягає в тому, що польовий транзистор управляється по вхідному колу напругою, а не струмом. З цієї причини завдання режиму спокою в каскадах на польових транзисторах здійснюється подачею у вхідне коло каскаду постійної напруги відповідної величини і полярності.

Підсилювальний каскад на польовому транзисторі з керуючим р-п-переходом.

Основними елементами каскаду є джерело живлення E_C , транзистор VT і резистор R_C . Навантаження підключене через розділяючий конденсатор C_{P2} до стоку транзистора. Решта елементів каскаду виконує допоміжну роль. Резистори R_3 , R_B призначені для задання напруги $U_{ЗВС}$ в режимі спокою. Резистор R_B виконує функцію формування автоматичного зміщення, що подається на затвор, а також створює в каскаді від'ємний зворотний зв'язок за постійним струмом, який призначений для стабілізації режиму спокою при зміні температури. Конденсатор C_B призначений для виключення ВЗЗ за змінним струмом. Розділяючий конденсатор C_{P1} забезпечує зв'язок каскаду з джерелом вхідного сигналу. Аналіз роботи підсилювального каскаду на польовому транзисторі (рисунок 3.5) проводять використовуючи графоаналітичний метод. Під час подачі на вхід підсилювального каскаду змінної напруги $u_{ВХ}$ з'явиться змінна складова струму стоку i_C . Зміна цього струму призводить до зміни напруги $U_{СВ}$ між стоком та витоком.

Його змінна складова u_c яка дорівнює за величиною та протилежна за фазою падінню напруги на резисторі R_c , є вихідною напругою підсилювального каскаду.

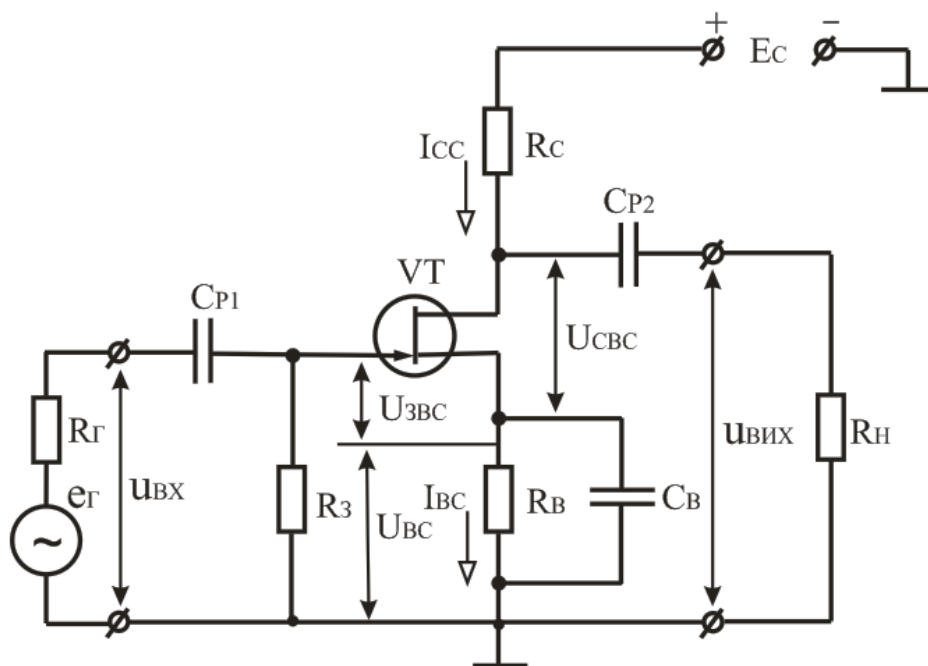


Рисунок 3.5. Схема підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керуючим р-п-переходом із спільним витоком.

Багатокаскадні підсилювачі. При підсиленні малих вхідних сигналів може статися, що одного підсилювального каскаду недостатньо для отримання потрібного коефіцієнта підсилення. В цьому випадку задачу вирішують за допомогою багатокаскадних підсилювачів, які отримують шляхом послідовного з'єднання окремих каскадів (рисунок 3.6). У багатокаскадних підсилювачах вихідний сигнал першого і будь-якого проміжного каскаду служить вхідним сигналом подальшого каскаду. Навантаженням вказаних каскадів є вхідний опір подальшого каскаду. Вхідні і вихідні опори підсилювача визначаються відповідно вхідним і вихідним каскадами. Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача рівний добутку коефіцієнтів підсилення каскадів, які до нього входять: $K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \cdot \dots \cdot K_{UN}$. Зв'язок каскадів в багатокаскадному підсилювачі може здійснюватися за допомогою конденсатора, трансформатора, оптрона або безпосередньо. Відповідно до цього розрізняють підсилювачі з конденсаторним, трансформаторним, оптронним та безпосереднім зв'язками.

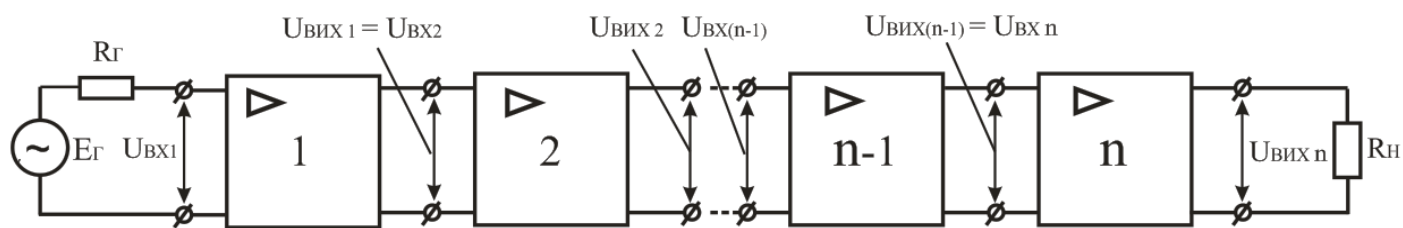


Рисунок 3.6. Структурна схема багатокаскадного підсилювача.

Зворотні зв'язки (ЗЗ) в підсилювачах. Зворотним зв'язком називають таку дію вихідного кола схеми на її вхідне коло, при якому частина вихідного сигналу подається на вхід. У підсилювачі із зворотним зв'язком вхідна напруга $U_{вх}$ і напруга зворотного зв'язку $U_{зз}$ можуть співпадати за фазою або знаходитися в протифазі. У першому випадку результуюча напруга: $U_1 = U_{вх} + U_{зз}$, а такий зворотний зв'язок називають додатним. У другому випадку: $U_1 = U_{вх} - U_{зз}$, і такий зворотний зв'язок називають від'ємним. Від'ємні ЗЗ знижує коефіцієнт підсилення підсилювача в $(1+\beta K)$ разів.

Зворотні зв'язки (ЗЗ) підрозділяють на зворотні зв'язки за напругою і за струмом. При ЗЗ за напругою коло зворотного зв'язку підключається до виходу підсилювача паралельно і $U_{зз} = \beta U_{вих}$ (де β – коефіцієнт передачі кола ЗЗ), тобто напруга зворотного зв'язку виявляється пропорційною вихідній напрузі. При зворотному зв'язку за струмом коло зворотного зв'язку підключається до виходу підсилювача послідовно з навантаженням і $U_{зз} = \beta I_{вих} R_{зз}$, тобто напруга ЗЗ виявляється пропорційною струму в колі навантаження. Напруга ЗЗ може подаватися на вхід підсилювача або послідовно з напругою вхідного сигналу, або паралельно. У першому випадку зворотний зв'язок називається послідовним, а в другому – паралельним. Найбільшого поширення в підсилювачах набули наступні види ЗЗ: послідовний ЗЗ за струмом; послідовний ЗЗ за напругою; паралельний ЗЗ за напругою.

Від'ємний ЗЗ знижує коефіцієнт підсилення підсилювача, а додатний - підвищує коефіцієнт підсилення підсилювача. Додатний зворотний зв'язок в електронних підсилювачах практично не застосовують, оскільки при цьому стабільність

коефіцієнта підсилення значно погіршується. Від'ємний зворотний зв'язок широко використовують в підсилювачах. В результаті введення ВЗЗ за напругою:

- підвищується стабільність коефіцієнта підсилення підсилювача;
- знижується рівень нелінійних викривлень;
- збільшується вхідний і зменшується вихідний опір підсилювача.

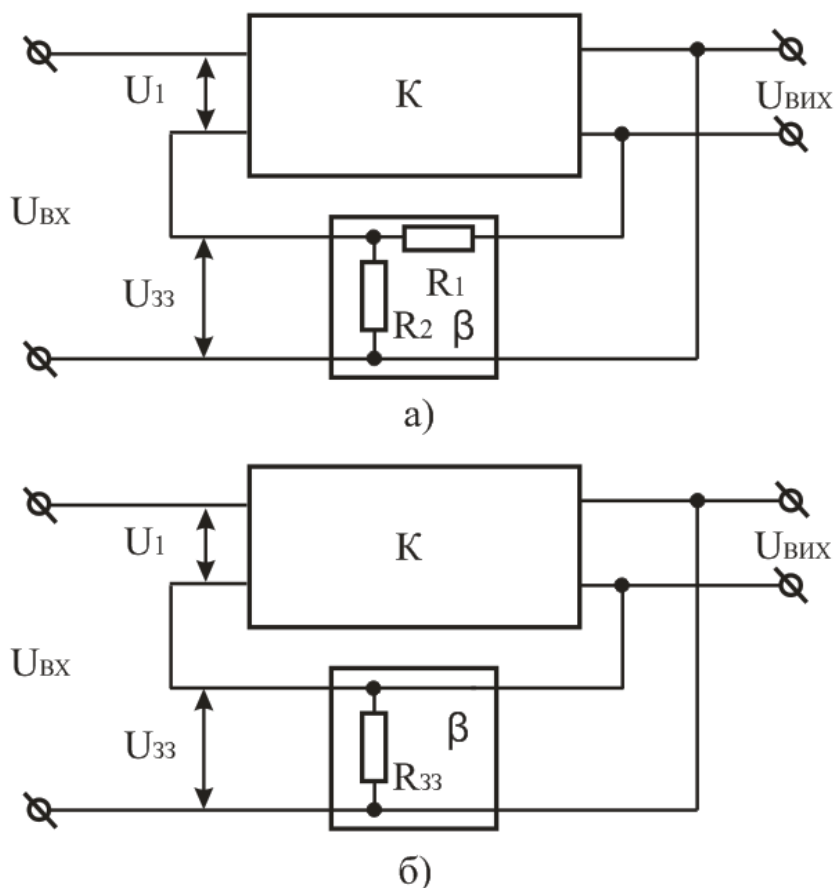


Рисунок 3.7. Види зворотних зв'язків: а – послідовний від'ємний зворотний зв'язок за напругою; б – послідовний від'ємний зворотний зв'язок за струмом.

Підсилювачі потужності називають вихідні підсилювальні каскади, які призначені для передачі в навантаження потрібної або максимально можливої потужності при заданому опорі навантаження. Каскади підсилення потужності відрізняються великою різноманітністю. Вони можуть виконуватися на біполярних і польових транзисторах. За способом підключення навантаження підсилювальні каскади можуть бути трансформаторними і безтрансформаторними. У підсилювачах потужності знайшли застосування три класи підсилення: А, В, і АВ.

Підсилювальний каскад з трансформаторним увімкненням навантаження. Схема одноконтурного підсилювача потужності класу А наведена на рисунку 3.8. При низькоомних навантаженнях для збільшення ККД одноконтурні підсилювачі потужності виконуються за трансформаторною схемою. Трансформатор TV узгоджує опір резистора навантаження R_H з вихідним колом транзистора VT і формує посилені струм і напругу. Резистори R_1 , R_2 і R_E забезпечують вибраний режим роботи за постійним струмом. Резистори R_1 і R_2 фіксують за постійним струмом потенціал бази. Резистор R_E забезпечує стабілізацію режиму роботи транзистора за постійним струмом, що необхідно для стабілізації режиму при зміні температури, а також при заміні транзистора або зміні параметрів джерела живлення. На резисторі R_E створюється напруга ВЗЗ за постійним струмом, що стабілізує режим роботи підсилювача. Щоб уникнути появи ВЗЗ за змінним струмом, що знижує коефіцієнт підсилення за потужністю, паралельно резистору R_E вмикають конденсатор C_E , що має малий опір за змінним струмом для частоти сигналу. Конденсатор C_P відокремлює за постійним струмом джерело вхідного сигналу і підсилювач потужності.

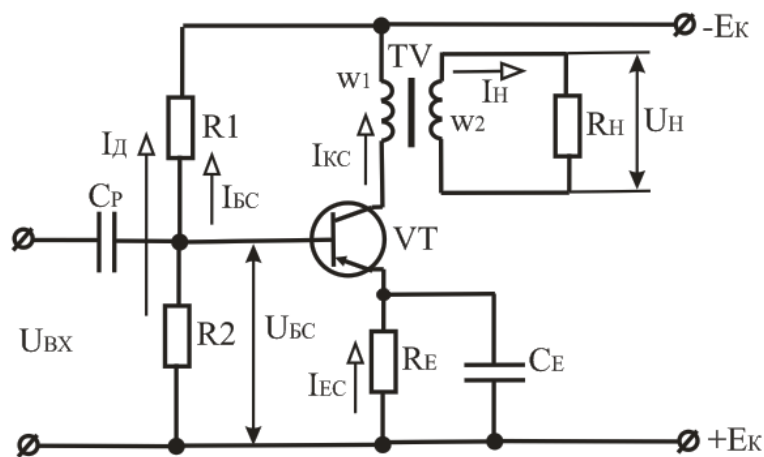


Рисунок 3.8. Схема підсилювача потужності класу А з трансформаторним увімкненням навантаження.

Розрахунок каскаду проводять графоаналітичним методом з використанням ліній навантаження за постійним і за змінним струмом. Початковими при розрахунку є вихідна потужність P_H і опір навантаження R_H .

Однокаскадні підсилювачі потужності мають ряд недоліків: малий к.к.д, відносно великі нелінійні спотворення сигналів, зокрема по причині підмагнічування магнітопроводу вихідного трансформатора, частотні спотворення.

Для зменшення впливу вказаних недоліків та при необхідності збільшення потужності використовують двохтактні підсилювачі. Найбільш широке розповсюдження отримали безтрансформаторні двохтактні каскади на транзисторах (рисунок 3.9). Використання різних типів (р-п-р і n-р-п) транзисторів, що відрізняються напрямком протікання струму, дозволяє значно спростити схему підсилювача.

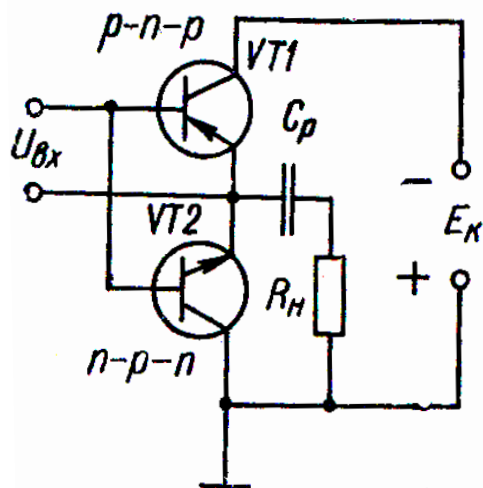


Рисунок 3.9. Безтрансформаторний двохтактний вихідний каскад підсилювача.

Підсилювачі постійного струму (ППС) призначені для підсилення сигналів, що повільно змінюються. У них використовується безпосередній гальванічний зв'язок (за постійним струмом) між каскадами без застосування конденсаторів і трансформаторів. ППС повинні мати амплітудно-частотну характеристику, представлену на рисунку 3.10а.

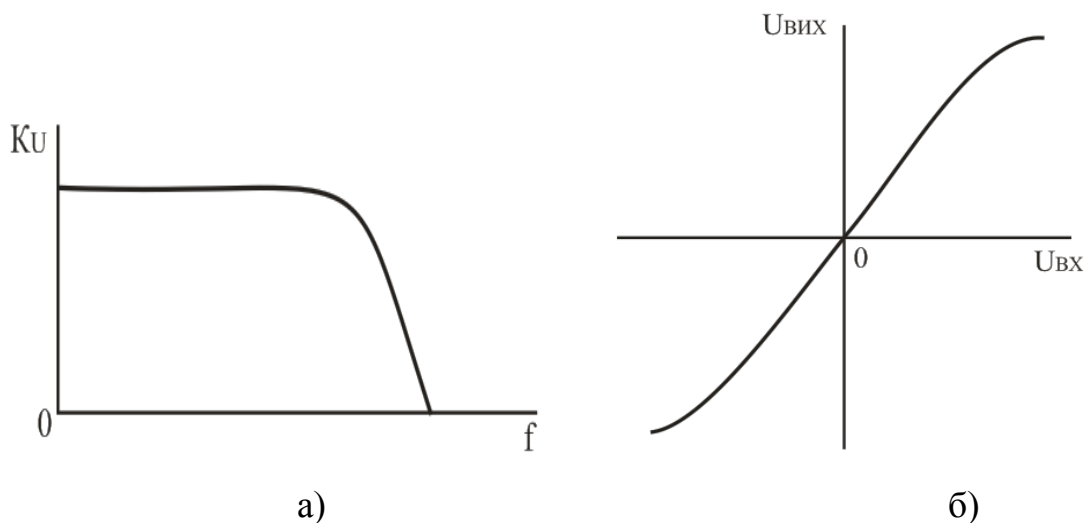


Рисунок 3.10. Характеристики підсилювача постійного струму: а - амплітудно-частотна; б - амплітудна.

В більшості випадків при використанні ППС потрібно, щоб при зміні полярності постійної складової вхідного сигналу змінювалася і полярність постійної складової вихідного сигналу. Отже, амплітудна характеристика ППС повинна мати вигляд, представлений на рисунку 3.10.

ППС знаходять застосування в стабілізаторах напруги і струму, вимірювальних приладах, пристроях автоматики, системах спостереження і т. д. За принципом дії і схемним виконанням ППС діляться на два основні види:

- ППС прямого підсилення;
- ППС з перетворенням.

У підсилювачах постійного струму відсутні елементи, які призначені для розділення підсилювальних каскадів за постійним струмом. У зв'язку з цим вихідна напруга визначається тут не тільки посиленням корисним сигналом, але і помилковим сигналом, що створюється за рахунок зміни в часі параметрів режимів каскадів за постійним струмом. Це явище призводить до так званого дрейфу нуля підсилювача. Дрейф нуля в ППС – це зміна вихідної напруги за відсутності змін вхідної, що відбувається під впливом дестабілізуючих чинників, які впливають на підсилювач. Причинами дрейфу є нестабільність напруги живлення схеми, температурна і часова нестабільність параметрів транзисторів і резисторів. Якість ППС оцінюють за напругою дрейфу, що приведена до входу підсилювача (приведеному дрейфу): $U_{др.вх} = U_{др.вих} K_U$. Величина приведенного дрейфу обмежує мінімально помітний вхідний сигнал. Так, для одиночних каскадів з СЕ приведений до входу дрейф нуля за напругою приблизно дорівнює 2...8 мВ/град для кремнієвих біполярних транзисторів і 20 – 30 мВ/град – для германієвих біполярних транзисторів. Приведений дрейф за струмом в таких каскадах при струмі $I_E = 1\text{мА}$ може перевищувати 10 мкА/град. Приведений дрейф нуля в одиночних каскадах на польових транзисторах менше, ніж в каскадах на біполярних транзисторах, і складає 3 – 4 мВ/град.

Зменшення дрейфу нуля в ППС досягається наступними заходами:

- стабілізацією напруги джерел живлення;
- стабілізацією температурного режиму;
- застосуванням термокомпенсуючих елементів;
- введенням у підсилювачі ВЗЗ за постійним струмом;

- використанням балансних (мостових) схем.

Підсилювачі постійного струму на транзисторах (рисунок 3.11) складається із звичайного підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненому за схемою СЕ з температурною стабілізацією ($V_T, R_{B1}, R_{B2}, R_E, R_K$).

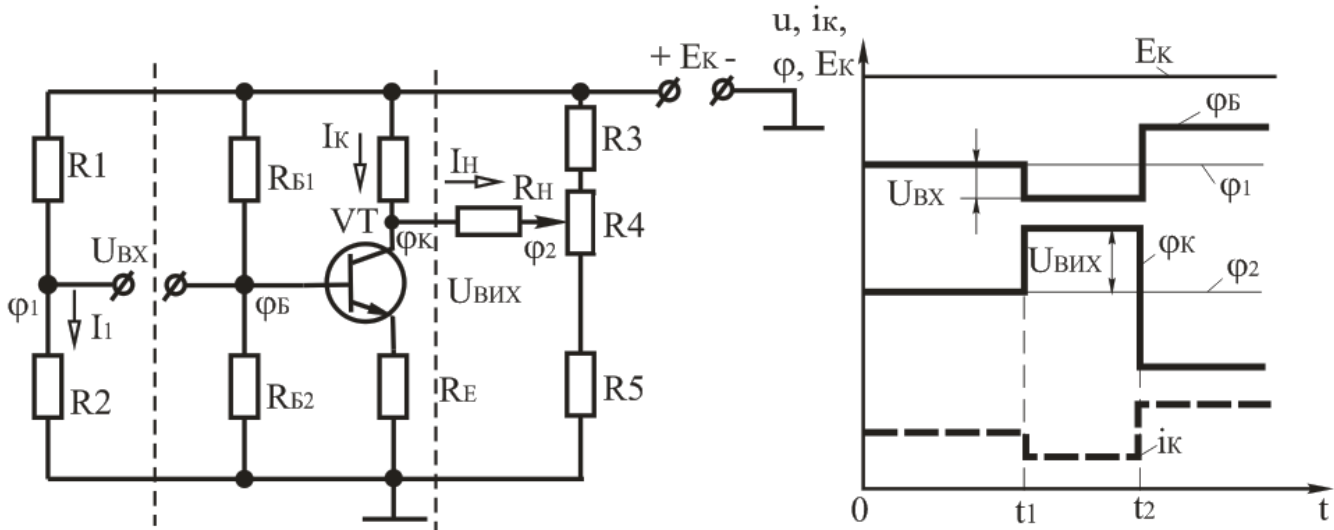


Рисунок 3.11. ППС з одним джерелом живлення на біполярному транзисторі: а – схема; б – потенціальна діаграма.

У даному підсилювальному каскаді відсутній конденсатор в колі емітера СЕ, що призводить до зниження коефіцієнта підсилення внаслідок виникнення ВЗЗ за струмом на резисторі R_E , але забезпечує рівномірне підсилення на всіх частотах вхідного сигналу (забезпечує велику смугу пропускання). На відміну від підсилювачів з резистивно-ємнісним зв'язком, в даному ППС резистор навантаження R_N увімкнений між колектором транзистора V_T і середньою точкою дільника R_3, R_4, R_5 , а вхідна напруга прикладена між базою транзистора і середньою точкою дільника R_1, R_2 . Співвідношення опорів дільників такі, що у відсутність вхідного сигналу ($U_{BX} = 0$) потенціали $\phi_B = \phi_1, \phi_K = \phi_2$, струм у вхідному колі $I_{BX} = 0$ і струм в резисторі навантаження $I_N = 0$. Для точного підстроювання режиму дільник R_3, R_4, R_5 виконаний на двох постійних і одному змінному резисторі, що дозволяє плавно змінювати в деяких межах потенціал ϕ_2 . При подачі вхідного сигналу з'являється струм у вхідному колі, змінюється базовий і колекторний струми транзистора, що призводить до зміни колекторної напруги транзистора і виникнення струму в резисторі навантаження. Потенційна діаграма ППС (рисунок 3.11, б) показує, що

при $u_{ВХ} = 0$ в інтервалі $0 \leq t \leq t_1$ вихідна напруга $u_{ВИХ} = 0$; при $u_{ВХ} < 0$ в інтервалі $t_1 < t < t_2$ вихідна напруга $u_{ВИХ} > 0$ і при $u_{ВХ} > 0$ в інтервалі $t > t_2$ вихідна напруга $u_{ВИХ} < 0$.

Операційний підсилювач – це підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, який охоплений колом ВЗЗ, що визначає основні якісні показники і характер операцій, які виконує підсилювач. Назва цих підсилювачів пов'язана з їх застосуванням головним чином для виконання різних операцій над аналоговими величинами (алгебраїчне додавання, віднімання, множення на постійний коефіцієнт, інтегрування, диференціювання, логарифмування і т. д.). Вони застосовуються в підсилювальній техніці, пристроях генерації сигналів синусоїдальної і імпульсної форми, в стабілізаторах напруги, активних фільтрах і т. д. Умовне позначення ОП показано на рисунку 3.12.

Один з входів підсилювача називається інвертуючим, а другий – неінвертуючим. При подачі сигналу на неінвертуючий вхід прирощення вихідного сигналу співпадає за знаком (фазою) з прирощенням вхідного сигналу. Якщо ж сигнал поданий на інвертуючий вхід, то прирощення вихідного сигналу має зворотний знак (протилежний за фазою) в порівнянні з прирощенням вхідного сигналу. Інвертуючий вхід часто використовують для введення в ОП зовнішніх ВЗЗ.

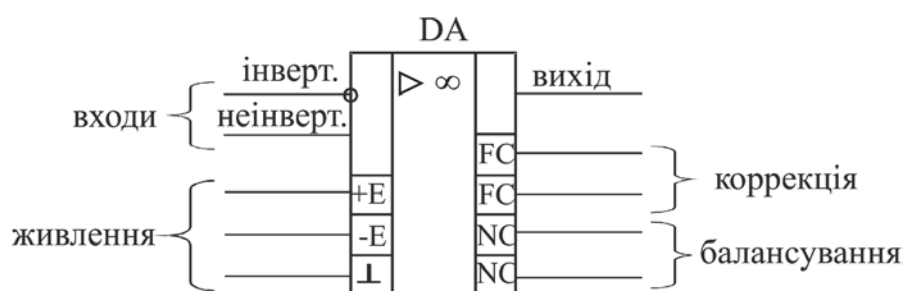


Рисунок 3.12. Умовне позначення операційного підсилювача

Сучасний ОП виконується на базі інтегральної мікросхеми операційного підсилювача ІМС ОП, до виводів якої, окрім кола ВЗЗ, приєднуються джерела живлення, джерела вхідних сигналів, опір навантаження, кола корекції частотних характеристик ОП і інші кола. Живлення схеми здійснюється від двох різнополярних джерел $+E_1$ і $-E_2$ з однаковою напругою. Джерела живлення мають спільну точку. Основу ОП складає диференціальний каскад, який використовується як вхідний каскад підсилювача. Вихідним каскадом ОП зазвичай є емітерний повторювач. Оскільки

коефіцієнт підсилення за напругою емітерного повторювача близький до одиниці, необхідне значення K_U ОП операційного підсилювача досягається за допомогою додаткових підсилювальних каскадів, що включаються між диференціальним каскадом і емітерним повторювачем. Залежно від кількості каскадів, які використовуються для набуття необхідного значення K_{UOP} , ОП підрозділяють на двох- і трьохкаскадні.

Основні параметри і характеристики ОП:

- коефіцієнт підсилення напруги (від декількох сотень до сотень тисяч);

$$K_{UOP} = \frac{\Delta U_{ВИХ}}{\Delta U_{ВХ}}$$

- вхідна напруга зміщення нуля – значення напруги на вході ОП, при якому $U_{ВИХ} = 0$;
- коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу $K_{ОС.СФ}$;
- вхідні струми зміщення $I_{ВХ.ЗМ}$;
- вхідний опір $R_{ВХ}$;
- максимальна вхідна диференціальна напруга $U_{ВХДИФ}$;
- вихідний опір $R_{ВИХ}$;
- максимальна вихідна напруга $U_{ВИХmax}$;
- максимальний вихідний струм $I_{ВИХmax}$;
- максимальний споживаний струм $I_{СПОЖ.max}$;
- напруга живлення $U_{ЖИВ}$ ($U_{ЖИВ} = \pm 3 \dots \pm 15V$);
- споживана потужність $P_{СПОЖ}$;
- частота зрізу $f_{ЗР}$;
- частота одиничного підсилення f_1 ;
- гранична частота $f_{ВП}$;
- смуга пропускання;
- швидкість нарощування вихідної напруги $\nu_{УВИХ}$ ($\nu_{УВИХ} = 0,1 - 100V/МКС$);
- час встановлення вихідної напруги $t_{ВСТ}$ – час протягом якого вихідна напруга змінюється від рівня 0,1 до рівня 0,9 сталого значення ($t_{ВСТ} = 0,05 \dots 2мкс$).

Основними характеристиками ОП є амплітудна (передавальна) і амплітудно-частотна характеристика. Кожна з характеристик (рисунок 3.13, а) складається з горизонтальних і похилих ділянок. Горизонтальні ділянки відповідають режиму насичення підсилювача. При зміні напруги вхідного сигналу на цих ділянках вихідна напруга підсилювача залишається без зміни і визначається напругою, $U_{\text{ВИХМАХ}}$. Вказані значення максимальної вихідної напруги близькі до напруги E джерела живлення. Похилій (лінійній) ділянці відповідає пропорційна залежність вихідної напруги від вхідної. Кут нахилу ділянки визначається коефіцієнтом посилення $K_{\text{УОП}}$ операційного підсилювача.

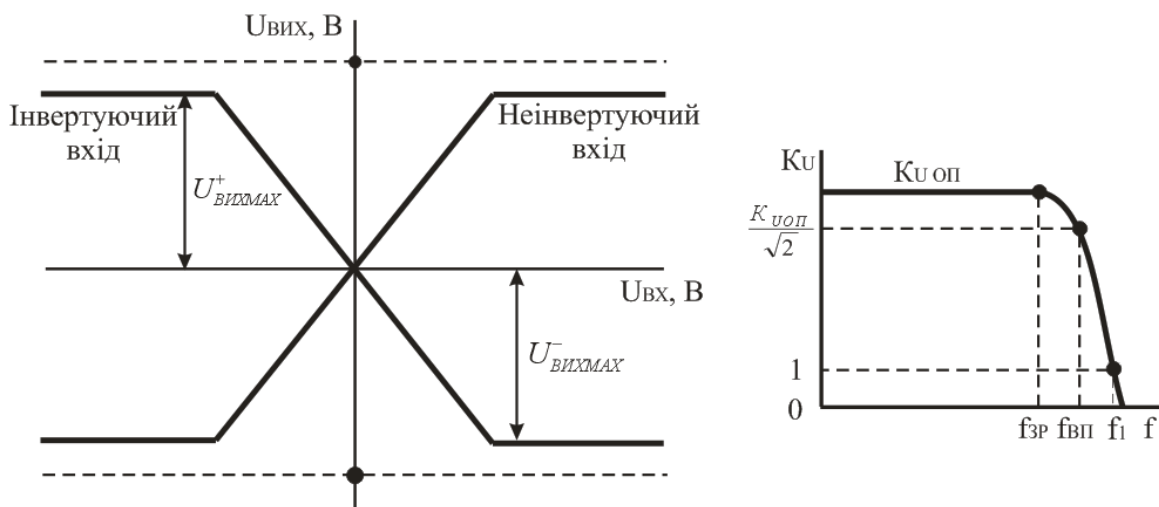


Рисунок 3.13. Характеристики операційних підсилювачів: а – амплітудна $U_{\text{ВИХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$; б – амплітудно-частотна $K_{\text{У}} = f(f)$.

Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП приведена на рисунку 3.14. У цій схемі вхідний сигнал подається на інвертуючий вхід ОП, а його неінвертуючий вхід зв'язується із спільною точкою входу і виходу схеми (заземлюється). Підсилювач називається інвертуючим, оскільки вихідна напруга інвертована (знаходиться в протифазі) по відношенню до вхідної напруги $U_{\text{ВХ}}$. Від'ємний зворотний зв'язок (паралельний за напругою) створюється за допомогою резистора R_{33} . Наявність такого зв'язку приводить до того, що завжди напруга на вході $U_{\text{ОП}} \rightarrow 0$.

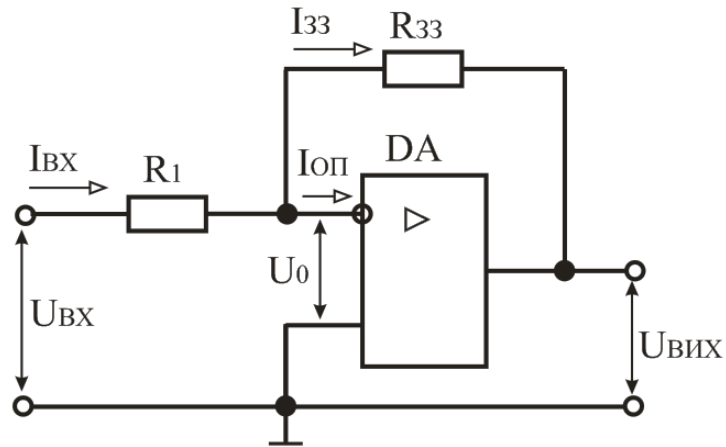


Рисунок 3.14. Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП.

Неінвертуючий підсилювач (рисунок 3.15) містить послідовний ВЗЗ за напругою (резистор $R_{ЗЗ}$), який поданий за інвертуючим входом; вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід ОП.

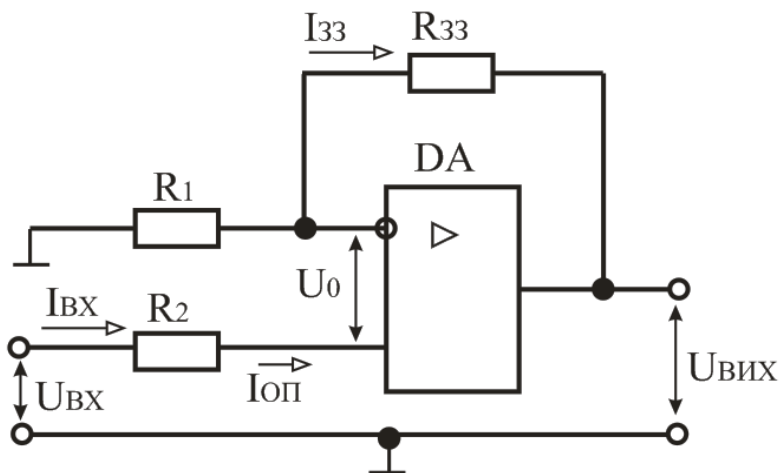


Рисунок 3.15. Схема неінвертуючого підсилювача на основі ОП.

Схема інвертуючого суматора (рисунок 3.16) виконана за типом інвертуючого підсилювача з числом паралельних гілок на вході, рівним кількості сигналів, призначених для складання.

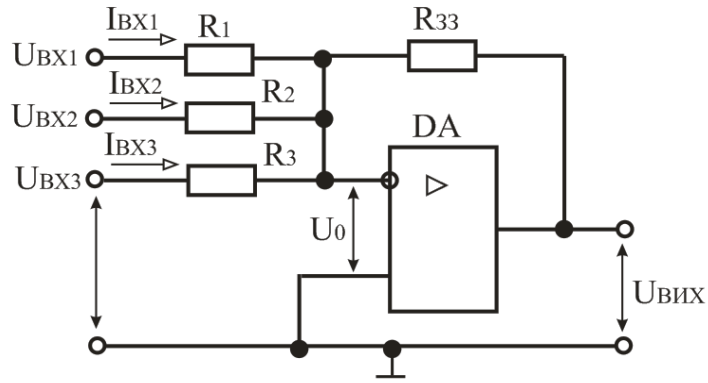


Рисунок 3.16. Схема інвертуючого суматора на основі ОП.

У диференціюючому підсилювачі (рисунок 3.17) ОП включений за схемою інвертуючого підсилювача з V_{33} , який виконаний на резисторі R . Конденсатор C і резистор R для вхідного сигналу є диференціюючим колом.

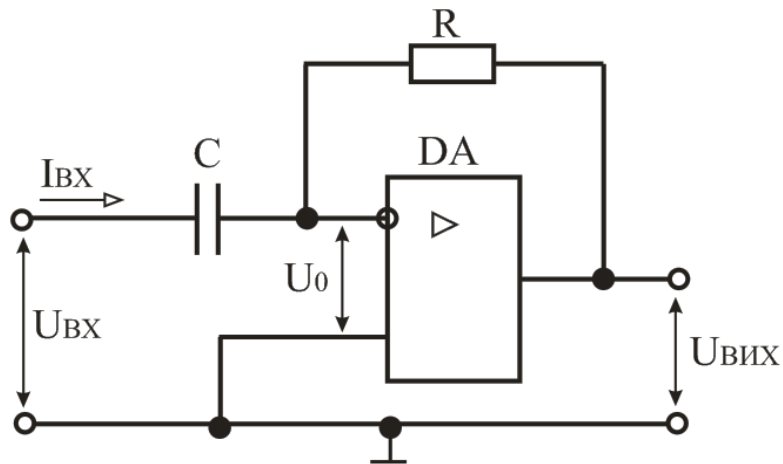


Рисунок 3.17. Диференціюючий підсилювач на основі ОП.

Інтегруючий підсилювач (рисунок 3.18) також є інвертуючим ОП з V_{33} , виконаним на конденсаторі C . Резистор R і конденсатор C для вхідного сигналу є інтегруючим колом.

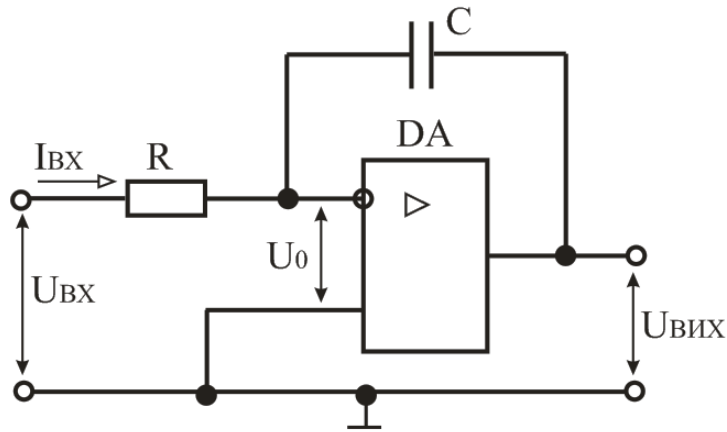


Рисунок 3.18. Інтегруючий підсилювач на основі ОП.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення та класифікацію підсилювачів електричних сигналів.
2. Поясніть, коли виникає потреба в електронних підсилювачах і в чому полягає принцип підсилення?
3. Назвіть основні параметри і вкажіть характеристики підсилювачів електричних сигналів. Назвіть режими роботи підсилювальних каскадів та поясніть чим вони забезпечуються.
4. Наведіть схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
5. Наведіть схему підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим р-п-переходом, увімкненого за схемою із спільним витоком. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
6. Назвіть види зворотних зв'язків в підсилювачах і поясніть як вони впливають на параметри підсилювачів?
7. Поясніть, як будують багатокаскадні підсилювачі? Поясніть особливості їх роботи. Як забезпечується зв'язок між: каскадами багатокаскадних підсилювачів?
8. У чому полягають особливості роботи вихідних каскадів підсилення? Наведіть схеми і поясніть принцип дії трансформаторних і безтрансформаторних вихідних каскадів.
9. Поясніть призначення та принцип роботи підсилювача постійного струму.
10. Поясніть призначення та принцип роботи операційних підсилювачів.

3.2. Генератори синусоїдальних коливань.

Генератор синусоїдальних (гармонійних) коливань – це електронний пристрій, який перетворює електричну енергію джерела постійного струму в енергію електричних синусоїдальних коливань заданої частоти. Розрізняють генератори синусоїдальних коливань з незалежним збудженням і з самозбудженням (автогенератори). Залежно від частоти коливань, що генерується, генератори підрозділяються на низькочастотні (від 10 Гц до 100 кГц), високочастотні (від 100 кГц до 100 МГц) та надвисокочастотні (понад 100 МГц). За типом частотно-вибіркової ланки, які задають частоту коливань, генератори гармонійних коливань поділяються на LC- і RC- генератори.

Будь-яким автогенератором електричних коливань є підсилювач, який охоплений колом додатного зворотного зв'язку (ДЗЗ) (рисунок 3.19). При ДЗЗ частина вихідної напруги $U_{зз}$ через коло ДЗЗ поступає на вхід підсилювача у фазі з вхідною напругою, що забезпечує задане значення $U_{вих}$. Щоб амплітуда вихідної напруги не змінилася, повинна бути виконана умова $U_{зз} = U_{вих}$, або $K_U \cdot \beta = 1$



Рисунок 3.19. Структурна схема генератора синусоїдальних коливань.

LC- генератори призначені для генерування сигналів високої частоти (понад декілька десятків кілогерц). LC- генератори містять в ланцюзі ДЗЗ резонансний контур LC, параметри якого визначають частоту коливань вихідної напруги:

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Схема LC- генератора з трансформаторним зворотним зв'язком наведена на рисунку 3.20. Підсилювальний каскад виконаний на транзисторі (увімкнений за схемою зі СЕ) з елементами R1, R2, R_Е, С_Е, які призначені для задання режиму спокою і температурної стабілізації. Вихідний сигнал знімається з колектора транзистора VT. У схемі однокаскадного підсилювача з чисто активним навантаженням вихідний сигнал знаходиться в протифазі з вхідним сигналом. У зв'язку з цим для забезпечення умови балансу фаз ланка ДЗЗ на резонансній частоті повинна здійснювати поворот на 180° фази сигналу, який передається на вхід підсилювача.

У схемі генератора параметрами коливального контуру є ємність конденсатора С та індуктивність L первинної обмотки W1 трансформатора Т. Сигнал зворотного зв'язку знімається з вторинної обмотки W2, яка індуктивно зв'язана з обмоткою W1, і через розділяючий конденсатор С_{Р1} подається на вхід транзистора. Необхідне фазування напруги ЗЗ досягається відповідним підключенням виводів вторинної обмотки. Оскільки напруга ЗЗ менше вихідної напруги, відношення чисел витків первинної і вторинної обмотки W1 / W2 > 1.

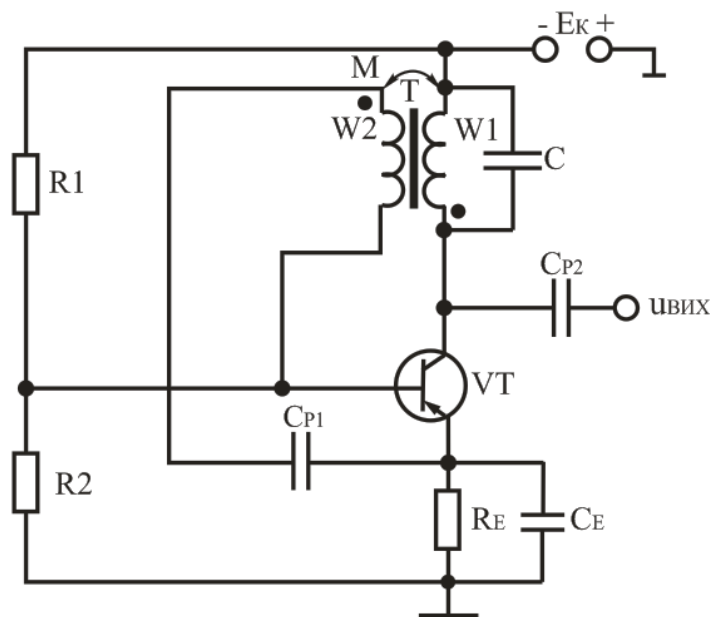


Рисунок 3.20. Схема LC- генератора з трансформаторним зворотним зв'язком.

Якщо прийняти індуктивний зв'язок обмоток W_1 та W_2 ідеальним, то для забезпечення умови балансу амплітуд необхідно, щоб

$$\beta \geq \sqrt{L/L_B} = W_1/W_2,$$

де β – коефіцієнт підсилення транзистора за струмом. Сигнал зворотного зв'язку може бути знятий безпосередньо з коливального контуру. Це досягається завдяки секціонуванню індуктивної або ємнісної гілки коливального контуру. У схемах таких генераторів коливальний контур має три точки з'єднання з підсилювачем, в зв'язку з чим їх називають триточковими.

RC- генератори призначені для отримання гармонійних коливань низької частоти (до одиниць герц) застосовують генератори, у яких в ланці ЗЗ використовуються частотно-вибіркові кола, що складені з резисторів і конденсаторів. Частотно-вибірковими ланками, які найчастіше використовуються в RC- генераторах, є Г-подібні RC- кола, міст Віна та подвійний Т- подібний міст. Схема моста Віна і його характеристики приведені на рисунку 3.

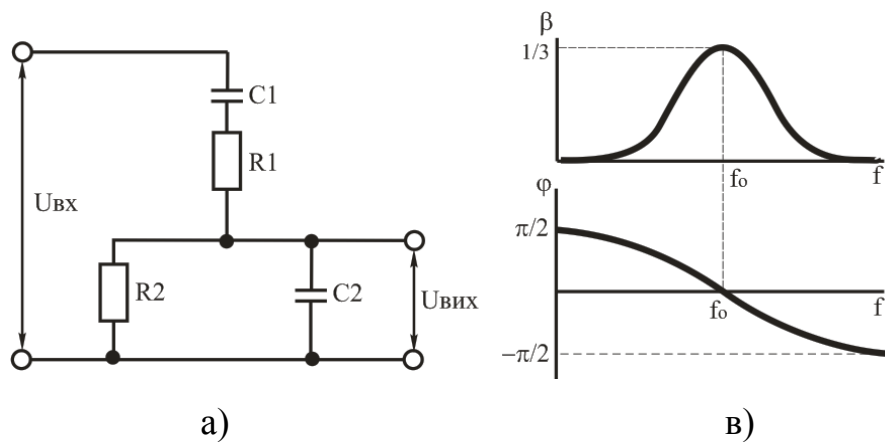


Рисунок 3.21. Міст Віна та його характеристики: а – схема; б – амплітудно-частотна характеристика $\beta = f(f)$; в – фазо-частотна характеристика $\phi = f(f)$.

На деякій частоті f_0 , частоті квазірезонансу, коефіцієнт передачі β має максимальне значення $\beta_0 = 1/3$, а зсув фаз ϕ між вхідною і вихідною напругою рівний нулю $\phi = 0$. Частота генерації в схемі рівна квазірезонансній частоті частотно-вибіркової ланки, яка визначається із співвідношення:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} = \frac{1}{2\pi RC},$$

де $R_1 = R_2 = R$ і $C_1 = C_2 = C$.

Передаточний коефіцієнт кола:

$$\beta = \frac{U_{\text{ВИХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{1 + R_1/R_2 + C_1/C_2}.$$

RC- генератор з мостом Віна також можна виконати на операційному підсилювачі (рисунок 3.21). При цьому ланку частотно-вибіркового зворотного зв'язку необхідно включити між виходом і неінвертуючим входом ОП. Резистори R3 і R4 призначені для отримання необхідного коефіцієнта підсилення. За допомогою змінного резистора R4 можна змінювати коефіцієнт підсилення підсилювача, добиваючись при цьому найменших нелінійних викривлень коливань, що генеруються. Оскільки на частоті генерації f_0 коефіцієнт передачі моста Віна $\beta = 1/3$, самозбудження генератора можливе при $K_U > 3$.

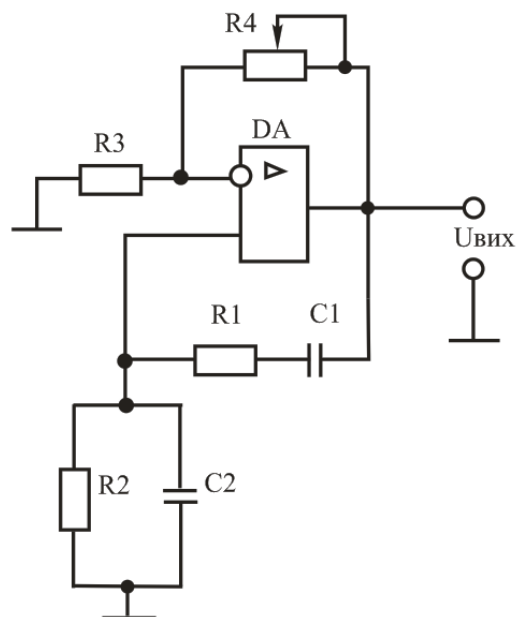


Рисунок 3.21. Схема RC- генератора з мостом Віна.

Основною характеристикою роботи автогенераторів є стабільність частоти коливань. Зміна частоти коливань обумовлена нестабільністю напруги живлення, а також зовнішніми чинниками (температурою, тиском і т. д.). Нестабільність частоти коливань характеризується коефіцієнтом відносної нестабільності $\Delta f/f_p$ (де f_p – робоча частота автогенератора), який визначається через параметри схеми:

- для LC- генераторів $\frac{\Delta f}{f_p} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right)$;
- для RC- генераторів $\frac{\Delta f}{f_p} = -\left(\frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta R}{R} \right)$.

Для зменшення нестабільності частоти застосовують параметричну і кварцеву стабілізацію. Параметрична стабілізація базується на підборі елементів схеми, які мало чутливі до змін дестабілізуючих чинників. Така стабілізація забезпечує нестабільність частоти 10^{-5} . Кварцева стабілізація заснована на використанні кварцевих резонаторів і забезпечує нестабільність частоти 10^{-8} .

Контрольні запитання

1. Поясніть призначення та наведіть класифікацію генераторів синусоїдальних коливань.
2. Наведіть умови режиму генерації генераторів синусоїдальних коливань.
3. Наведіть схему LC- генератора та основні параметри і характеристики.
4. Наведіть основні параметри і характеристики генераторів синусоїдальних коливань.
5. Наведіть схему моста Віна, його амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики.
6. Наведіть схему RC- генератора з мостом Віна на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
7. Поясніть зміст умови самозбудження генератора коливань?
8. Поясніть, чим визначається тип автогенератора гармонійних коливань?
9. Які параметри схеми автогенератора впливають на частоту коливань?
10. Поясніть суть стабілізації частоти коливань? Назвіть методи стабілізації частоти?

3.3. Пристрої для регулювання та перетворення електричної енергії.

Для отримання електричної енергії потрібного виду необхідно перетворювати енергію змінного струму в енергію постійного струму (випрямлення) або енергію постійного струму в енергію змінного струму (інвертування).

Випрямляч – це пристрій, який призначений для перетворення енергії джерела змінного струму в постійний струм. Необхідність в подібному перетворенні виникає, коли живлення споживача здійснюється постійним струмом, а джерелом електричної енергії є джерело змінного струму, наприклад промислова мережа частотою 50 Гц.

Випрямлячі підрозділяють на некеровані та керовані. За допомогою некерованих випрямлячів отримують випрямлену напругу незмінної величини. При необхідності змінювати (регулювати) величину випрямленої напруги або струму застосовують керовані випрямлячі.

За числом фаз випрямленої напруги змінного струму випрямлячі підрозділяють на однофазні, трифазні та багатофазні.

За величиною потужності випрямлячі підрозділяють на випрямлячі малої, середньої та великої потужності. Випрямлячі малої потужності є, зазвичай, однофазними; випрямлячі середньої та великої потужності – трифазними.

Однофазні випрямлячі змінного струму. При малій потужності навантаження задачу перетворення електричної енергії змінного струму в постійний струм вирішують за допомогою однофазних випрямлячів, які живляться від однофазної мережі змінного струму. Структурна схема системи перетворення електричної енергії з однофазним випрямлячем показана на рисунку 3.22.

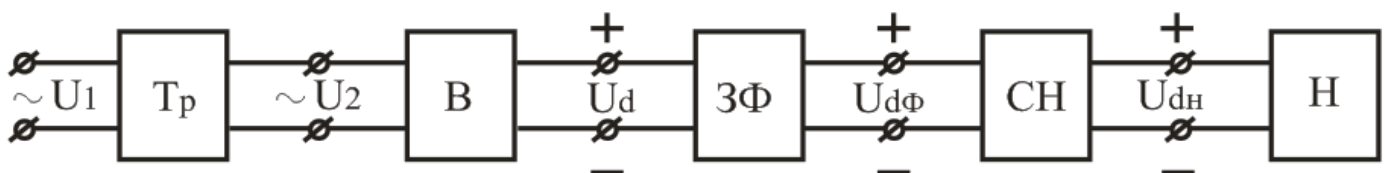


Рисунок 3.22. Структурна схема малопотужного джерела живлення: Тр – трансформатор; В – випрямляч; 3Ф – згладжуючий фільтр; СН – стабілізатор напруги; Н – навантаження.

Основою її є випрямляч (В) на одному або декількох діодах, які з'єднані за певною схемою. Функція трансформатора (Тр) зводиться до підвищення або зниження вторинної напруги U_2 при заданій первинній напрузі U_1 з метою отримання необхідної величини постійної напруги на виході. Для зменшення пульсації випрямленої напруги до виходу випрямляча підключають згладжуючий фільтр (ЗФ). Між згладжуючим фільтром та навантаженням (Н) іноді під'єднують стабілізатор напруги (СН), що забезпечує підтримання з необхідною точністю необхідної величини постійної напруги на навантаженні в умовах зміни напруги мережі живлення і струму навантаження.

Однофазний однонапівперіодний випрямляч складається з трансформатора, до вторинної обмотки якого послідовно приєднані діод VD та резистор навантаження R_H .

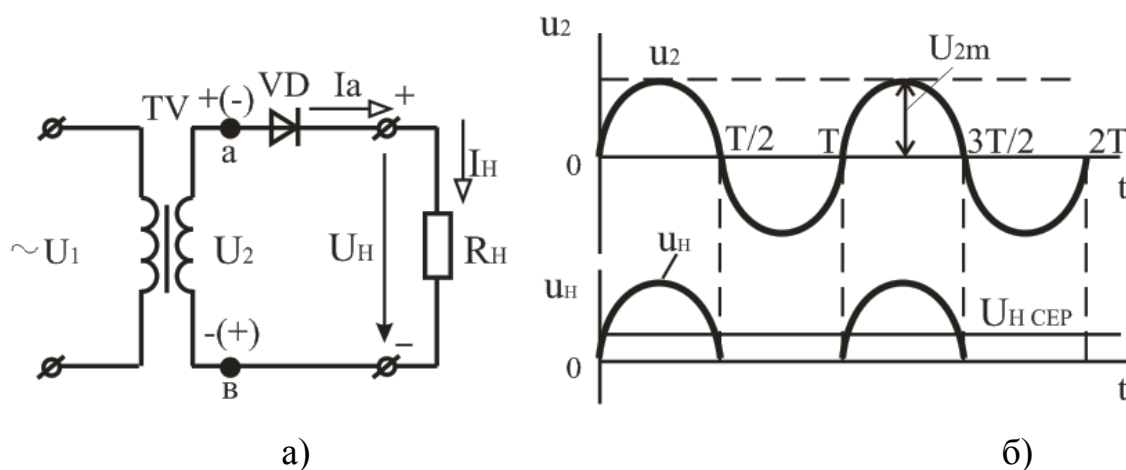


Рисунок 3.33. Однофазний однонапівперіодний випрямляч: а – схема; б – часові діаграми напруги.

Принцип дії схеми розглянемо для випадку чисто активного навантаження R_H з використанням часових діаграм напруги (рисунок 3.33, б). При прикладенні півхвилі напруги u_1 позитивної полярності на вторинній обмотці трансформатора діє напруга u_2 з полярністю показаною на рисунку 3.22, а без дужок (інтервал $0 - T/2$ на рисунку 3.33, б). До анода діода VD прикладається напруга позитивної полярності, відносно точки в. Отже, на інтервалі $0 - T/2$ діод VD відкритий. Оскільки у відкритому стані падіння напруги на діоді мале, практично вся напруга u_2 прикладається до навантаження R_H , створюючи на ній напругу u_H . На даному інтервалі анодний струм діода дорівнює струму навантаження $I_a = I_H = U_2 / R_H$. В кінці інтервалу $0 - T/2$ напруги і струми в

схемі досягають нульових значень. При прикладенні напруги u_1 негативної полярності полярність напруги u_2 (показана в дужках) на вторинній обмотці трансформатора стає зворотною (інтервал $T/2 - T$). При вказаній полярності напруги u_2 , для діода вона виявляється зворотною і діод VD на інтервалі $T/2 - T$ закритий. Через нього протікає лише незначний зворотний струм. У закритому стані практично вся напруга u_2 прикладається до діода VD , а напруга на навантаженні $u_H = 0$. Таким чином, напруга і струм на резисторі R_H мають пульсуючий характер, тобто з'являються тільки в один з напівперіодів напруги u_2 . Тому випрямляч, зібраний за схемою рисунок 3.33, а, називають однонапівперіодним.

Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом складається з трансформатора TV , діодів $VD1, VD2$ та резистора навантаження R_H .

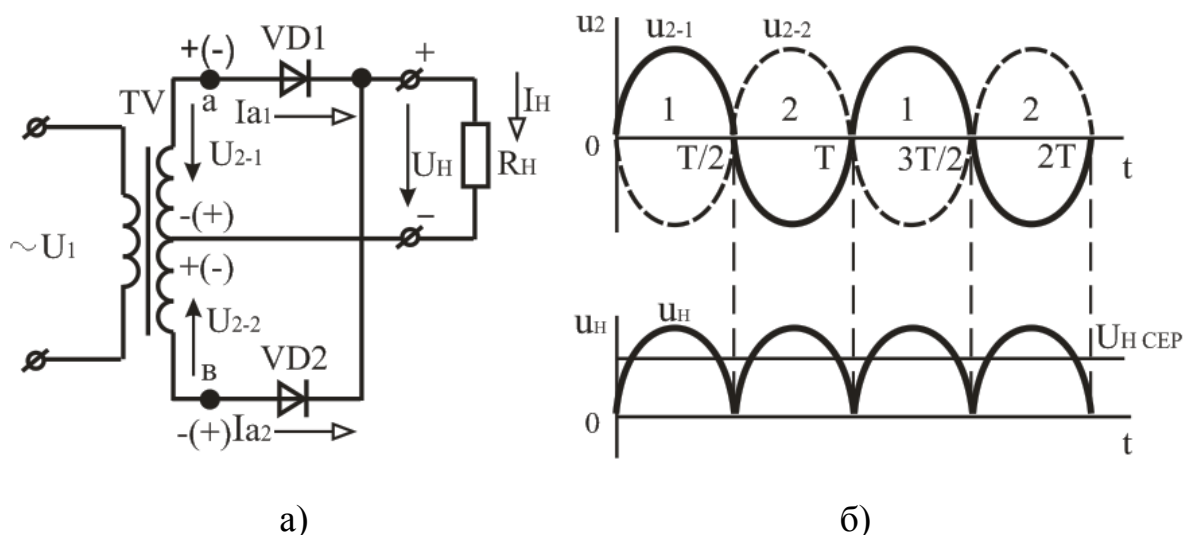


Рисунок 3.34. Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом:
а – схема; б – часові діаграми напруги

При прикладенні півхвилі напруги u_1 позитивної полярності на вторинних обмотках трансформатора діють напруги u_{2-1} та u_{2-2} з полярністю відносно нульової точки, показаної на рисунку 3.34, а без дужок (інтервал $0 - T/2$ на рисунку 3.34, б). До анода діода $VD1$ відносно нульової точки прикладається напруга позитивної полярності, а до анода діода $VD2$ – негативної. При вказаній полярності напруги на анодах діод $VD1$ на інтервалі $0 - T/2$ відкритий, а діод $VD2$ закритий. Практично вся напруга u_{2-1} прикладається до навантаження R_H (оскільки падіння напруги на діоді у

відкритому стані мале), створюючи на ньому напругу u_H . На даному інтервалі анодний струм діода дорівнює струму навантаження $I_{a1} = I_H = U_{2-1} / R_H$.

При прикладенні напруги u_1 негативної полярності полярність напруги на вторинних обмотках стає зворотною (інтервал $T/2 - T$). У провідному стані знаходиться діод VD2, а діод VD1 закритий. До навантаження R_H прикладається напруга u_{2-2} , що визначає напругу u_H тієї ж полярності, що і на попередньому інтервалі. Тепер струми в схемі визначаються півхвилею напруги позитивної полярності u_{2-2} : $I_{a2} = I_H = U_{2-2} / R_H$. У подальшому процеси в схемі повторюються.

Однофазний мостовий випрямляч. У схему випрямляча входять трансформатор з однією вторинною обмоткою і випрямний міст з чотирьох діодів VD1-VD4. Діоди VD1, VD3 відкриті на інтервалі $0 - T/2$ при півхвилі напруги u_2 позитивної полярності (показана без дужок), яка створюється під дією напруги u_1 . Відкриті діоди VD1, VD3 забезпечують зв'язок вторинної обмотки трансформатора з навантаженням, створюючи на ній напругу u_H тієї ж полярності, що і напруга u_2 . За наявності півхвилі напруги u_1 негативної полярності на інтервалі $T/2 - T$ полярність напруги зворотна. Під її дією відкриті діоди VD2, VD4 підключають напругу u_2 до навантаження з тією ж полярністю, що і на попередньому інтервалі.

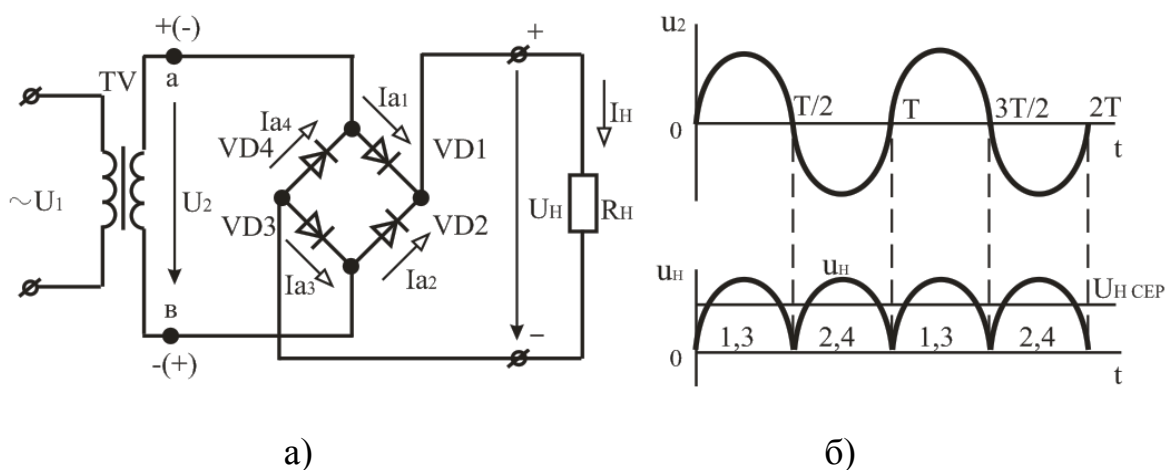


Рисунок 3.35. Однофазний мостовий випрямляч: а – схема; б – часові діаграми напруги.

Перевагами мостової схеми випрямляча є більш простий трансформатор, що містить тільки одну вторинну обмотку, і меншу зворотну напругу, на яку слід

вибирати діоди. Вказані переваги компенсують недолік схеми, що полягає в більшому числі діодів.

Однофазні випрямлячі призначені для живлення постійним струмом різних систем і пристроїв промислової електроніки, які вирішують завдання управління, регулювання, контролю, відображення інформації і т. д.

Трифазні випрямлячі призначені для живлення навантажень середньої і великої потужності. Вони порівняно з однофазними мають багато переваг:

- краще використовуються випрямні діоди за струмом;
- суттєво нижчий коефіцієнт пульсацій;
- ефективне використання габаритної потужності трансформатора;
- більш ефективне використання згладжуючих фільтрів.

До мережі трифазні випрямлячі підключаються через трифазні трансформатори, обмотки яких вмикаються «зіркою» або «трикутником». Найрозповсюдженішими є такі два типи схем трифазних випрямлячів: однонапівперіодна з нульовим виводом (схема Міткевича); двонапівперіодна мостова (схема Ларіонова).

Трифазний однонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом (схема Міткевича) зображена на рисунку 3.36. Ця схема складається із трифазного трансформатора TV , випрямних діодів $VD1$ – $VD3$ та резистора навантаження R_H , який вмикається між спільним виводом вторинних обмоток трансформатора (нульовим виводом) та спільною точкою з'єднання випрямних діодів.

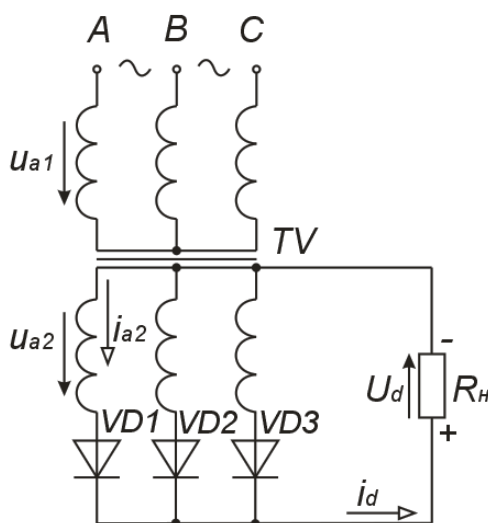


Рисунок 3.36. Схема трифазного однонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом трансформатора.

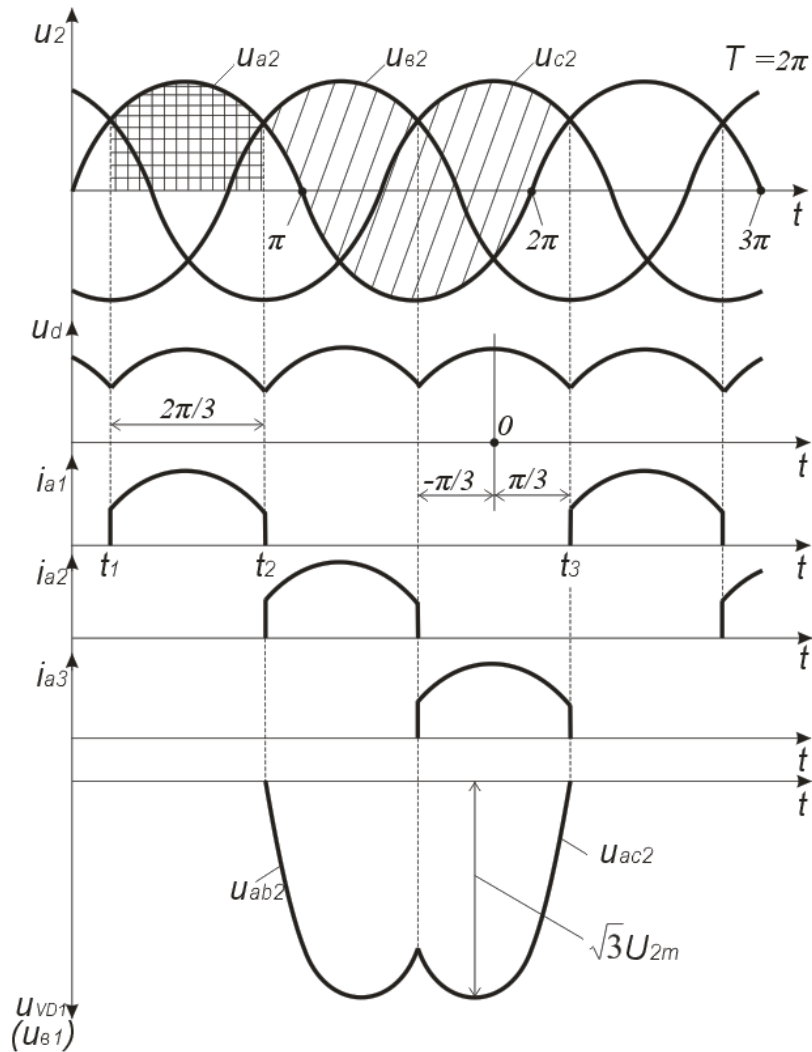


Рисунок 3.37. Часові діаграми роботи трифазного однонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом.

Фактично ця схема являє собою три однофазних однонапівперіодних випрямляча, увімкнених паралельно. Тому первинні обмотки трансформатора можуть з'єднуватися як «зіркою», так і «трикутником» (забезпечуючи, наприклад, підключення до мережі з фазною напругою 220 В або 127 В), а вторинні – лише «зіркою». Випрямні діоди працюють по черзі. За період напруги живлення кожен діод знаходиться у провідному стані третину періоду, причому проводить той діод, до анода якого на даний момент прикладена найбільш додатна фазна напруга.

Роботу схеми трифазного однонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом трансформатора ілюструють часові діаграми, які наведені на рисунку 3.37. Як слідує із діаграм, наприклад, на інтервалі $t_1 - t_2$ найбільш додатна напруга є на вторинній обмотці трансформатора фази А, тому у провідному стані знаходиться діод VD1. Але на інтервалі $t_2 - t_3$ він закритий лінійною напругою u_{ab} або u_{ac} (даний інтервал

відповідає заштрихованій скісними лініями ділянці діаграми u_2): анод має потенціал фази u_{a2} , а катод – потенціал фази, яка знаходиться у провідному стані – u_{b2} або u_{c2} . Частота пульсації випрямленої напруги в три рази перевищує частоту мережі. Недоліком даної схеми є наявність постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора, зумовленого тим, що, як і у будь-якої однофазної схеми, вторинною обмоткою трансформатора струм за період проходить лише один раз і в одному напрямку, тобто цей струм має постійну складову. Це вимагає використання трансформатора із підвищеним перерізом магнітопроводу (підвищеної встановленої потужності).

Трифазний двонапівперіодний мостовий випрямляч. Трифазна мостова (двотактна) схема (схема Ларіонова) зображена на рисунку 3.38. У цій схемі і первинна, і вторинна обмотки трансформатора можуть вмикатися як «зіркою», так і «трикутником». Можливість вмикання вторинної обмотки двома способами забезпечує можливість отримання двох різних вихідних напруг випрямляча, значення яких відрізняються у $\sqrt{3}$ раз. Надалі будемо розглядати схему при вмиканні вторинних обмоток у зірку. Шість випрямних діодів увімкнені у трифазну мостову схему і утворюють дві групи: анодну – VD1, VD2, VD3 та катодну – VD4, VD5, VD6. Навантаження вмикається між спільними точками анодної і катодної груп діодів. Можна виділити три однофазних мости, що підключені до лінійних (у даному разі) вторинних напруг і паралельно до навантаження. Один з таких мостів на схемі обведено штрихпунктирною лінією. У провідному стані завжди знаходяться два діоди: один з анодної групи і один з катодної. Причому струм у схемі протікає від фази з найбільш додатною на даний момент напругою до фази з найбільш від'ємною напругою, як, наприклад, струм i_{ab} у момент часу, що відповідає t_1 , показаний на часових діаграмах, які ілюструють роботу схеми і наведені на рисунку 3.38. На діаграмі $u_d = f(t)$ також вказано проміжки, на яких у провідному стані знаходяться відповідні діоди.

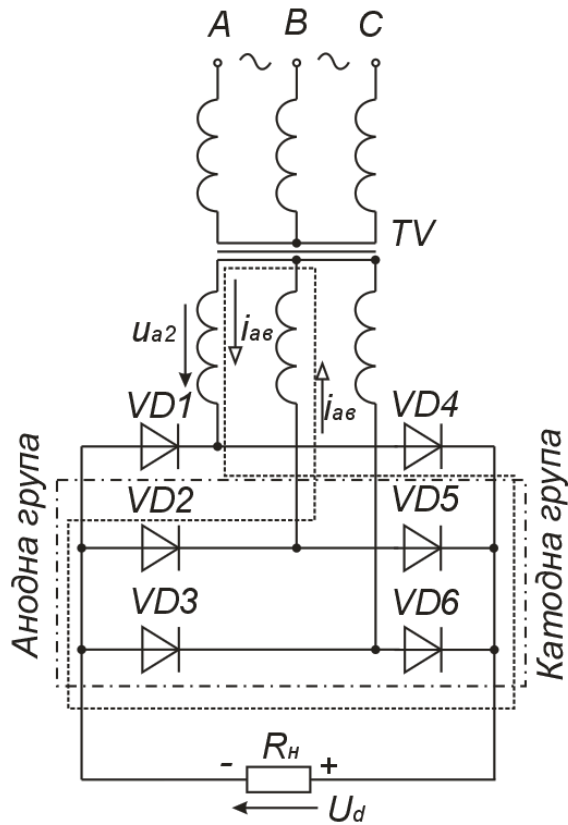


Рисунок 3.38. Схема трифазного мостового випрямляча.

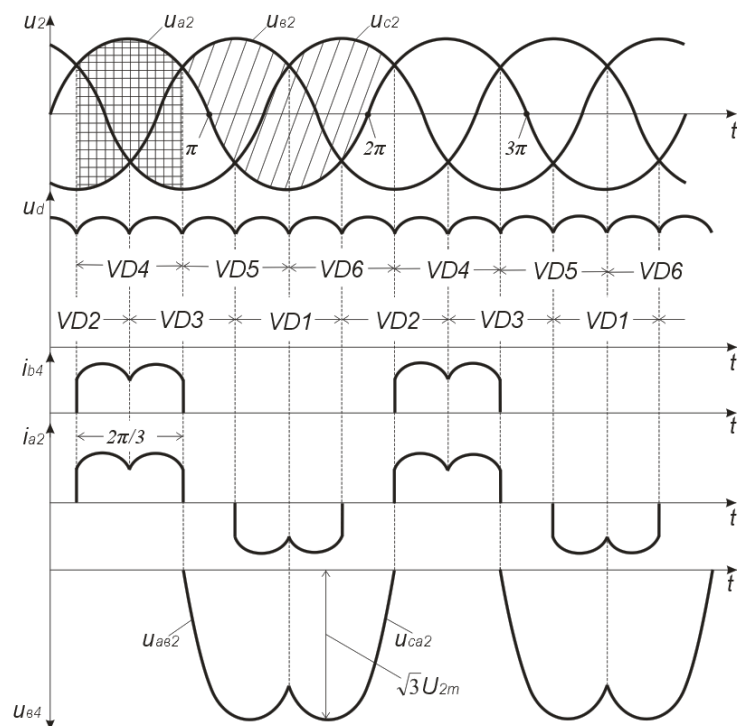


Рисунок 3.39. Часові діаграми роботи трифазного мостового випрямляча.

У цій схемі відсутнє підмагнічування магнітопроводу, оскільки у вторинному колі кожної обмотки трансформатора за період напруги мережі струм протікає двічі, причому у різних напрямках (див. діаграму i_{a2} на рисунку 3.39). Схема Ларіонова у порівнянні зі схемою Міткевича має такі переваги:

- за рівних фазних напруг середнє значення випрямленої напруги у два рази вище (потрібно задавати меншу кількість витків вторинних обмоток трансформатора);
- більш низький коефіцієнт пульсацій (менш ніж шість відсотків), що часто дозволяє використовувати схему Ларіонова без фільтра;
- краще використання трансформатора за потужністю за рахунок відсутності підмагнічування осердя.

Щоправда, кількість діодів у схемі Ларіонова в два рази більша, але на даний час це несуттєво (за винятком випрямлення малих за значенням напруг), оскільки вартість діодів невелика порівняно з вартістю трансформатора, який в схемі Міткевича повинен бути приблизно на тридцять відсотків потужнішим.

Основні параметри схем випрямлення:

- середнє значення випрямлених напруги U_d ($U_{H\text{СЕР}}$) та струму I_d ($I_{H\text{СЕР}}$);
- амплітуди першої гармоніки напруги U_{d1m} та струму I_{d1m} ;
- діючі значення напруги U_2 та струму I_2 у вторинній обмотці трансформатора;
- діючі значення напруги U_1 та струму I_1 в первинній обмотці трансформатора;
- максимальне значення зворотної напруги $U_{зв\max}$;
- коефіцієнт пульсації $KП = U_{d1m} / U_d$.

Таблиця 3.2 Співвідношення між параметрами діодів, трансформатора та споживача залежно від типу випрямляча.

Тип випрямляча	$I_{доп.}$	$U_{зв.}$	U_2	$P_{тр.}$	I_2
Однопівперіодний однофазний	$\geq I_H$	$3,14U_H$	$2,22U_H$	$3,09P_H$	$1,57I_H$
Двопівперіодний однофазний (з нульовим виводом)	$\geq 0,5 I_H$	$3,14U_H$	$1,11U_H$	$1,48P_H$	$0,85I_H$
Мостовий однофазний	$\geq 0,5 I_H$	$1,57U_H$	$1,11U_H$	$1,23P_H$	$0,9I_H$
Двополярний випрямляч	$\geq 0,5 I_H$	$3,14U_H$	$1,11U_H$	$1,48P_H$	$0,785I_H$
Паралельний з множенням	$\geq I_H$	$1,57U_H$	$0,555U_H$	$1,23P_H$	$1,8I_H$
Трифазний однопівперіодний	$\geq \frac{1}{3} I_H$	$2,09U_H$	$0,885U_H$	$1,34P_H$	$0,58I_H$
Трифазний двопівперіодний	$\geq \frac{1}{3} I_H$	$1,04U_H$	$0,427U_H$	$1,04P_H$	$0,81I_H$

Згладжувальні фільтри. Згладжувальчі фільтри призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги. Основним параметром згладжувальних фільтрів є коефіцієнт згладжування, який дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій на вході фільтру $K_{ПВХ}$ до коефіцієнта пульсацій на його виході, тобто

$$q = \frac{K_{ПВХ}}{K_{ПВИХ}}.$$

Згладжувальні фільтри виконують на основі реактивних елементів – дроселів та конденсаторів, які чинять відповідно великий і малий опори змінному струму і, навпаки – для постійного струму. Вказані властивості цих елементів використовують при побудові простих згладжуючих фільтрів: ємнісного та індуктивного.

За видом реактивних елементів розрізняють ємнісні, індуктивні та змішані фільтри. Змішані згладжуючі фільтри залежно від способу з'єднання елементів, що входять до його складу, підрозділяють на Г і П - подібні. Ці фільтри можуть бути одноланковими, дволанковими і багатоланковими. Окрім пасивних фільтрів на елементах С, L, R застосовують електронні (активні) згладжувальні фільтри на

транзисторах. Використання транзисторів засноване на тому, що їх опір постійному струму (статичний опір) на 2 – 3 порядки менше опору змінному струму (динамічний опір).

Ємнісний фільтр C_{Φ} вмикають паралельно резистору навантаження R_H (рисунок 3.40, а). Протягом інтервалу часу $t_1 - t_2$ конденсатор C_{Φ} заряджається через відкриті діоди до амплітудного значення напруги u_{BX} , оскільки в цьому інтервалі часу $u_{BX} > u_C$. В інтервалі часу $t_2 - t_3$ напруга $u_C > u_{BX}$ і конденсатор розряджається через резистор навантаження R_H з постійною часу $\tau = C_{\Phi} R_H$. При цьому напруга $u_C = u_H$ знижується до деякого найменшого значення U_{Cmin} . Починаючи з моменту часу t_3 напруга u_C на конденсаторі стає менше напруги u_{BX} . Конденсатор C_{Φ} починає заряджатися через відкриті діоди і процеси повторюються. Як показують часові діаграми (рисунок 3.40, б), при увімкненні ємнісного фільтра напруга u_H не зменшується до нуля, а пульсує в деяких межах, збільшуючи середнє значення випрямленої напруги.

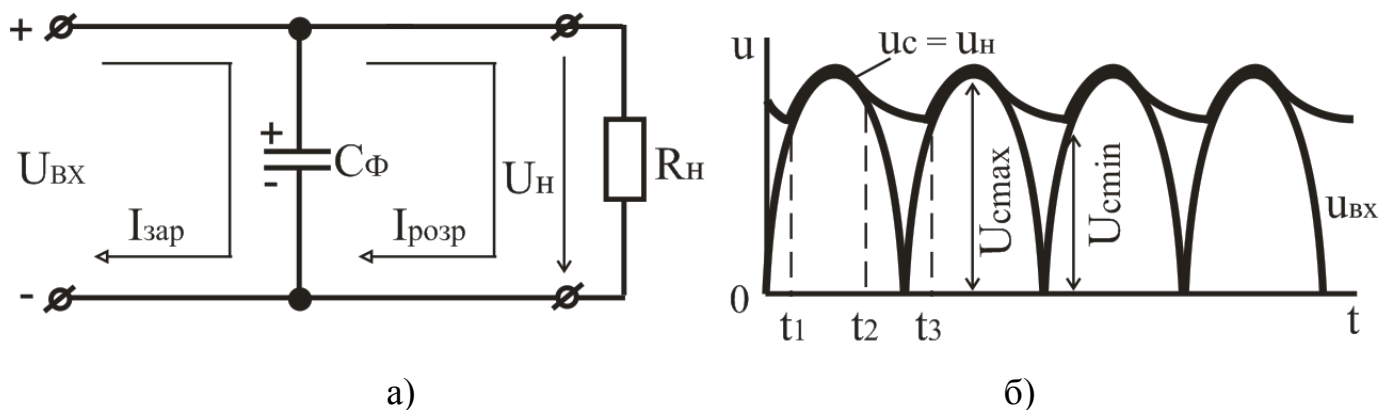


Рисунок 3.40. Схема ємнісного фільтра та часові діаграми напруги однофазного двонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром: а – схема; б – часові діаграми напруги.

Ємність конденсатора C_{Φ} вибирають такої величини, щоб для основної гармоніки випрямленої напруги опір конденсатора був на багато менший R_H , тобто

$$\frac{1}{2\pi f C_{\Phi}} \ll R_H \text{ або } C_{\Phi} \gg \frac{1}{2\pi f R_H}.$$

При такому виборі величини ємності конденсатора постійна часу розряду $\tau_{розр}$ значно більше періоду зміни випрямленої напруги:

$$\tau_{розр} = C_{\Phi} R_H \gg \frac{1}{2\pi f} = T,$$

і конденсатор C_{Φ} розряджається порівняно повільно, тобто напруга на ньому зменшується неістотно. Це приводить до збільшення середнього значення напруги на резисторі навантаження $U_{H\text{СЕР}}$ в порівнянні з величиною $U_{H\text{СЕР}}$ у відсутності фільтру і зменшенню змінної складової, а отже, до зниження коефіцієнта пульсацій КП.

Ємнісний фільтр доцільно застосовувати при високоомному резисторі навантаження R_H при потужності P_H не більше декількох десятків ватт.

Індуктивний фільтр вмикають послідовно з резистором R_H (рисунок 3.41, а). Необхідною умовою, що забезпечує згладжуючу дію індуктивного фільтру, є умова:

$$2\pi f L_{\Phi} \gg R_H.$$

Індуктивні фільтри зазвичай застосовують при великих струмах навантаження і малих опорах резистора навантаження R_H .

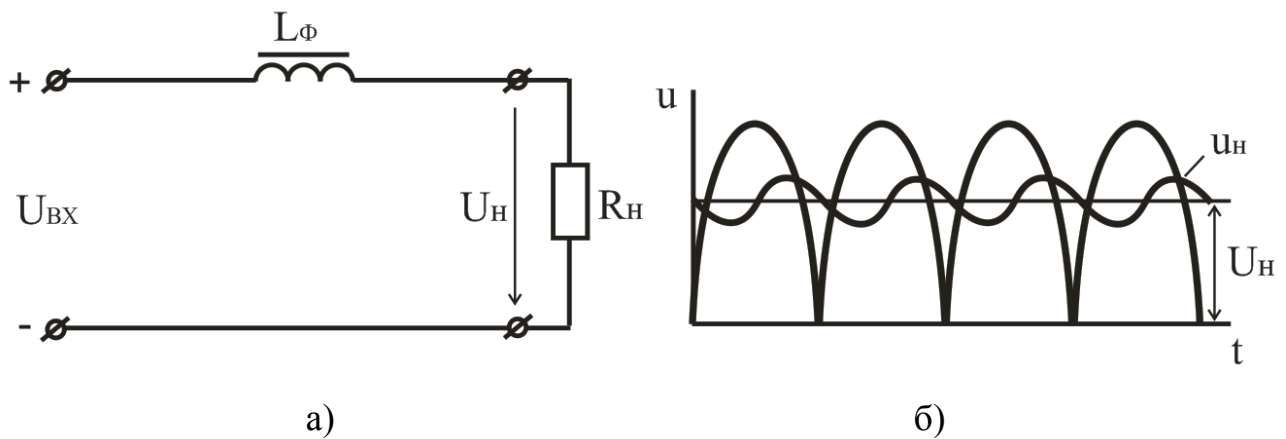


Рисунок 3.41 – Схема індуктивного фільтру та часові діаграми напруги однофазного двонапівперіодного випрямляча з індуктивним фільтром: а – схема; б – часові діаграми напруги.

Для підвищення коефіцієнта згладжування використовують Γ - подібні LC, RC – фільтри, багатоланкові Π - подібні фільтри та електронні згладжувальні фільтри на транзисторах.

Стабілізатори напруги – це електронні пристрої, призначені для автоматичної підтримки незмінного значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору (струму) навантаження.

За принципом роботи стабілізатори напруги підрозділяються на параметричні та компенсаційні. Параметричний метод стабілізації базується на зміні параметрів нелінійного елементу стабілізатора в залежності від зміни дестабілізуючого чинника, а стабілізатор називають параметричним. У компенсаційному методі стабілізації у вимірному елементі порівнюється величина, що стабілізується, і виробляється сигнал розузгодження. Цей сигнал перетворюється, підсилюється і подається на регулюючий елемент. Такий стабілізатор називають компенсаційним.

Схема **параметричного стабілізатора напруги** наведена на рисунку 3.42, а. Вона складається з баластного резистора R_B і стабілітрона VD. Стабілізатор підключається до виходу випрямляча з фільтром. Навантаження увімкнене паралельно стабілітрону. Особливості роботи такого стабілізатора напруги засновані на тому, що напруга стабілітрона на зворотній гілці його вольт-амперної характеристики змінюється незначно в широкому діапазоні зміни зворотного струму стабілітрона. Зміна напруги на вході стабілізатора зумовлює значну зміну струму стабілітрона при незначній зміні напруги на ньому. Стабілізатори характеризуються коефіцієнтом стабілізації:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ}}{\Delta U_{ВИХ} / U_{ВИХ}},$$

який для параметричних стабілізаторів складає $K_{CT} = 20 \dots 50$. Рівняння електричної рівноваги для такого стабілізатора має вигляд:

$$U = U_H + IR_B,$$

де R_B – баластний резистор, необхідний для зменшення впливу дестабілізуючих чинників на напругу навантаження. Опір баластного резистора R_B вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела U , напруга і струм стабілітрона також відповідали номінальним значенням I_{CTH} . Величину I_{CTH} визначають за паспортними даними стабілітрона за виразом:

$$I_{CT.H} = \frac{I_{CT.min} + I_{CT.max}}{2}.$$

Тоді опір баластного резистора визначаємо з формули:

$$R_B = \frac{U - U_{CT.H}}{I_{CT.H} + I_H},$$

де $I_H = P_H / U_H$; $U \approx U_d$; $I = I_{CT.H} + I_H$.

Роботу параметричного стабілізатора розглянемо за допомогою вольт-амперної характеристики стабілітрона і прямої навантаження (рисунок 3.42, б). Характеристика навантаження будується (при номінальній напрузі джерела) по двох точках, а саме: точка А з координатами $U_{CT.H}$ і точка Б на осі ординат, яка визначається за виразом $I = U / R_B$. Через ці точки будують пряму навантаження. Якщо напруга U , що подається на вхід стабілізатора, збільшиться на ΔU із-за підвищення, наприклад, напруги мережі, тоді характеристика навантаження баластного резистора R_B переміститься паралельно самій собі і займе положення, що відповідає струму $I_{CT.max}$ і напрузі U'_H . Напруга $U_{CT} = U_H$ залишиться практично незмінною.

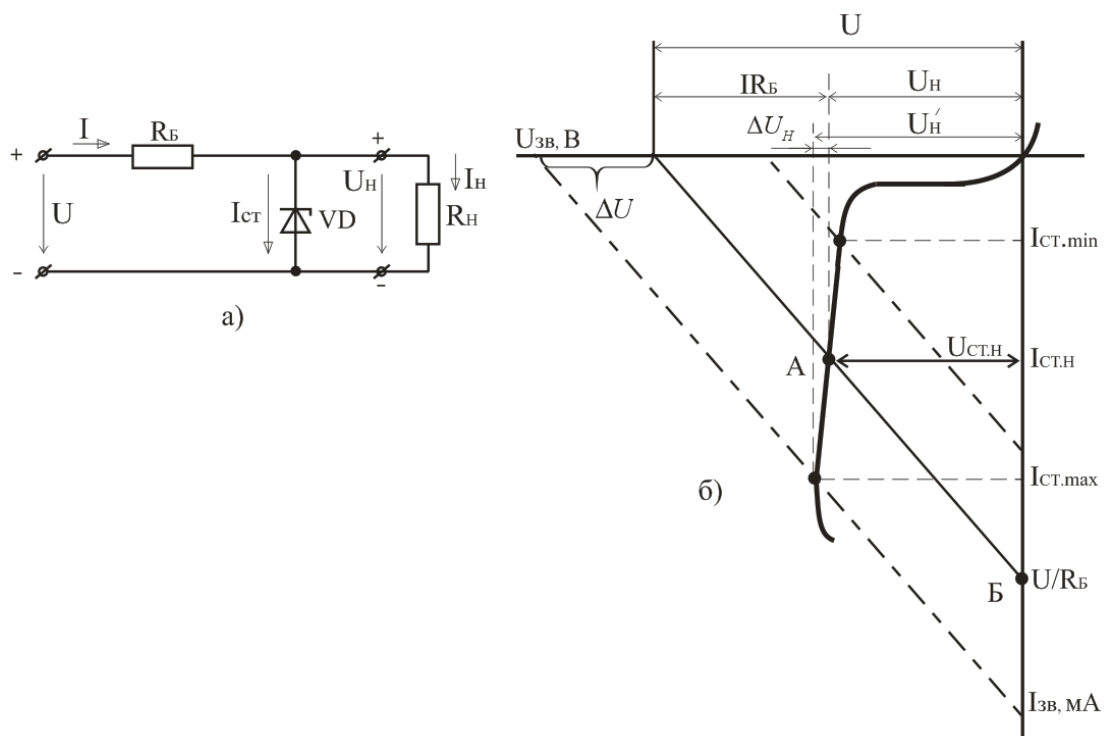


Рисунок 3.42. Параметричний стабілізатор напруги: а – схема; б – графічна інтерпретація принципу роботи.

Напруга на стабілітроні залишиться незмінною також при зниженні вхідної напруги стабілізатора та при змінах струму навантаження. Переваги параметричних стабілізаторів – простота конструкції і надійність роботи, недолік – низький коефіцієнт стабілізації та к.к.д., а також вузький і нерегульований діапазон напруги, що стабілізується.

Компенсаційні стабілізатори напруги мають вищий коефіцієнт стабілізації ($K_{CT} > 50$) і менший вихідний опір в порівнянні з параметричними. Їх принцип роботи заснований на тому, що зміна напруги на навантаженні (під дією зміни $U_{ВХ}$ або I_H) передається на регулюючий елемент, що спеціально вводиться в схему і перешкоджає зміні напруги U_H .

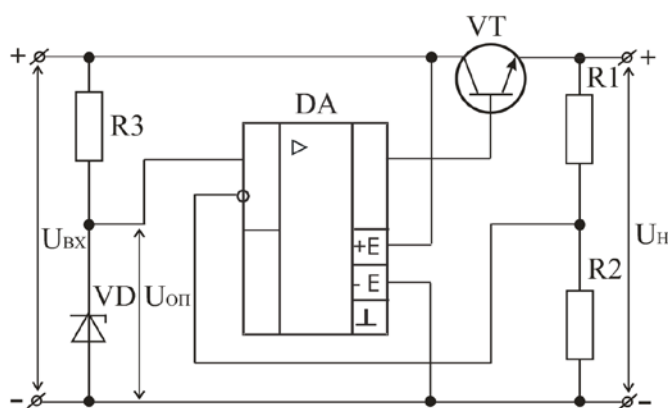


Рисунок 3.43. Схема компенсаційного стабілізатора напруги на операційному підсилювачі з параметричним стабілізатором на вході.

Регулюючий елемент (транзистор) може бути увімкнений або паралельно навантаженню, або послідовно з ним. Залежно від цього розрізняють два типи компенсаційних стабілізаторів напруги: паралельні і послідовні. Енергетичні показники (зокрема к.к.д.) послідовних стабілізаторів напруги вищі, ніж паралельних. Це є головною причиною того, що послідовні стабілізатори знайшли найбільше застосування на практиці. З переваг паралельних стабілізаторів слід зазначити їх нечутливість до перевантажень за струмом, зокрема коротким замиканням вихідного кола. Послідовні стабілізатори вимагають пристроїв захисту регулюючого елемента при перевантаженнях за струмом. На рисунку 3.43 наведено схему компенсаційного стабілізатора напруги на операційному підсилювачі з параметричним стабілізатором

на вході КСН. Операційний підсилювач ввімкнений за схемою неінвертуючого підсилювача, на вхід якого подається опорна напруга $U_{оп}$ від стабілітрона VD. Для збільшення вихідного струму стабілізатора використовується повторювач напруги на транзисторі VT. Вихідна напруга визначається за формулою:

$$U_H = U_{оп} \cdot (R1/R2 + 1).$$

Інтегральні стабілізатори напруги. Значна потреба у стабілізаторах постійної напруги, які б були прості у використанні, зумовила розробку і впровадження у виробництво інтегральних мікросхем стабілізаторів напруги з безперервним регулюванням (серія K142EH). У цю серію увійшли стабілізатори наступних типів: з регулюванням вихідної напруги (K142EH1 – K142EH4); з фіксованою вихідною напругою (K142EH5; K142EH8; K142EH9; КРЕН5; КРЕН8; КРЕН9); з двополярними вхідними і вихідними напругами (K142EH6), що використовується для живлення операційних підсилювачів.

Інтегральні стабілізатори серії K142 розраховані на струми 0,15 – 3 А і напругу 3 – 30 В при потужності до 30 Вт (з зовнішнім радіатором, який дозволяє розсіяти потужність до 10 Вт). Вихідний опір перебуває в межах $R_{вих} = 0,1 – 0,2$ Ом. Технічні характеристики інтегральних стабілізаторів напруги: U_H – номінальна вихідна напруга; $I_{H\ max}$ – максимальний струм навантаження; $K_{H\ U}$ – коефіцієнт нестабільності за напругою; $K_{H\ I}$ – коефіцієнт нестабільності за струмом; $(U_{вх} – U_H)_{\min}$ – допустима мінімальна різниця між вхідною і вихідною напругою.

Крім основного призначення – стабілізації напруги, - інтегральні стабілізатори напруги можуть виконувати функцію згладжуючого фільтра, захисту від електричних і теплових перевантажень, стабілізації струму, порогових пристроїв тощо. Інтегральні стабілізатори напруги з фіксованою вихідною напругою можуть використовуватись без зовнішніх елементів. Вони мають вмонтований захист від перевантаження за струмом і тепловий захист від максимально допустимої температури кристала (175 °С), що значно підвищує їх надійність. Типова схема увімкнення ІСН з фіксованою вихідною напругою наведена на рисунку 3.44. Вихідний конденсатор С6 вибирають електролітичного типу ємністю близько 10 мкФ. Вхідний конденсатор С1 ($\approx 0,1$ мкФ) усуває генерації при стрибкоподібному увімкненні вхідної напруги, забезпечує аперіодичний вихід стабілізатора на режим при його увімкненні.

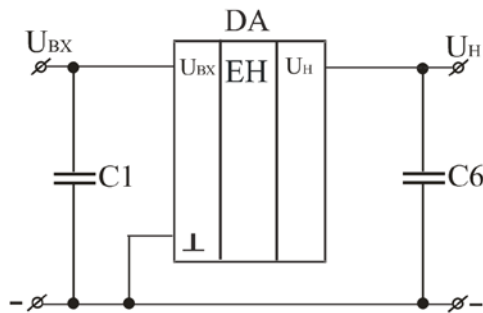


Рисунок 3.44 Схеми увімкнення інтегральних стабілізаторів напруги К142ЕН5 (КРЕН5), К142ЕН8 (КРЕН8), К142ЕН9 (КРЕН9).

Контрольні запитання

1. Поясніть, що таке випрямляч. Для чого призначені випрямлячі?
2. Назвіть основні параметри, які характеризують роботу випрямлячів?
3. Наведіть схему і поясніть принцип дії однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом.
4. Наведіть схему і поясніть принцип дії однофазного мостового випрямляча.
5. Поясніть, у яких випадках застосовують трифазні випрямлячі.
6. Наведіть схему Міткевича і поясніть принцип її роботи.
7. Наведіть схему Ларіонова і поясніть принцип її роботи.
8. Порівняйте схему Міткевича зі схемою Ларіонова. В яких випадках яка з них більш придатна і чому?
9. Наведіть основні розрахункові співвідношення для однофазних випрямлячів.
10. Поясніть, що таке згладжуючий фільтр? Для чого використовуються згладжуючі фільтри і на чому ґрунтується їх дія?
11. Назвіть різновиди згладжуючих фільтрів.
12. Поясніть, в яких випадках застосовують переважно ємнісні або індуктивні фільтри.
13. Поясніть, що таке багатоланковий фільтр?
14. Поясніть, що таке стабілізатор напруги постійного струму. Для чого призначені і в яких випадках застосовуються стабілізатори?
15. Наведіть схему, поясніть принцип дії параметричного стабілізатора.
16. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора, поясніть призначення елементів і принцип дії.

4. Імпульсні пристрої.

На відміну від аналогових пристроїв, в яких сигнали змінюються безперервно в часі, в імпульсних пристроях використовуються сигнали (напруга, струм) імпульсної форми. Короткочасні зміни струмів і напруги називають електричними імпульсами. Короткочасні відхилення напруги або струму від деякого постійного рівня можуть відбуватися за різними законами. Вони визначають форму імпульсів (рисунок 4.1): прямокутну 1, трапецеїдальну 2, трикутну 3, дзвоноподібну 4, пилкоподібну 5, експоненціальну 6, ступінчасту 7 та ін.

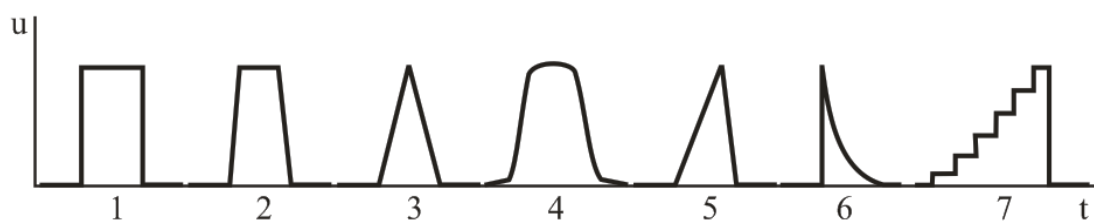


Рисунок 4.1. Форма імпульсних сигналів: 1 – прямокутний, 2 – трапецеїдальний, 3 – трикутний, 4 – дзвоноподібний, 5 – пилкоподібний, 6 – експоненціальний, 7 – ступінчастий

Прийнято розрізняти наступні ділянки імпульсу: фронт (передній фронт), вершина і зріз (задній фронт). Фронт відповідає швидкому зростанню сигналу до максимального значення; вершина – порівняно повільній зміні сигналу протягом деякого проміжку часу; зріз – швидкому спаду імпульсу.

Параметрами імпульсу є: амплітуда, тривалість, тривалість фронту, тривалість зрізу і спад вершини. Амплітуда імпульсу U_m – визначає найбільшу напругу імпульсного сигналу. Тривалість імпульсу t_i – характеризує тривалість імпульсу в часі. Тривалість фронту t_f і тривалість зрізу імпульсу $t_{зр}$ – характеризує відповідно час наростання і спаду імпульсу. Спад вершини імпульсу ΔU відображає зменшення напруги на плоскій частині імпульсу.

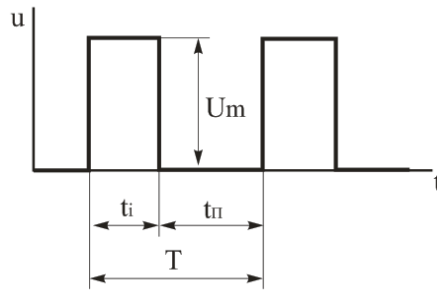


Рисунок 4.2. Періодична послідовність імпульсів прямокутної форми: T - період повторення; t_i – тривалість імпульсу; $t_{п}$ – пауза; U_m - амплітуда імпульсу

Параметрами послідовності імпульсів (рисунок 4.2) є: період повторення (надходження), частота повторення, пауза, коефіцієнт заповнення і шпаруватість імпульсів. Період повторення імпульсів T – інтервал часу між відповідними точками (наприклад, між початками) двох сусідніх імпульсів. Частота повторення імпульсів f – величина, зворотна періоду повторення $f = 1/T$. Пауза $t_{п}$ – інтервал часу між закінченням одного і початком наступного імпульсів: $t_{п} = T - t_i$. Коефіцієнт заповнення γ – відношення тривалості імпульсів до періоду їх проходження: $\gamma = t_i / T$. Шпаруватість імпульсів q – величина, зворотна коефіцієнту заповнення: $q = T/t_i = 1/\gamma$.

Ключовий режим роботи біполярних транзисторів. Транзисторна імпульсна і цифрова техніка базується на роботі транзистора в ключовому режимі. Головне призначення транзистора, що працює в ключовому режимі, замикання і розмикання кола навантаження. Ключова схема на біполярному транзисторі наведена на рисунку 4.3. Транзистор VT виконує функцію ключа в послідовному колі з резистором R_K і джерелом живлення E_K . Режим закритого стану транзистора (режим відсічки). Це режим, при якому обоє його переходи закриті (і емітерний і колекторний). Струм бази в цьому випадку дорівнює нулю. Струм колектора буде дорівнює зворотньому струму.

Режим закриття транзистора здійснюється подачею на вхід транзистора напруги від'ємної полярності $U_{ВХ} < 0$. Під дією вхідної напруги емітерний перехід транзистора закривається ($U_{BE} > 0$) і його струм $I_E = 0$. Разом з тим через резистор R_B протікає зворотний струм колекторного переходу. Протікання через навантаження зворотний струм колекторного переходу пов'язане з тим, що транзистор в закритому стані не забезпечує повного відключення резистора навантаження R_K від джерела живлення.

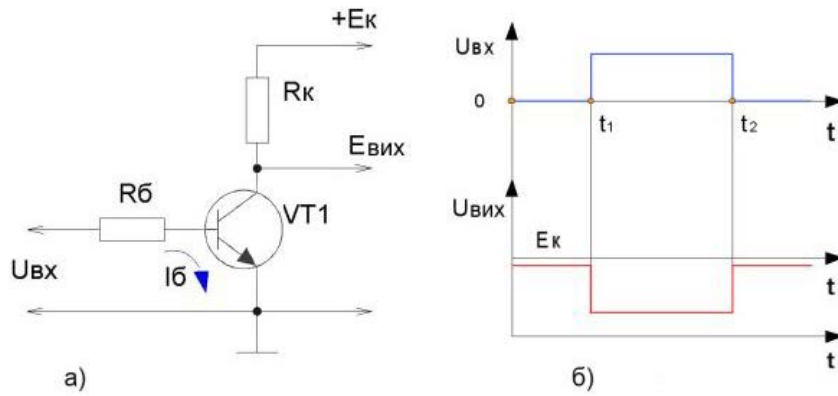


Рисунок 4.3. Ключовий режим роботи транзистора: а – схема транзисторного ключа; б – діаграма вхідних та вихідних напруг.

Мале значення зворотного струму колекторного переходу є одним з критеріїв вибору транзистора для ключового режиму роботи. У проміжок часу від 0 до t_1 (рисунок 4.3, б) вхідна напруга й струм бази близькі до нуля, і транзистор перебуває в режимі відсікання. Вихідна напруга $U_{вих}$ ($E_{вих}$) у закритому стані транзистора буде максимальною і фактично відповідатиме E_k з урахуванням падіння резисторі R_k – ключ матиме максимальний рівень вихідного сигналу.

У проміжок часу від t_1 до t_2 вхідна напруга ($U_{вх} > 0$) й струм бази транзистора стають максимальними, і транзистор перейде в режим насичення (відкритий стан). Режим відкритого стану транзистора досягається зміною полярності вхідної напруги. Резистор R_b обмежує струм бази транзистора, щоб він не перевищував максимально допустимого значення. При повному відкритті і насиченні транзистора VT , через його колекторний перехід і резистор R_k протікає струм I_k . Вихідна напруга $U_{вих}$ у відкритому стані транзистора буде мінімальною і відповідатиме падінню на транзисторі – ключ матиме мінімальний рівень вихідного сигналу. Після моменту часу t_2 транзистор переходить у режим відсікання. Транзисторний ключ є інвертором, тобто змінює фазу сигналу на 180° . **На схемі вказаного транзисторного ключа реалізується логічний елемент ІІ.**

Системи числення. В цифрових пристроях в основі яких використовуються імпульсні пристрої, електронні елементи працюють в двох стійких станах, що характеризують подачу електричного сигналу, чи його припинення. Це означає, що якщо одному стану присвоїти значення 0, а іншому 1, то будь-ку інформацію можна

надати в вигляді кодової комбінації нулів і одиниць. У інформаційних технологіях для кодування інформації застосовуються двійкова, десяткова, вісімкова, та шістнадцяткова системи.

Двійкова система числення - це система числення, база якої дорівнює двом та використовує для запису чисел тільки два символи: зазвичай 0 (нуль) та 1 (одиницю). Числа, представлені в цій системі часто називають двійковими або бінарними числами. Для запису числа у двійковій системі числення використовується представлення цього числа за допомогою степенів числа 2. Завдяки тому, що таку систему доволі просто використовувати в електричних схемах, двійкова система отримала широке розповсюдження у світі обчислювальних пристроїв.

Двійкове число можна представити як послідовність будь-яких об'єктів, які можуть знаходитися в одному з двох можливих станів. Наприклад: числа, що можуть приймати значення 0 або 1; вузли електричної схеми, які може бути, а може не бути знеструмлено. Зазвичай, для позначення двійкових чисел використовують нулі та одиниці. Перші персональні комп'ютери для відображення чисел мали ряд електричних лампочок (кожна з яких, зрозуміло, може або світитися, або бути вимкненою).

У двійковій системі будь-які числа зображують послідовністю двох цифр 0 і 1. Для запису числа у двійковій системі числення використовується представлення цього числа за допомогою степенів числа 2. При цьому кожен перший розряд більший за попередній у два рази.

Для перетворення з двійкової системи в десяткову використовують таку таблицю ступенів основи 2.

1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
------	-----	-----	-----	----	----	----	---	---	---	---

Наприклад, дано двійкове число 1101101В. Для конвертування в десяткове записуємо його як суму за розрядами таким чином:

$$1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 109$$

Можна записати у вигляді таблиці таким чином:

1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
				1	1	0	1	1	0	1
				+64	+32	+0	+8	+4	+0	+1

Пересувайтесь справа наліво. Під кожною двійковою одиницею напишіть її еквівалент у рядку нижче. Складіть отримані десяткові числа. Таким чином, двійкове число 1101101В рівнозначно десятковому 109D.

Для перетворення десяткового числа у двійкове, потрібно послідовно ділити десяткове число на основу двійкової системи – число 2. У частку потрібно записувати тільки ціле число.

Наприклад, 347D=XВ-?

$$347/2=173 \text{ з залишком } 1$$

$$173/2=86 \text{ з залишком } 1$$

$$86/2=43 \text{ без залишку } 0$$

$$43/2=21 \text{ з залишком } 1$$

$$21/2=10 \text{ з залишком } 1$$

$$10/2=5 \text{ без залишку } 0$$

$$5/2=2 \text{ з залишком } 1$$

$$2/2=1 \text{ без залишку } 0$$

$$1/2=0 \text{ з залишком } 1$$

Отже, ми ділимо кожне частне на 2 і записуємо залишок на кінець двійкового запису. Продовжуємо поділ до тих пір, поки частка не буде 0. Результат записуємо справа наліво. Тобто нижня цифра (1) буде самою лівою і т. д. В результаті отримуємо число 347D в двійковому записі: 110110101В.

Вісімкова система числення цілочисельна система числення з основою 8. Для представлення чисел в ній використовуються цифри 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Вісімкова система часто використовується в галузях, пов'язаних з цифровими пристроями. Характеризується легким переводом вісімкових чисел у двійкові і назад, шляхом заміни вісімкових чисел на триплети двійкових. Раніше широко

використовувалася в програмуванні і взагалі в комп'ютерній документації, проте в наш час майже повністю витіснена шістнадцятковою.

Для переведення десяткового числа у вісімкове ділять десяткове число послідовно на 8, аж поки остання частка не стане меншою за вісім.

Наприклад, $89D = XQ$ -?

$$89/8=11 \text{ з залишком } 1$$

$$11/8=1 \text{ з залишком } 3$$

Вісімкове число записують, починаючи з останньої частки, яка є старшим розрядом вісімкового числа. В результаті отримуємо число $89D$ у вісімковому записі: $131Q$.

Шістнадцяткова система числення — це позиційна система числення з основою 16. Тобто кожне число в ній записується за допомогою 16-ти символів. Арабські цифри від 0 до 9 відповідають значенням від нуля до дев'яти, а 6 літер латинської абетки A (10), B (11), C(12), D(13), E(14), F(15) відповідають значенням від десяти до п'ятнадцяти. Шістнадцяткова система числення широко використовується розробниками комп'ютерів та програмістами.

Для переведення десяткового числа у шістнадцяткове потрібно послідовно ділити десяткове число на основу шістнадцяткової системи - 16 доти, аж поки остання частка не стане меншою за 16.

Наприклад, $739D = XH$ -?

$$739/16=46 \text{ з залишком } 3$$

$$46/16=2 \text{ з залишком } 14$$

Шістнадцяткове число записують, починаючи з останньої частки, яка є старшим розрядом шістнадцяткового числа. В результаті отримуємо число $739D$ у шістнадцятковому записі: $2E3H$.

Правила, за якими виконують арифметичні дії у двійковому коді. Рахувати у двійковій системі не складніше, ніж у будь-якій іншій. Скажімо, у десятковій системі, коли число у поточному розряді сягає десяти, то розряд обнуляється і одиниця додається до старшого. Наприклад: $9+1=10$, $44+7=51$; Аналогічним чином у двійковій системі: коли число в розряді сягає двох — розряд обнуляється і одиниця додається до старшого розряду. Тобто: $1+1=10$. Зверніть увагу, «10» у цьому записі — двійкове

число, у десятковій системі це число записується як «2». А десяткове $9+1=10$ у двійковій системі буде виглядати так: $1001+1=1010$ (після додавання одиниці число в останньому розряді дорівнює двом, тож розряд обнуляється і одиниця додається до передостаннього (старшого) розряду).

Таблиця додавання

$$0 + 0 = 0$$

$$1 + 0 = 1$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 1 = 10 \quad (\text{перенесення у старший розряд})$$

Приклад додавання "стовпчиком"

		1	1	1	0
+			1	0	1
	1	0	0	1	1

Таблиця віднімання

$$0 - 0 = 0$$

$$1 - 0 = 1$$

$$1 - 1 = 0$$

$$10 - 1 = 1 \quad (\text{позика зі старшого розряду})$$

Приклад віднімання "стовпчиком"

	-	1	0	0	1	1
				1	0	1
		1	1	1	1	0

Таблиця множення

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1$$

Приклад множення "стовпчиком"

×				1	1	1	0
					1	0	1
+				1	1	1	0
		1	1	1	0		
	1	0	0	0	1	1	0

Таблиця для переведення десяткового числа в двійкове

0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001

Таблиця для переведення десяткового числа в шістнадцяткове

0	0
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	A

11	B
12	C
13	D
14	E
15	F

Контрольні запитання

1. Поясніть, які пристрої називають імпульсними. Які переваги надає використання імпульсних режимів в електронних пристроях?
2. Поясніть, що таке імпульс? Наведіть форми імпульсних сигналів?
3. Поясніть, що таке електронний ключ? Які електронні прилади використовують у якості ключів? Наведіть схеми їх вмикання.
4. Поясніть особливості роботи транзисторного ключа в стані відсічки та насичення.
5. Принципи надання інформації в цифрових пристроях.
6. Принципи двійкової системи числення та правила дій над числами.
7. Принципи вісімкової системи числення.
8. Принципи шіснадцяткової системи числення.

4.1. Логічні елементи.

Логічні елементи – це електронні схеми, які відтворюють логічні функції і оперують логічними величинами, які приймають тільки два значення: логічну одиницю та логічний нуль. Логічній одиниці "1" відповідає рівень високої напруги, а логічному "0" – рівень низької напруги.

Математичним апаратом для опису логічних операцій служить алгебра логіки (алгебра Буля), яка вивчає зв'язок між змінними (сигналами), що приймають тільки два значення ("0", "1").

Основними логічними операціями є:

- логічне заперечення НІ (інверсія);
- логічне додавання АБО (диз'юнкція);
- логічне множення І (кон'юнкція).

Операція логічного заперечення НІ описується виразом:

$$y = \bar{x}.$$

Операція логічного додавання АБО:

$$y = x_1 + x_2 + \dots$$

Операція логічного множення І:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots$$

На основі цих простих логічних операцій можуть будуватися і складніші: операція заперечення логічного додавання АБО - НІ, операція заперечення логічного множення І - НІ та ін.

Операція заперечення логічного додавання АБО - НІ ("стрілка Пірса"), описується виразом:

$$y = \overline{x_1 + x_2}$$

Операція заперечення логічного множення І - НІ ("штрих Шеффера"), описується:

$$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$$

Логічна операція ЗАБОРОНА:

$$y = x_1 \cdot \overline{x_2}$$

Логічні елементи.

Операція НІ реалізується логічним елементом НІ (логічним інвертором). Умовне позначення логічного елементу НІ, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 4.4. Сигналу $X = 0$ на вході відповідає $Y = 1$ на виході і, навпаки, при $X = 1$, $Y = 0$.

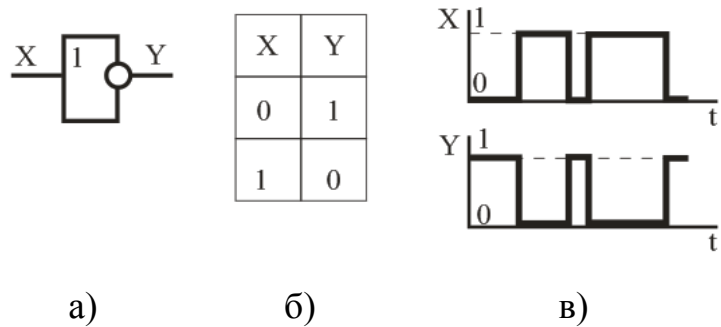


Рисунок 4.4. Логічний елемент НІ: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Логічні елементи, що реалізують операцію АБО, називають елементами АБО. Умовне позначення логічного елемента АБО, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 4.5. Вихідний сигнал Y елемента АБО дорівнює одиниці $Y = 1$, якщо хоч би на один з входів поданий сигнал логічної "1".

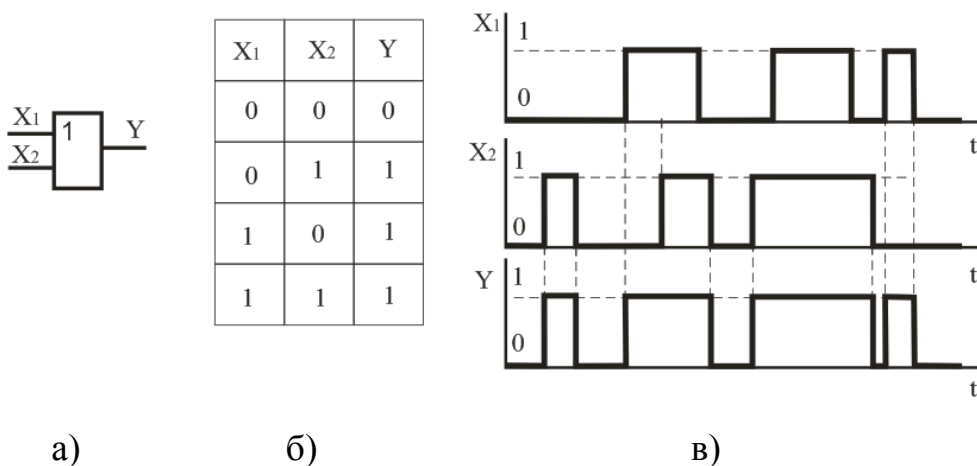


Рисунок 4.5. Логічний елемент АБО: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Логічні елементи, що реалізують операцію І, називають елементами І. Умовне позначення логічного елемента І, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 4.6. Вихідний сигнал Y елемента І дорівнює одиниці $Y = 1$, якщо одночасно на всі входи поданий сигнал логічної "1".

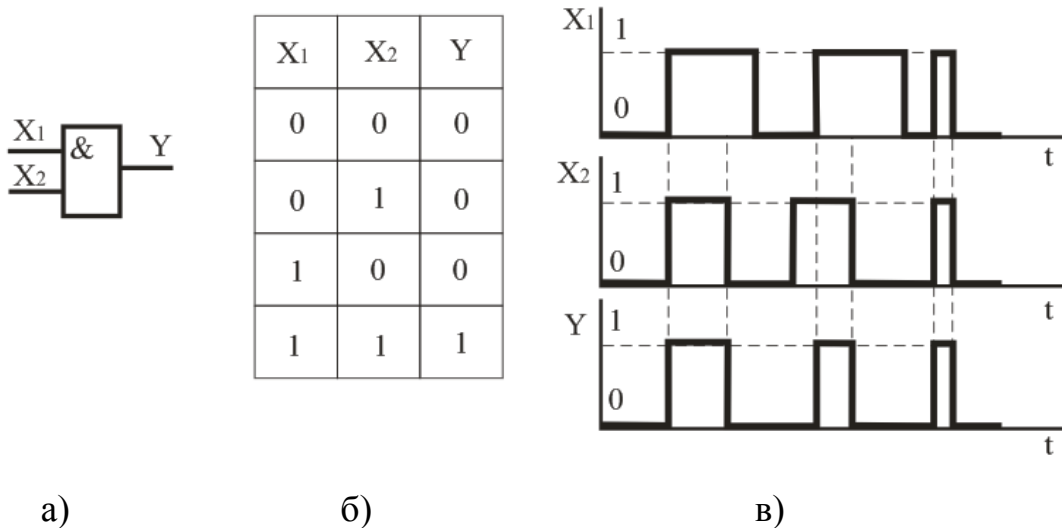


Рисунок 4.6. Логічний елемент І: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи.

Логічний елемент АБО - НІ об'єднує елементи АБО і НІ. У зв'язку з цим входним сигналам, які дорівнюють логічній "1", відповідає логічний "0" на виході, а при сигналах логічного "0" на всіх входах вихідний $Y = 1$. Умовне позначення двовхідного елемента АБО - НІ, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 4.7.

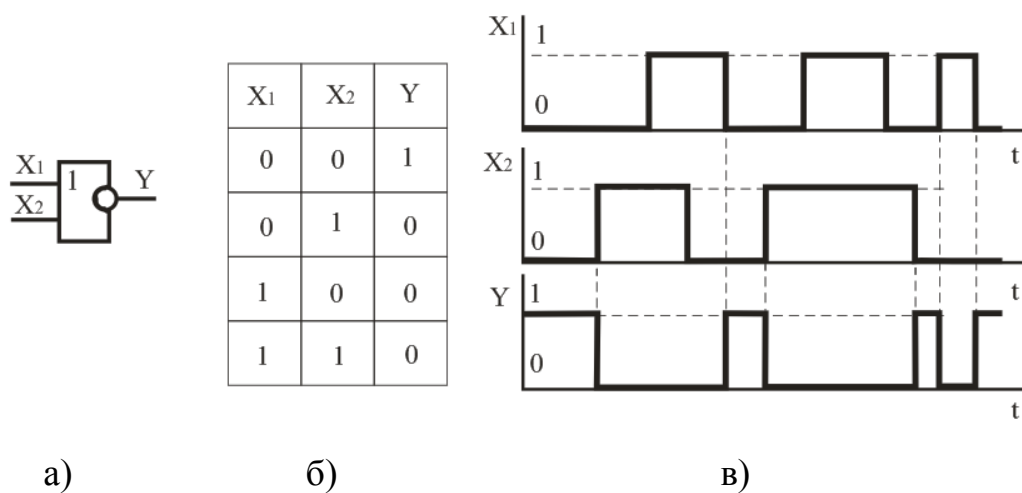


Рисунок 4.7. Логічний елемент АБО – НІ: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Логічний елемент І - НІ об'єднує елементи І і НІ. Логічний "1" на всіх входах відповідає логічний "0" на виході елемента. При логічному "0" на одному з входів

створюється логічна "1" на виході. Умовне позначення двовхідного елемента "І - НІ", його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 4.8.

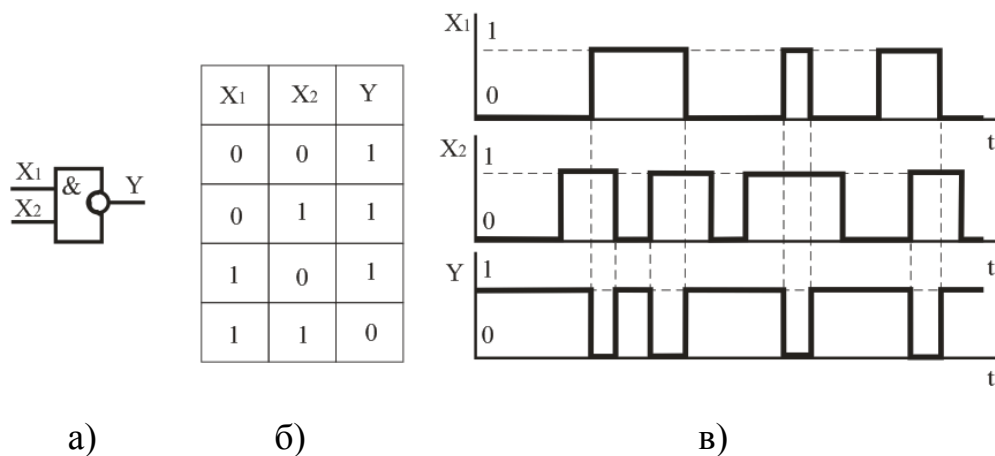


Рисунок 4.8. Логічний елемент І – НІ: а – умовне графічне позначення; б – його таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Умовне позначення логічного елемента **ЗАБОРОНА**, його таблиця істинності наведені на рисунку 4.9. Вихідний сигнал логічного елемента ЗАБОРОНА повторює сигнал на вході X₁, якщо X₂ = 0. При X₂ = 1 на виході логічного елемента виникає сигнал логічного "0" незалежно від значення X₁.

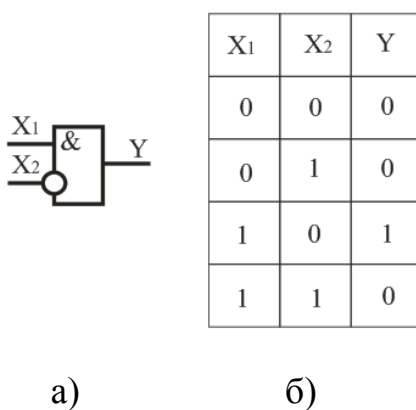


Рисунок 4.9. Логічний елемент ЗАБОРОНА : а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності

Логічні елементи в інтегральному виконанні.

Останнім часом в цифровій апаратурі в основному використовуються логічні елементи (ЛЕ) в інтегральному виконанні. Залежно від компонентів, які використовуються при побудові ЛЕ, розрізняють наступні типи логічних елементів:

- діодно-транзисторні ЛЕ (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторні ЛЕ (ТТЛ);
- логічні елементи на МДН- транзисторах (МДН ТЛ).

Логічні елементи застосовуються для побудови систем цифрової обробки і перетворення інформації – обчислювальних машин, цифрових вимірних приладів та пристроїв автоматики.

До основних параметрів логічних елементів відносяться:

- напруга живлення, В;
- споживана потужність, мВт;
- час затримки розповсюдження, нс – параметр, що характеризує швидкість логічного елемента;
- коефіцієнт об'єднання по входу $K_{об}$ – визначає число входів ЛЕ, за якими реалізується логічна функція;
- коефіцієнт розгалуження по виходу $K_{розг}$ – визначає здатність навантаження ЛЕ і дорівнює числу одиничних навантажень, які можна одночасно підключити до виходу логічного елемента.

Контрольні запитання

1. Поясніть поняття логічних величин (логічний нуль та логічна одиниця).
2. Назвіть основні логічні функції та елементи, які їх реалізують.
3. Назвіть основні логічні функції та елементи, які їх реалізують.
4. Запишіть таблицю істинності логічної функції НІ, І, АБО, І - НІ, АБО - НІ, ЗАБОРОНА.
5. Наведіть умовне позначення та поясніть принцип роботи логічного елемента НІ, І, АБО, І - НІ, АБО - НІ, ЗАБОРОНА.

4.2. Мультивібратори. Одновібратори.

Мультивібратор (релаксаційний генератор) – це пристрій, який призначений для генерування періодичної послідовності імпульсів напруги прямокутної форми з необхідними параметрами (амплітудою, тривалістю, частотою надходження та ін.). Подібно до генераторів синусоїдальних коливань, мультивібратори працюють в режимі самозбудження: для формування імпульсного сигналу в мультивібраторах не потрібна зовнішня дія, наприклад подача вхідних сигналів. Процес отримання імпульсної напруги ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійного струму.

Мультивібратори, як і тригери, відносяться до класу спускових пристроїв і засновані на застосуванні підсилювачів з додатним зворотним зв'язком на біполярних або польових транзисторах, логічних елементах і операційних підсилювачах в інтегральному виконанні або електронних приладів з негативним диференціальним опором, наприклад, тунельних діодах, одноперехідних транзисторах або тиристорах. На відміну від тригерів, що мають два стійких стани рівноваги, мультивібратори мають не більше одного стану. Крім того, вони мають стани квазірівноваги, що характеризуються порівняно повільними змінами струмів і напруги, що приводять до деякого критичного стану, при якому створюються умови для стрибкоподібного переходу мультивібратора з одного стану в інший.

Мультивібратори можуть працювати в одному з трьох режимів:

- очікування;
- автоколивань;
- синхронізації.

У режимі очікування мультивібратор має стан стійкої рівноваги і стан квазірівноваги. Перехід з першого стану до другого відбувається під впливом зовнішнього запускаючого імпульсу, а зворотний перехід – після закінчення деякого часу, що визначається параметрами пристрою. Таким чином, в режимі очікування мультивібратор генерує один імпульс з певними параметрами при дії запускаючого імпульсу.

Мультивібратор, що працює в режимі очікування, називають одновібратором.

У режимі автоколивань в мультивібраторі немає стану стійкої рівноваги, є тільки два стани квазірівноваги. Мультивібратор переходить з одного стану квазірівноваги в інший без зовнішніх дій, генеруючи імпульси, параметри яких залежать від параметрів мультивібратора. У режимі синхронізації частота повторення імпульсів мультивібратора визначається частотою зовнішньої синхронізуючої напруги. Мультивібратор має два стани квазірівноваги, що чергуються, а час перебування в цих станах залежить не тільки від параметрів мультивібратора, але також від періоду синхронізуючої напруги. Якщо синхронізуючу напругу зняти, встановлюється режим автоколивань.

На рисунку 4.10 наведена схема мультивібратора, що виконаний на основі двох транзисторів зі спільним емітером і ємнісним з'язком між каскадами і виходом. Конденсатори $C_{б1}$ і $C_{б2}$ (вибирають однаковими) виконують роль елементів зв'язку і входять у часозадаючі ланцюги. Іншими елементами, що задають час імпульсів є резистори $R_{б1}$ і $R_{б2}$. Вихідні імпульси знімаються з колекторів транзисторів VT_1 , VT_2 . Мультивібратор має два стани квазірівноваги: в одному стані транзистор VT_1 закритий, а в другому стані відкритий.

При подачі напруги – Ек починають заряджатися конденсатори $C_{б1}$, $C_{б2}$. $C_{б1}$ по колу $R_{к2}$ - $C_{б1}$ - перехід БЕ VT_1 - загальний. $C_{б2}$ по колу $R_{к1}$ - $C_{б2}$ - перехід БЕ VT_2 - загальний. Так як на транзисторах в даний момент присутній базовий струм, то вони намагаються відкритися. В будь якому випадку один з транзисторів відкриється раніше (так як їх параметри відрізняються, адже однакових транзисторів не існує). Наприклад, першим відкрився VT_1 . При цьому відбудеться розряд конденсатора $C_{б2}$. При розряді конденсатора $C_{б2}$ на базі транзистора VT_2 з'явиться додатній потенціал і він закриється. Транзистор VT_1 буде знаходитися в відкритому стані поки $C_{б1}$ не зарядиться до напруги живлення. В цей момент конденсатор $C_{б2}$ вже буде розряджений і через нього потече струм зарядки, що призведе до відкриття VT_2 . Транзистор VT_2 , відкрившись розрядить $C_{б1}$ і буде у відкритому стані до часу повної зарядки $C_{б2}$. Таким чином буде відбуватися по чергові робота транзисторів. $R_{к1}$ і $R_{к2}$ підбираються набагато менші, ніж $R_{б1}$ і $R_{б2}$, щоб зарядка конденсаторів через $R_{к1}$ і

$R_{к2}$ була швидше, ніж розрядка через $R_{б1}$ і $R_{б2}$. Чим більше буде час зарядки конденсаторів, тим більш пологими виявляться фронти імпульсів.

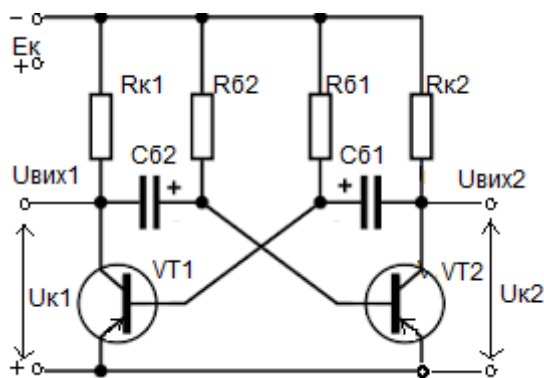


Рисунок 4.10. Симетричний мультивібратор на транзисторах.

На рисунку 4.11 наведена схема мультивібратора на логічних елементах «НІ» (можуть використовуватися елементи «АБО - НІ» або «І - НІ» з об'єднаними входами).

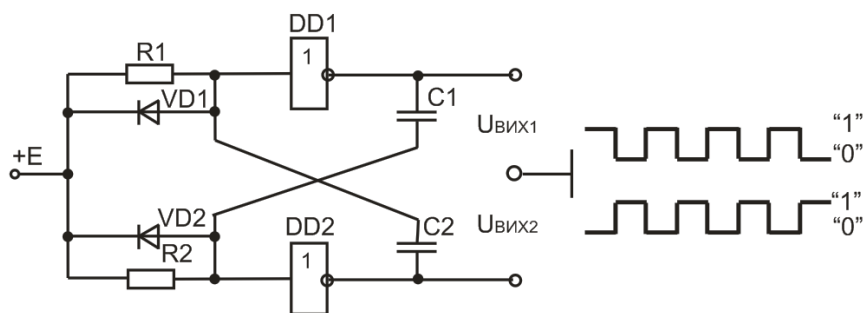


Рисунок 4.11 – Схема мультивібратора на логічних елементах «НІ».

Входи елементів «НІ» з'єднані через відповідні резистори з джерелом ЕРС $+E$, що перевищує за рівнем логічну «1». Конденсатори $C1$ і $C2$ увімкнені в коло зворотного зв'язку з виходу одного елемента на вхід іншого елемента. Для зменшення часу відновлення увімкнені діоди $VD1$ і $VD2$, які відкриваються і шунтують відповідно резистори $R1$ і $R2$ на час розрядки відповідного конденсатора $C1$ або $C2$. Стан квазірівноваги («1» на виході одного елемента і «0» на виході іншого) утримується протягом часу, який потрібний для перезарядки конденсатора $C1$ або $C2$ до рівня відповідного порогу спрацьовування елемента $DD1$ або $DD2$. Після цього стани логічних елементів змінюються на протилежні і процеси повторюються. На виходах 1 і 2 мультивібратор генерує прямокутні імпульси протилежної полярності. Розглянемо роботу мультивібратора з моменту часу перемикання $DD2$ в «0». У

початковий момент часу і на вході DD1 буде нульовий рівень сигналу, а на виході DD1 – «1». По колу: +E - R1 - C2 - DD2 починається заряд конденсатора C2, що приводить до підвищення напруги на вході DD1. При досягненні порогового значення цієї напруги $U_{\text{ПОР}}$ відбудеться перемикання DD1 в стан «0», а елементу DD2 – в стан «1». З цього моменту часу починається заряд конденсатора C1 по колу: C2 - VD1 - +E - DD2. Тривалість імпульсу визначається часом заряду конденсатора:

$$t_i = RC \ln [U_{\langle 1 \rangle} / (E - U_{\text{ПОР}})],$$

де $U_{\langle 1 \rangle}$ – рівень логічної одиниці;

$U_{\text{ПОР}}$ – пороговий рівень логічного елементу.

При $R1 = R2 = R$ і $C1 = C2 = C$, імпульси симетричні.

В несиметричному режимі роботи мультівібратора використовуються неоднакові постійні часу часозадавальних ланок мультівібратора за напівперіодами.

Одновібратор (очікуючий мультівібратор) – це пристрій, який призначений для формування імпульсу напруги прямокутної форми з необхідною тривалістю і амплітудою при дії на вході короткого запускаючого імпульсу. На відміну від мультівібраторів, в яких обидва стани є нестійкими, в одновібраторах один стан стійкий, а інший – нестійкий. Стійкий стан характеризує початковий режим роботи (режим очікування) одновібратора. Нестійкий стан настає з приходом вхідного запускаючого імпульсу. Він продовжується якийсь час, що визначається часозадавальною ланкою схеми, після чого одновібратор повертається в початковий стійкий стан.

На рисунку 4.12 наведена схема одновібратора на ОП і часові діаграми його роботи. Для створення роботи в режимі очікування паралельно конденсатору C увімкнений діод VD1. При показаному на рисунку 3 напрямі увімкнення діода VD1 схема запускається вхідним імпульсом напруги позитивної полярності. У початковому стані напруга на виході одновібратора дорівнює $U_{\text{ВИХ MIN}}^-$, що визначає напругу на неінвертуючому вході ОП: $u_{(+)} = [R1 / (R1 + R2)] \times U_{\text{ВИХ MIN}}^-$. Напруга на інвертуючому вході ОП $u_{(-)}$ (на конденсаторі C), рівна падінню напруги на діоді VD1, близька до нуля. Якщо на неінвертуючий вхід в момент часу t_1 поступає вхідний позитивний імпульс напруги, то ОП стрибком переходить в протилежний стан і $u_{\text{ВИХ}} = U_{\text{ВИХ MAX}}^+$. На неінвертуючий вхід ОП передається напруга:

$u_{(+)} = [R1/(R1 + R2)] \times U^+_{\text{ВИХ МАХ}}$. Дія напруги позитивної полярності на виході ОП викликає процес заряду конденсатора C через резистор R , при цьому конденсатор прагне зарядитися до напруги $U^+_{\text{ВИХ МАХ}}$ за експонентою. Проте, в процесі заряду напруга на конденсаторі не досягає значення $U^+_{\text{ВИХ МАХ}}$, оскільки у момент часу t_2 при $u_{(-)} = u_C [R1/(R1 + R2)] \times U^+_{\text{ВИХ МАХ}}$ (тобто $u_{(-)} = U_{\text{ВІДКЛ.}}$) відбувається повернення ОП в початковий стан.

Тривалість імпульсу, що формується однобібратором: $t_i = RC \ln(1 + R1/R2)$. Після моменту часу t_2 в схемі настає процес відновлення початкової напруги на конденсаторі $u_C = 0$, який обумовлюється полярністю напруги, що змінилася на виході ОП. Режим відновлення закінчується тим, що напруга на конденсаторі досягає напруги відмикання діода $VD1$, яку можна прийняти рівною нулю. Час відновлення однобібратора: $t_B = RC \ln [(2R1 + R2)/(R1 + R2)]$. Через час t_B однобібратор готовий до прийому наступного імпульсу.

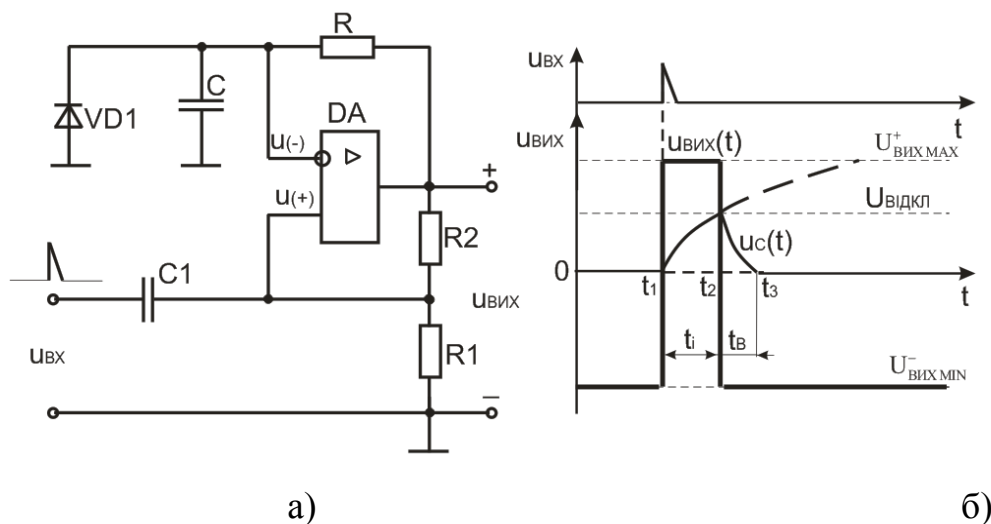


Рисунок 4.12 . Однобібратор на операційному підсилювачі: а – схема; б – часові діаграми роботи.

Контрольні запитання

1. Поясніть, які електронні пристрої називають мультивібраторами, на основі яких електронних приладів вони виконуються, в яких режимах працюють.
2. Наведіть схему і поясніть принцип роботи симетричного мультивібратора на транзисторах.

3. Поясніть, яка відмінність між симетричним і несиметричним мультівібраторами?
4. Поясніть, чим визначається тривалість імпульсу мультівібратора?
5. Як визначити частоту імпульсів мультівібратора?
6. Поясніть, що таке одновібратор?
7. Наведіть схему і поясніть принцип роботи одновібратора на операційному підсилювачі.

4.3. Тригери.

Тригер – це пристрій, що має два стійких вихідних стани і здатний переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього управляючого сигналу. Перехід тригера з одного стійкого стану в інший відбувається під дією управляючого сигналу і супроводжується стрибкоподібною зміною струмів та напруги. Причому, для переходу тригера з одного стійкого стану в інший необхідно, щоб вхідний сигнал перевищив деякий рівень – поріг спрацьовування пристрою.

Тригери широко використовуються для формування імпульсів, у генераторах одиничних сигналів, для побудови подільників частоти, лічильників, перерахункових пристроїв, регістрів, суматорів, у пристроях керування тощо.

На рисунку 4.13 показана схема тригера на транзисторах. При включенні живлення $+V$ обидва транзистори повинні відкритися струмом бази через резистори $R_2 - R_4$ транзистор Q_1 , а через резистори $R_1 - R_3$ транзистор Q_2 . Але на практиці симетрія процесів навіть в такій симетричній схемі неможлива, по причині різниці параметрів транзисторів. В результаті один з транзисторів відкриється раніше і забезпечить закривання іншого, наприклад відкриється Q_1 . Через перехід емітер-колектор Q_1 резистор R_3 на базі Q_2 з'явиться від'ємний потенціал і він закриється. Надалі стан буде стійким без впливу ззовні.

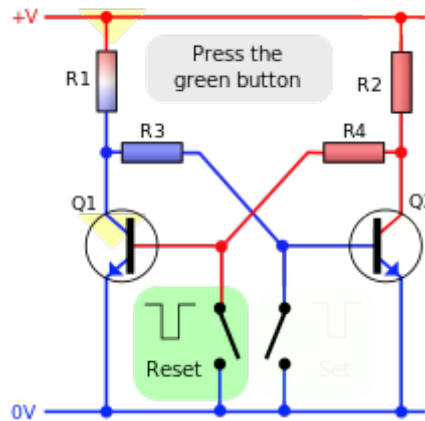


Рисунок 4.13. Схема тригера на транзисторах ($R_1, R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_3, R_4 = 10 \text{ k}\Omega$)

При натисканні кнопки Reset (зеленого кольору) на базу транзистора Q1 буде прикладено "-" потенціал і він закриється. В даний момент через резистори R1 – R3 струм від джерела живлення забезпечить відкриття транзистора Q2 – другий стійкий стан. Даний стійкий стан можна порушити натисканням іншої кнопки Reset. Таким чином чергово з колекторів Q1, Q2 можна знімати імпульси прямокутної форми.

В інтегральній мікросхемотехніці тригери виконують або на основі логічних інтегральних елементів, або як завершений функціональний елемент у вигляді мікросхеми. Інтегральні тригери характеризуються великою різноманітністю. Їх відрізняє функціональна ознака, що визначає поведінку тригера під дією керуючого сигналу, а також спосіб керування.

За функціональною ознакою розрізняють тригери типів R-S, D, T, J-K та інші. За способом керування тригери підрозділяють на асинхронні та тактовані. В асинхронних тригерах перемикання з одного стану в інше здійснюється безпосередньо з надходженням сигналу на інформаційний вхід. В тактованих тригерах крім інформаційних входів є вхід тактових імпульсів. Їх перемикання проводиться тільки за наявності дозволяючого, тактового імпульсу.

Таблиця 4.1. Функціональне призначення входів тригерів.

Умовне позначення	Призначення
	Інформаційні входи
<i>S</i>	Вхід для роздільної установки тригера в стан 1
<i>R</i>	Вхід для роздільної установки тригера в стан 0
<i>J</i>	Вхід для установки в стан 1 <i>JK</i> - тригера
<i>K</i>	Вхід для установки в стан 0 <i>JK</i> - тригера
<i>T</i>	Лічильний вхід тригера
<i>D</i>	Вхід для установки тригера в стан 0 або 1
	Керуючі входи
<i>V</i>	Підготовчий вхід для дозволу прийому інформації
<i>C</i>	Підготовчий вхід для здійснення прийому інформації. Вхід синхронізації.

Асинхронні R-S – тригери. Залежно від способу керування розрізняють асинхронні та тактовані R-S- тригери. Асинхронний R-S- тригер, як і тригер будь-якого іншого типу, характеризується двома станами: логічної “1” та логічного “0”.

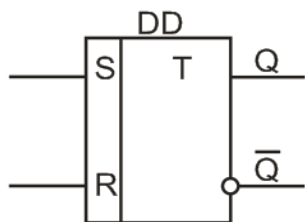


Рисунок 4.14. Умовне позначення асинхронного R-S- тригера (виходи: Q – прямиий; \bar{Q} – інверсний).

Стану логічної “1” відповідає $Q = 1, \bar{Q} = 0$; стану логічного “0”: $Q = 0, \bar{Q} = 1$. По інформаційному входу S проводиться установка тригера в стан логічної “1”, а по інформаційному входу R – установка (перехід тригера в початковий стан) логічного “0”. Цьому відповідають скорочені позначення входів і назва тригера: S (set) – установка, R (reset) – повернення в початковий стан.

Тригери легко реалізуються на логічних елементах: АБО - НІ – тригер з прямими входами (рисунок 4.15, а), І - НІ – тригер з інверсними входами (рисунок 4.15, б).

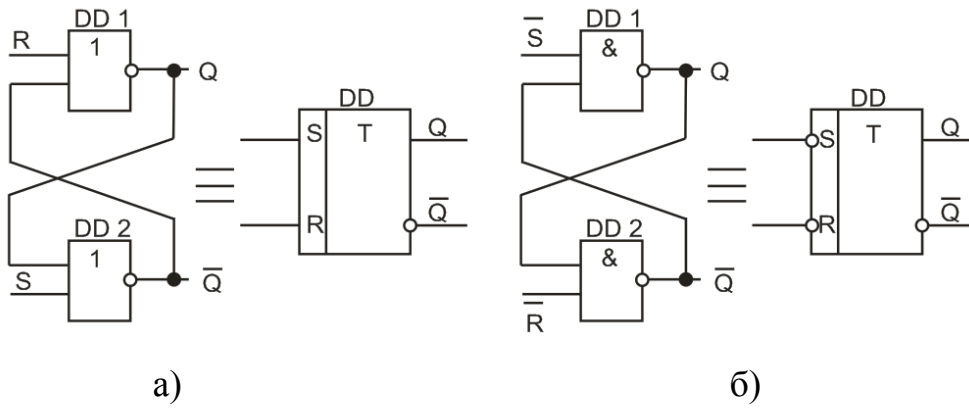


Рисунок 4.15. R-S- тригер, реалізований на логічних елементах: а – АБО - НІ; б – І – НІ.

Роботу схеми (рисунок 4.15, а) на елементах АБО - НІ ілюструє таблиця переходів та часові діаграми, які приведені на рисунку 4. Стан логічної “1” ($Q = 1$) тригер приймає при $S = 1, R = 0$. При зворотній комбінації вхідних сигналів ($S = 0, R = 1$) тригер встановлюється в стан логічного “0” ($Q = 0$). При комбінації $S = R = 0$ в тригері зберігається попередній стан (“0” або “1”). Комбінація $S = R = 1$ для схеми тригера на елементах АБО - НІ є забороненою зважаючи на невизначеність його стану. Аналогічно працює R-S- тригер на елементах І - НІ (рисунок 4.15, б) з тією різницею, що він повинен мати інверсні входи.

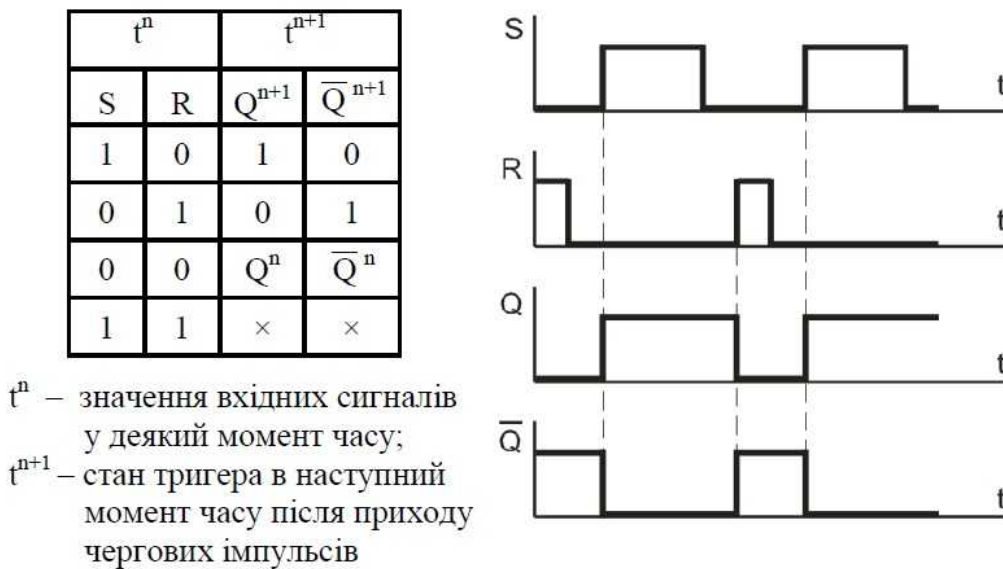


Рисунок 4.16 Часові діаграми роботи R-S- тригера.

Для тригера з інверсними входами режим запису логічної “1” реалізується при комбінації $S = 0, R = 1$; режим запису логічного “0” – при $S = 1, R = 0$; при комбінації $S = R = 1$ забезпечується зберігання інформації. Комбінація $S = R = 0$ є забороненою зважаючи на невизначеність його стану.

D - тригери (рисунок 4.17) мають один інформаційний вхід (D - вхід, на який подається інформація, призначена для занесення в тригер) та вхід синхронізації (C - вхід) або тактовий вхід.

Роботу тактованого D - тригера ілюструють таблиця станів та часові діаграми (рисунок 4.17). Якщо рівень сигналу на вході $C = 0$, стан тригера стійкий і не залежить від рівня сигналу на інформаційному вході. Під час подачі на вхід синхронізації рівня $C = 1$ інформація на прямому виході повторюватиме інформацію, що подається на вхід D. Таким чином, перемикання тригера з одного стійкого стану в інше відбувається з появою синхронізуючого (тактового) імпульсу на вході C.

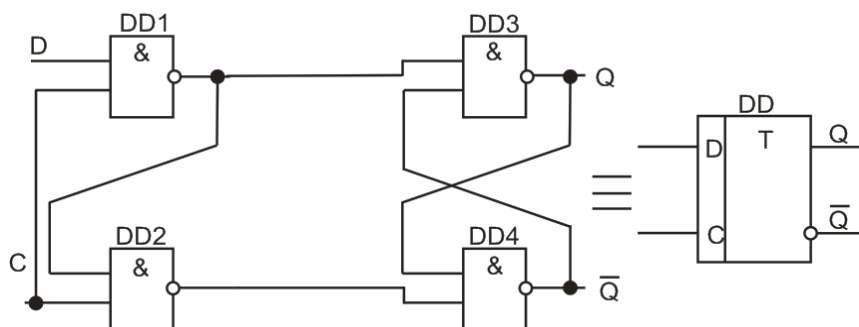


Рисунок 4.17. Структурна схема D - тригера та його умовне позначення.

Припустимо, що до моменту приходу вхідного сигналу D - тригер знаходився в стані логічного “0” ($Q = 0, \bar{Q} = 1$). В інтервалі часу $t_1 - t_2$, коли діє вхідний сигнал D, стан тригера не змінюється, оскільки при цьому $C = 0$. Дія сигналу $C = 1$ в момент часу t_2 призводить до перемикання тригера в стан логічної “1” ($Q = 1, \bar{Q} = 0$). Стан логічної “1” тригера не зміниться до моменту часу t_4 . Поява у момент часу t_4 сигналу $C = 1$ викликає перемикання тригера в стан логічного “0”.

t^n		t^{n+1}	
C	D	Q^{n+1}	\overline{Q}^{n+1}
0	0	1	0
1	0	0	1
1	1	1	0
0	1	1	0
0	0	1	0
1	0	0	1

Q^{n+1} – логічний рівень на даному виході після подачі імпульсу синхронізації

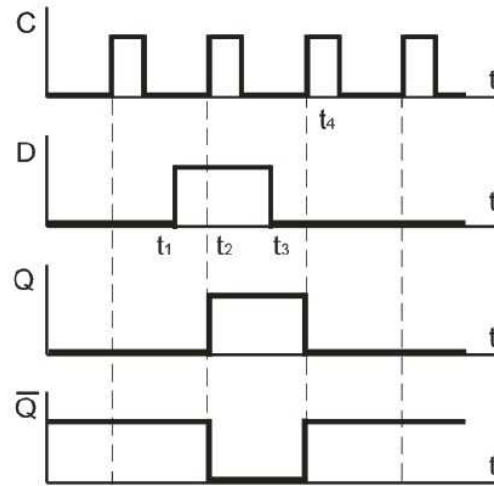


Рисунок 4.18. Часові діаграми роботи тактованого D – тригера.

Універсальні J-K – тригери - це пристрої з двома інформаційними входами J і K, які у разі вхідної комбінації $J = K = 1$ перемикають тригер в протилежний стан подібно T - тригеру, а при будь-яких інших комбінаціях вони функціонують як R-S - тригер, у якого роль входів S і R виконують відповідно входи J і K: $J \equiv S$, $K \equiv R$.

При відповідному підключенні входів J-K - тригер може виконувати функції R-S, D і T - тригерів (рисунок 4.19).

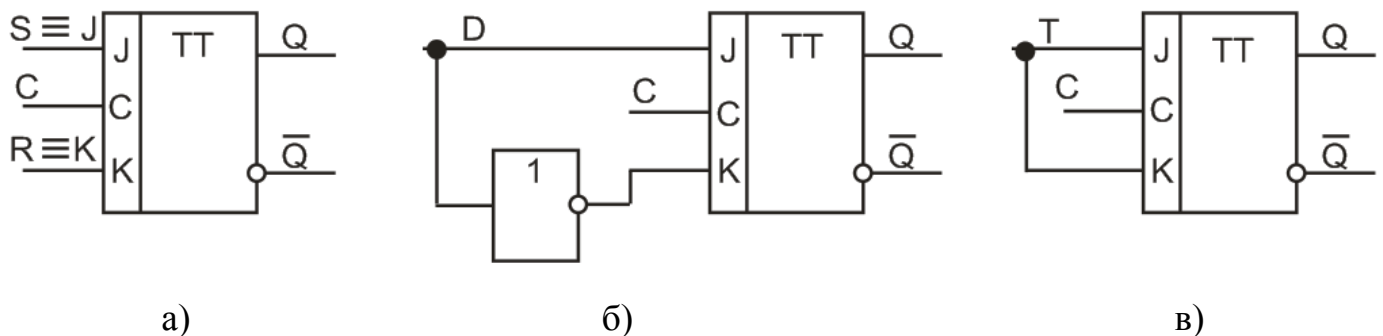


Рисунок 4.19. Реалізація тригерів за допомогою універсального J-K – тригера: а – R-S - тригера; б – D - тригера; в – T - тригера

R-S - тригер отримують подачею на вхід J сигналу S; а на вхід K сигналу R. D - тригер утворюється введенням інвертора в коло входу K. R-S - і D - тригери є тактованими. Якщо входи J і K об'єднати і подати на них лічильні імпульси T,

отримаємо Т - тригер з лічильним запуском. У цьому полягає універсальність J-K - тригера.

Інтегральні тригери застосовують при побудові складних функціональних пристроїв: лічильників імпульсів, регістрів, пристроїв, що запам'ятовують, дільників частоти і т.д.

Контрольні запитання

1. Поясніть, що таке тригер? Назвіть основні типи тригерів.
2. Поясніть, яка відмінність між асинхронними і синхронними тригерами?
3. Наведіть умовне позначення, таблиці переходів та поясніть принцип роботи RS-, D-, T-, JK- тригера.
4. Поясніть, чому JK- тригер вважають універсальним. Наведіть та поясніть приклади його використання для побудови тригерів інших типів.

4.4. Компаратори.

Компаратор – це пристрій, який призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його входи. Компаратор здійснює порівняння вимірюваної вхідної напруги ($U_{ВХ}$) з опорною напругою ($U_{ОП}$). Опорною напругою є незмінна за величиною напруга позитивної або негативної полярності, а вхідна напруга змінюється в часі. При досягненні вхідної напруги рівня опорної напруги відбувається зміна полярності напруги на виході ОП, наприклад з $U_{ВІХ\ МАХ}^+$ на $U_{ВІХ\ МІН}^-$. Різниця напруг $U_{ВХ} - U_{ОП}$ є вхідною напругою U_0 ОП, що і визначає передатну характеристику компаратора (рисунок 4.20). При $U_{ВХ} < U_{ОП}$ напруга $U_0 < 0$, у зв'язку з чим $U_{ВІХ} = U_{ВІХ\ МАХ}^+$. При $U_{ВХ} > U_{ОП}$ напруга $U_0 > 0$ та $U_{ВІХ} = U_{ВІХ\ МІН}^-$:

$$\begin{cases} U_{ВІХ} = U_{ВІХ\ МАХ}^+ \text{ при } U_{ВХ} < U_{ОП}; \\ U_{ВІХ} = U_{ВІХ\ МІН}^- \text{ при } U_{ВХ} > U_{ОП}. \end{cases}$$

Зміна полярності вихідної напруги відбувається під час переходу вхідної вимірюваної напруги через значення $U_{ОП}$.

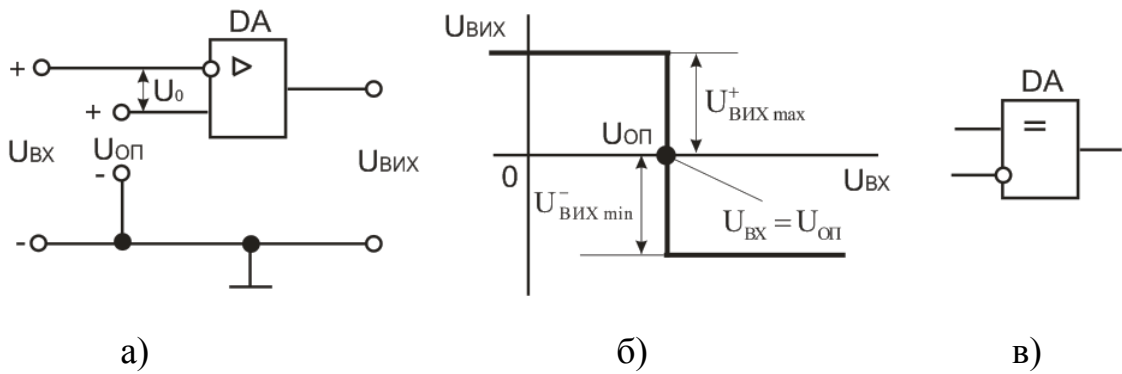


Рисунок 4.20. Компаратор: а – схема компаратора на операційному підсилювачі; б – передатна характеристика; в – умовне позначення.

Якщо джерела входної та опорної напруги в схемі (рисунок 1, а) поміняти місцями або змінити полярність їх підключення, то відбудеться інверсія передатної характеристики компаратора. Умові $U_{ВХ} < U_{ОП}$ відповідатиме: $U_{ВХ} = U_{ВХ\ min}^-$, а умові $U_{ВХ} > U_{ОП}$: $U_{ВХ} = U_{ВХ\ max}^+$. Схема (рисунок 4.20, а) застосовується тоді, коли вимірювана та опорна напруги не перевищують допустимих паспортних значень входної напруги ОП. Інакше вони підключаються до ОП за допомогою дільників напруги (рисунок 4.21).

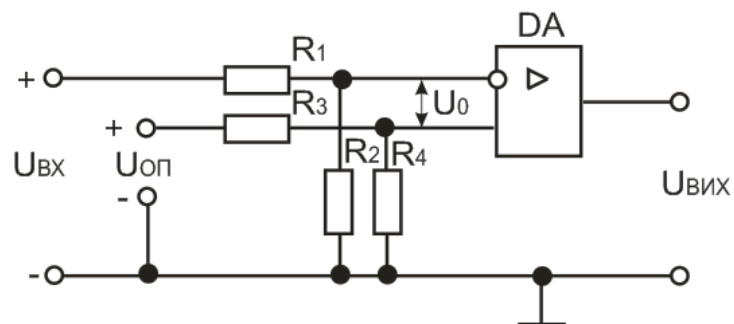


Рисунок 4.21. Схема компаратора на операційному підсилювачі з використанням дільників напруги

Компаратор з додатним зворотним зв'язком (тригер Шмітта). Широке застосування отримав також компаратор, в якому ОП охоплений додатним зворотним зв'язком, який здійснюється по неінвертуючому входу за допомогою резисторів R_1 та R_2 (рисунок 4.22, а). Такий компаратор має передатну характеристику з гістерезисом. Схема відома під назвою тригера Шмітта або порогового пристрою. Тригер Шмітта – це пристрій, який призначений для формування напруги прямокутної форми з входної напруги довільної форми. Тригер Шмітта є пороговим елементом, рівні вмикання і вимикання

якого не співпадають. Різниця в рівнях називається гістерезисом перемикавання. Перемикавання схеми в стан $U_{\text{ВИХ MIN}}^-$ відбувається при досягненні входною напругою ($U_{\text{ВХ}}$) напруги (порогу) спрацювання ($U_{\text{СПР}}$), а повернення в початковий стан $U_{\text{ВИХ}} = U_{\text{ВИХ MAX}}^+$ – при зниженні $U_{\text{ВХ}}$ до напруги порогу відпускання ($U_{\text{ВДП}}$). Значення порогової напруги:

$$U_{\text{СПР}} = [R_1 / (R_1 + R_2)] \times U_{\text{ВИХ MAX}}^+$$

$$U_{\text{ВДП}} = - [R_1 / (R_1 + R_2)] \times U_{\text{ВИХ MIN}}^-$$

звідки ширина зони гістерезису:

$$U_{\Gamma} = U_{\text{СПР}} - U_{\text{ВДП}} = [R_1 / (R_1 + R_2)] \times (U_{\text{ВИХ MAX}}^+ + U_{\text{ВИХ MIN}}^-)$$

Розглянемо схему інвертуючого тригера Шмітта на ОП при $U_{\text{ОП}} = 0$. Схема (рисунок 4.22, а) є основою при побудові генераторів імпульсів на ОП. Тригер Шмітта використовують для отримання прямокутних імпульсів з імпульсів синусоїдальної напруги (рисунок 4.22, в).

Компаратори знайшли застосування в системах автоматичного управління та у вимірвальній техніці, а також для побудови різних вузлів імпульсної та цифрової дії (зокрема, аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів).

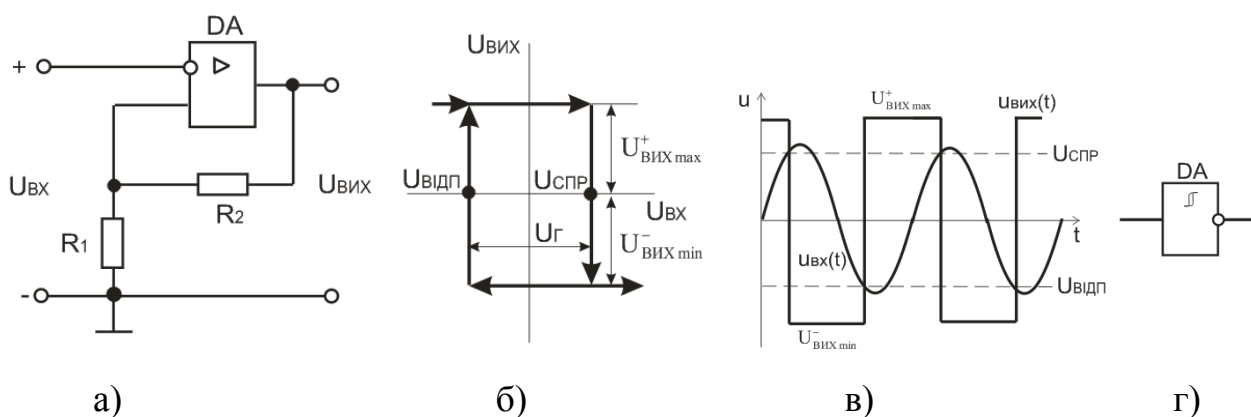


Рисунок 4.22. Інвертуючий тригер Шмітта на операційному підсилювачі: а – схема; б – передатна характеристика; в – часові діаграми, що пояснюють принцип формування напруги прямокутної форми з синусоїдальної; г – умовне позначення.

Контрольні запитання

1. Поясніть, що таке компаратор?
2. Наведіть схему компаратора і його передатну характеристику, поясніть принцип роботи компаратора.

Тестові завдання

1. Що розуміють під власною електропровідністю напівпровідників?

- A) Провідність, обумовлена електронами і дірками, що виникають при розриві парноелектронних зв'язків.
- B) Провідність, обумовлена наявністю надлишку рухомих дірок.
- C) Провідність, обумовлена наявністю надмірних вільних електронів.

2. Що називають електронною провідністю?

- A) Провідність, яка обумовлена наявністю електронів і дірок.
- B) Провідність, обумовлена наявністю вільних електронів.
- C) Провідність, обумовлена наявністю надлишку рухомих дірок.

3. Що називається дірчастою провідністю напівпровідника?

- A) Провідність, обумовлена наявністю вільних електронів.
- B) Провідність, яка обумовлена наявністю електронів або дірок.
- C) Провідність, обумовлена наявністю надлишку рухомих дірок.

4. Що називається напівпровідником *n*- типу?

- A) Напівпровідник, в якому основними носіями зарядів є електрони.
- B) Напівпровідники, в яких основними носіями зарядів є дірки.
- C) Напівпровідник, в якому основними носіями зарядів є електрони і дірки.

5. Що називається напівпровідником *p*- типу?

- A) Напівпровідники, в яких основними носіями зарядів є дірки.
- B) Напівпровідник, в якому основними носіями зарядів є електрони.
- C) Напівпровідник, в якому основними носіями зарядів є електрони і дірки.

6. Що називається *p-n* переходом?

- A) Шар із підвищеною концентрацією основних носіїв зарядів.
- B) Область на межі двох напівпровідників з різними типами електропровідності.
- C) Шар із зниженою концентрацією основних носіїв зарядів.

7. Що таке варистор?

- A) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.
- B) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної температури.
- C) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від механічної деформації.

8. Що таке терморезистор?

- A) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.
- B) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної температури.
- C) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від освітленості.

9. Що таке термістор?

- A) Напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури падає.
- B) Напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури зростає.
- C) Напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури наближається до нуля.

10. Що таке позистор?

- A) Напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури падає.
- B) Напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури зростає.

С) Напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури залишається стабільним.

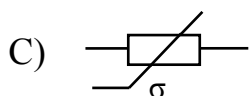
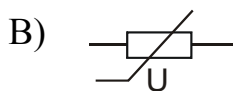
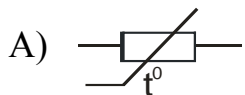
11. Що таке тензорезистор?

- А) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.
- В) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної температури.
- С) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від механічної деформації.

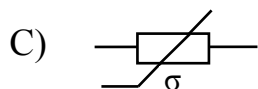
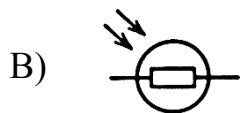
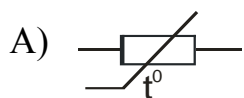
12. Що таке фоторезистор?

- А) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.
- В) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної температури.
- С) Напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від освітленості.

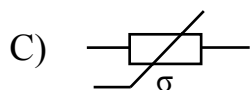
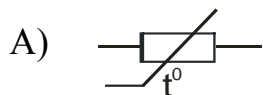
13. Вкажіть умовне графічне позначення варистора.



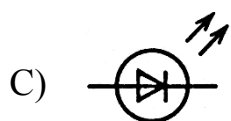
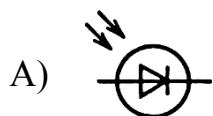
13. Вкажіть умовне графічне позначення терморезистора.



14. Вкажіть умовне графічне позначення тензорезистора.



14. Вкажіть умовне графічне позначення фоторезистора.



15. Яке призначення напівпровідникового випрямного діода?

- A) Для перетворювання змінного струму в постійний.
- B) Для підсилення потужності електромагнітних коливань.
- C) Для перетворювання постійного струму в змінний;

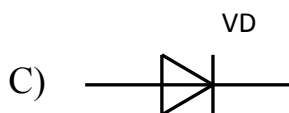
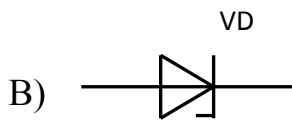
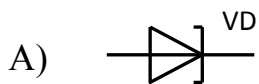
16. Яке призначення напівпровідникового стабілітрона?

- A) Для перетворювання змінного струму в постійний;
- B) Для підсилення потужності електромагнітних коливань;
- C) Для підтримки незмінного рівня напруги.

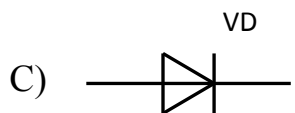
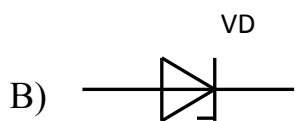
17. Яке призначення варикапа?

- A) Для перетворювання змінного струму в постійний;
- B) Для підтримки незмінного рівня напруги.
- C) Для керування ємністю.

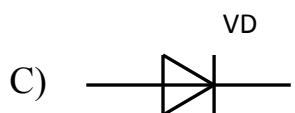
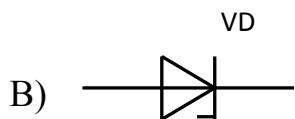
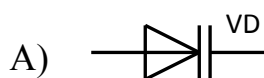
18. Вкажіть умовне графічне позначення випрямного діода.



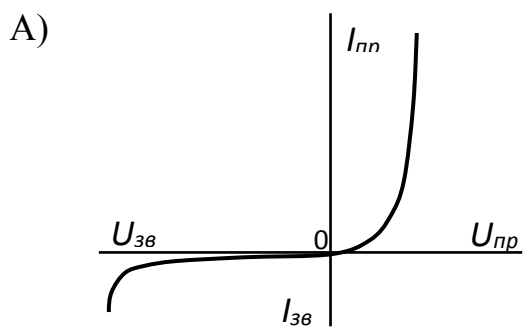
19. Вкажіть умовне графічне позначення стабілітрона.

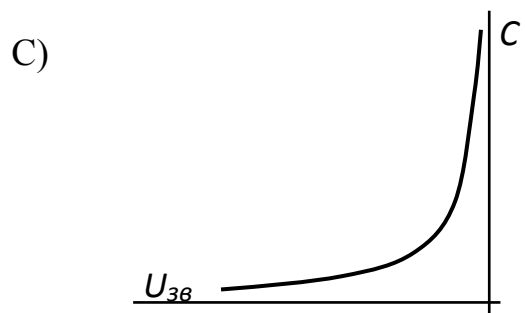
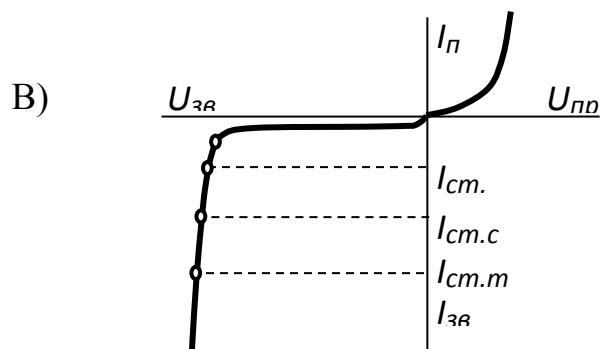


20. Вкажіть умовне графічне позначення варикапа.

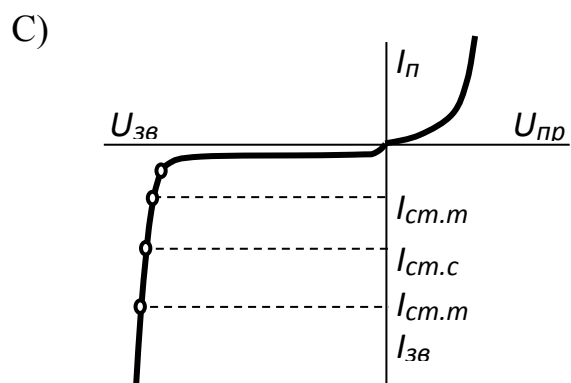
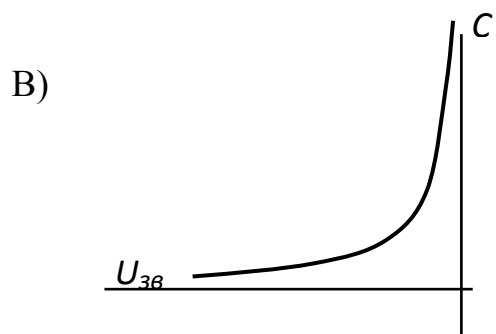
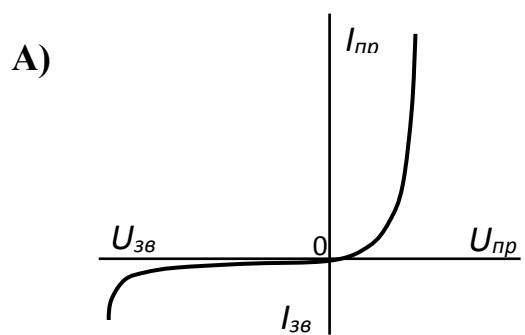


21. Вкажіть ВАХ випрямного діода.



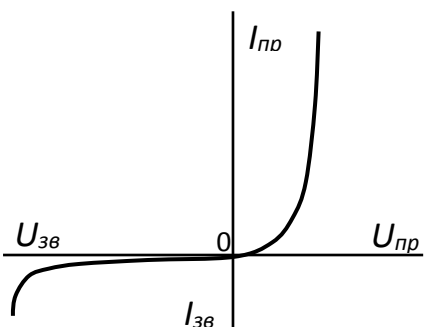


22. Вкажіть ВАХ стабілітрона.

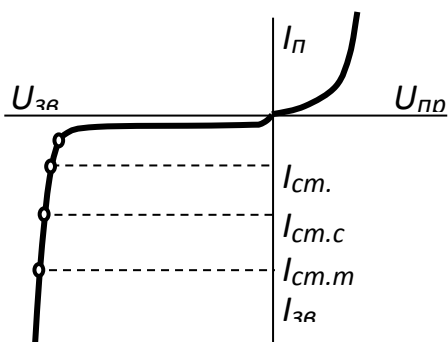


23. Вкажіть вольт-фарадну характеристику варикапа.

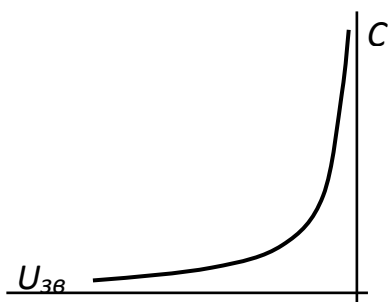
A)



B)

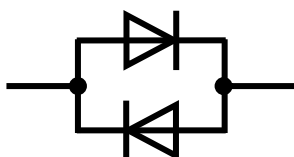


C)

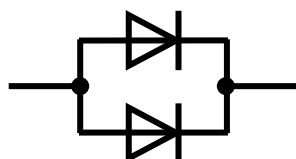


24. Як необхідно вмикати в електричне коло два однотипних випрямних діоди, які розраховані на максимально допустимий струм 100 мА кожний, якщо в колі протікає струм $I = 150$ мА?

A)



B)



C)



25. Яку напругу можна стабілізувати на навантаженні при послідовному вмиканні двох стабілітронів типу Д814Г, кожний з яких має напругу стабілізації $U_{ст} = 10...12$ В?

- A) 5...6 В
- B) 10...12 В
- C) 20...24 В

26. Що називають диністором?

- A) Це тиристор, що має два зовнішніх виводи (анод і катод)
- B) Це тиристор, що має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод).
- C) Це триелектродний напівпровідниковий прилад з одним *p-n*- переходом

27. Що називають триністором?

- A) Це тиристор, що має два зовнішніх виводи (анод і катод)
- B) Це тиристор, що має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод).
- C) Це напівпровідниковий прилад, який має однакові ВАХ при різних полярностях прикладеної напруги i , який проводить струм в обох напрямках.


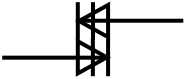

28. Що називають симістором?

- A) Це тиристор, що має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод).
- B) Це напівпровідниковий прилад, який має однакові ВАХ при різних полярностях прикладеної напруги i , який проводить струм в обох напрямках.
- C) Це триелектродний напівпровідниковий прилад з одним *p-n*- переходом

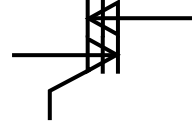


29. Що називають одноперехідним транзистором?

- A) Це тиристор, що має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод).
- B) Це напівпровідниковий прилад, який має однакові ВАХ при різних полярностях прикладеної напруги і, який проводить струм в обох напрямках.
- C) Це триелектродний напівпровідниковий прилад з одним *p-n*- переходом

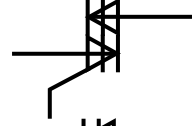


30. Вкажіть умовне графічне позначення диністора.

- A) 
- B) 
- C) 

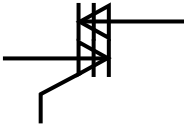


31. Вкажіть умовне графічне позначення триністора з керуванням по катоду.

- A) 
- B) 
- C) 

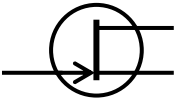

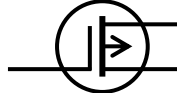
32. Вкажіть умовне графічне позначення керованого симістора.

- A) 
- B) 
- C) 

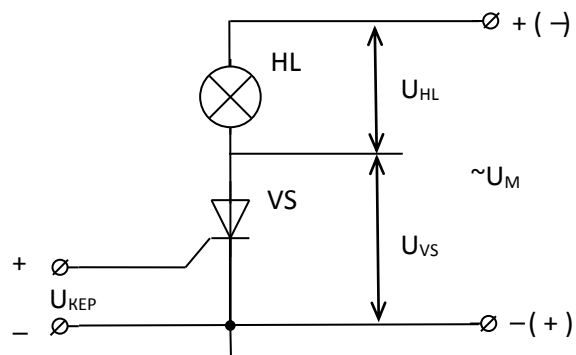
33. Вкажіть умовне графічне позначення некерованого симістора.

- A) 
- B) 
- C) 

34. Вкажіть умовне графічне позначення одноперехідного транзистора.

- A) 
- B) 
- C) 

35. В яких межах можна регулювати напругу на навантаженні U_{HL} змінюючи кут керування тиристором α – від 0 до π , якщо $U_M = 220$ В?



- A) 0...42В
- B) 0...110В
- C) 110...220В

36. Що називають біполярним транзистором ?

- A) Напівпровідниковий прилад, що складається з трьох областей провідності, які утворюють два $p-n$ - переходи.
- B) Напівпровідниковий прилад, що складається з двох областей провідності, які утворюють два $p-n$ - переходи.
- C) Напівпровідниковий прилад, що складається з трьох областей провідності, які утворюють три $p-n$ - переходи.

37. Яке призначення має біполярний транзистор?

- A) Для перетворення змінного струму в постійний.
- B) Для підсилення потужності електромагнітних коливань.
- C) Для перетворення постійного струму в змінний.

38. Вкажіть умовне графічне позначення біполярного транзистора $p-n-p$ - типу.

- A)
- B)
- C)

39. Вкажіть умовне графічне позначення біполярного транзистора $n-p-n$ типу.

- A)
- B)
- C)

40. Яку область біполярного транзистора називають емітером?

- A) Область транзистора, призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базу.
- B) Область транзистора, призначенням якої є екстракція носіїв заряду з бази.
- C) Область транзистора, в яку інжектуються емітером неосновні для цієї області носії заряду.

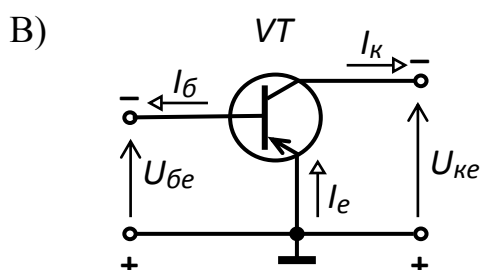
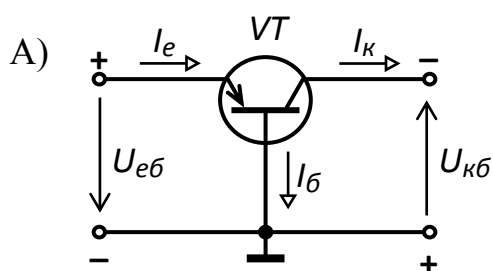
41. Яку область біполярного транзистора називають колектором?

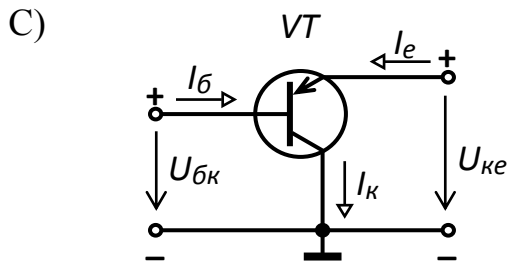
- A) Область транзистора, призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базу.
- B) Область транзистора, призначенням якої є екстракція носіїв заряду з бази.
- C) Область транзистора, в яку інжектуються емітером неосновні для цієї області носії заряду.

42. Яку область біполярного транзистора називають базою?

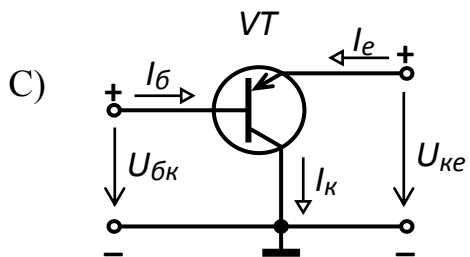
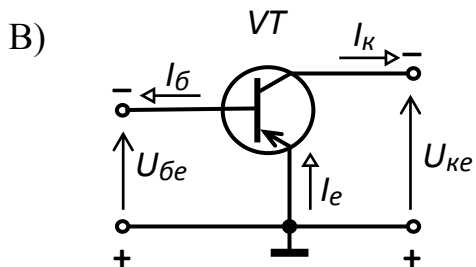
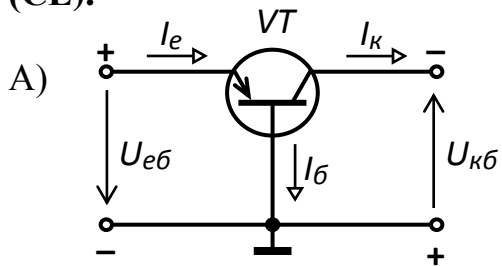
- A) Область транзистора, призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базу.
- B) Область транзистора, в яку інжектуються емітером неосновні для цієї області носії заряду.
- C) Область транзистора, в яку дифузуються емітером неосновні для цієї області носії заряду.

43. Вкажіть схему вмикання біполярного транзистора зі спільною базою (СБ).

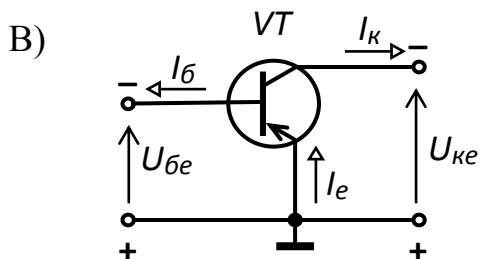
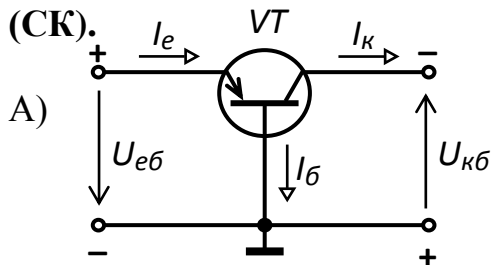


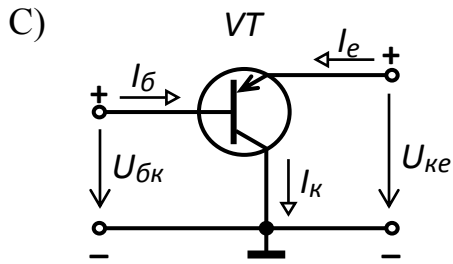


44. Вкажіть схему вмикання біполярного транзистора зі спільним емітером (СЕ).



45. Вкажіть схему вмикання біполярного транзистора зі спільним колектором (СК).





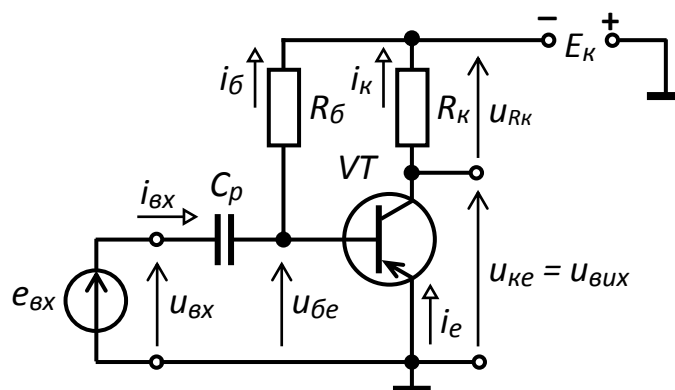
46. Яке призначення підсилювального каскаду?

- A) Для збільшення параметрів напруги, струму, потужності електричного сигналу
- B) Для збільшення параметрів напруги електричного сигналу
- C) Для збільшення параметрів струму електричного сигналу

47. Відомо, що $K_U = 25$, $K_I = 100$. Визначте коефіцієнт підсилення каскаду за потужністю K_P .

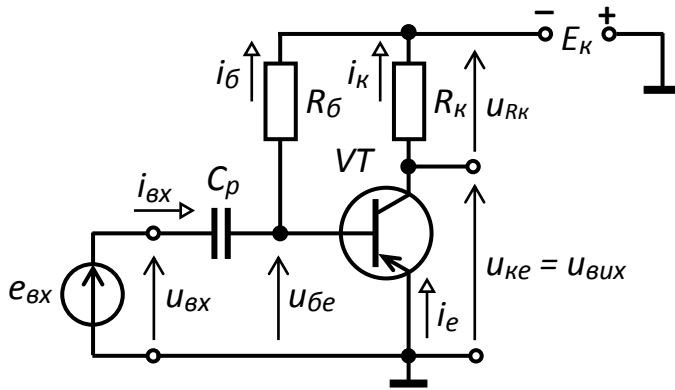
- A) 2,5
- B) 2500
- C) 250

48. Для чого призначений конденсатор C_p



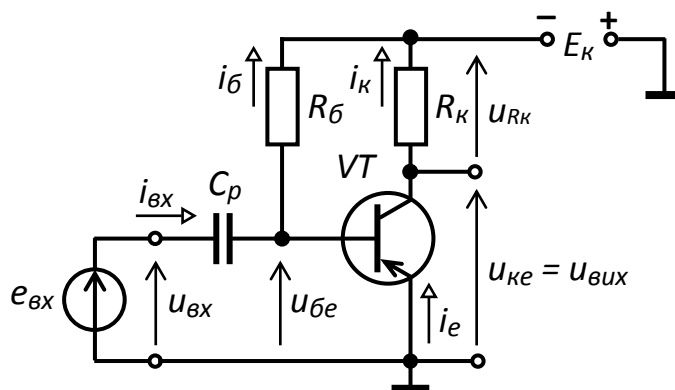
- A) Для пропускання лише змінної складової вхідного сигналу
- B) Для пропускання лише змінної складової вихідного сигналу
- C) Для пропускання лише постійної складової вхідного сигналу

49. Для чого призначений резистор R_K



- А) Для створення напруги, що змінюється, у вихідному колі за рахунок протікання в ній струму, керованого по колу бази.
- В) Забезпечує роботу транзистора в режимі спокою.
- С) Для збільшення параметрів струму електричного сигналу.

50. Для чого призначений резистор R_B



- А) Забезпечує роботу транзистора в режимі спокою.
- В) Для створення напруги, що змінюється, у вихідному колі за рахунок протікання в ній струму, керованого по колу бази.
- С) Для збільшення параметрів напруги електричного сигналу

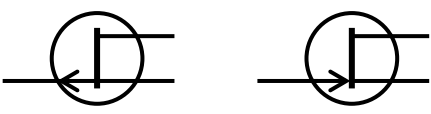
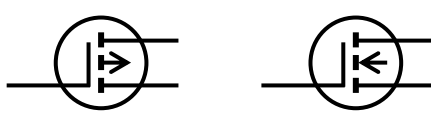
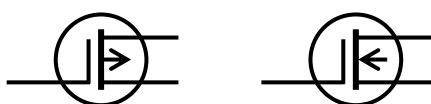
51. Що називають польовим транзистором?

- A) Електроперетворювальний прилад, в якому струм, що протікає через канал, керується електричним полем, яке виникає при прикладенні напруги між затвором і витокком.
- B) Електроперетворювальний прилад, в якому струм, що протікає через канал, керується електричним полем, яке виникає при прикладенні напруги між затвором і стоком.
- C) Електроперетворювальний прилад, в якому струм, що протікає через канал, керується електричним полем, яке виникає при прикладенні напруги між стоком і витокком.

52. Яке призначення має польовий транзистор?

- A) Для перетворювання змінного струму в постійний;
- B) Для підсилення потужності електромагнітних коливань;
- C) Для перетворювання постійного струму в змінний;

53. Вкажіть умовне графічне позначення польового транзистора з керуючим *p-n* переходом.

- A) 
- B) 
- C) 

54. Яку область польового транзистора називають каналом?

- A) Область в напівпровіднику, в якій струм основних носіїв заряду регулюється зміною її поперечного перетину.

- В) Область в напівпровіднику, в якій струм основних носіїв заряду регулюється зміною її повздовжнього перетину.
- С) Область в напівпровіднику, в якій струм основних носіїв заряду не регулюється.

55. Який електрод польового транзистора називають витокком?

- А) Електрод, через який в канал входять основні носії заряду.
- В) Електрод, через який з каналу виходять основні носії заряду.
- С) Електрод, призначений для регулювання поперечного перетину каналу за рахунок керуючої напруги.

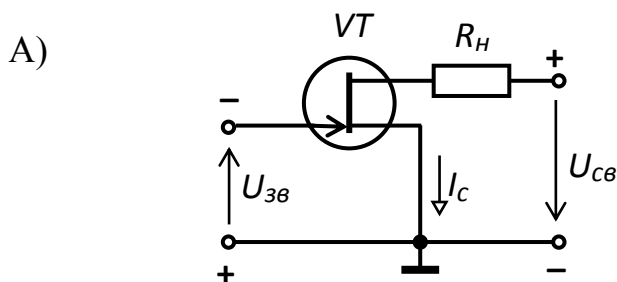
56. Який електрод польового транзистора називають стоком?

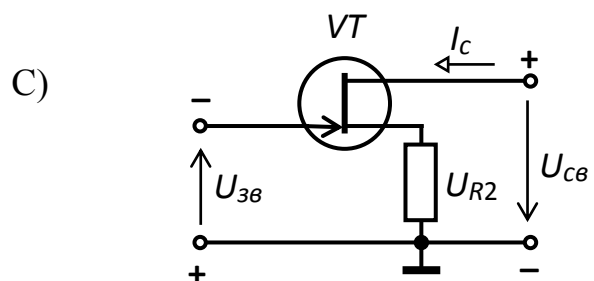
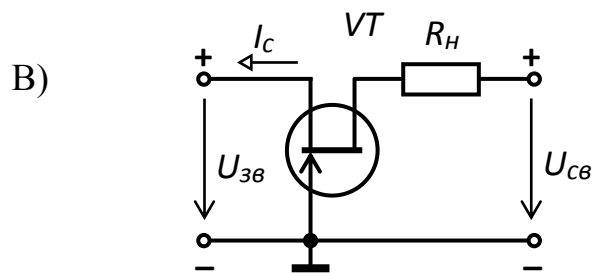
- А) Електрод, через який в канал входять основні носії заряду.
- В) Електрод, через який з каналу виходять основні носії заряду.
- С) Електрод, призначений для регулювання поперечного перетину каналу за рахунок керуючої напруги.

57. Який електрод польового транзистора називають затвором?

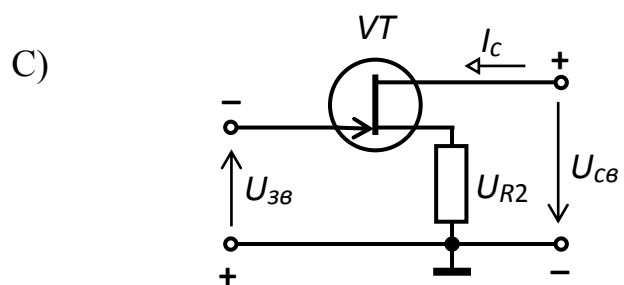
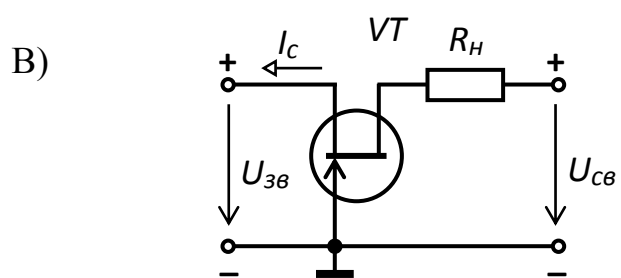
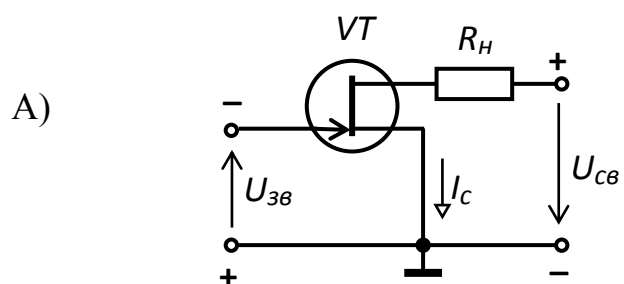
- А) Електрод, через який в канал входять основні носії заряду.
- В) Електрод, через який з каналу виходять основні носії заряду.
- С) Електрод, призначений для регулювання поперечного перетину каналу за рахунок керуючої напруги.

58. Вкажіть схему увімкнення польового транзистора з спільним витокком.

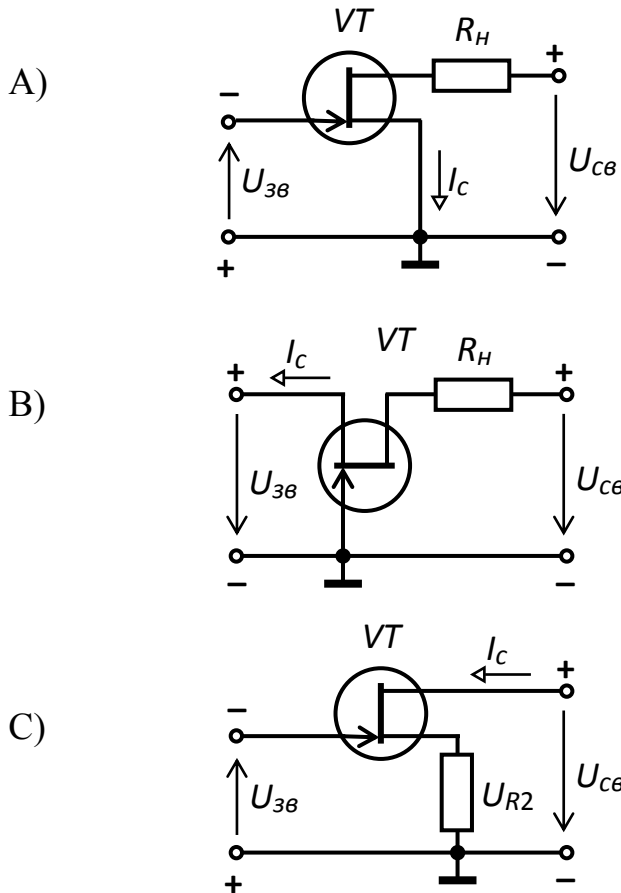




59. Вкажіть схему увімкнення польового транзистора з спільним затвором.



60. Вкажіть схему увімкнення польового транзистора з спільним стоком.



61. Яке призначення підсилювального каскаду?

- A) Для підсилення параметрів вхідного сигналу.
- B) Для підсилення параметрів вихідного сигналу.
- C) Для підсилення параметрів напруги вихідного сигналу.

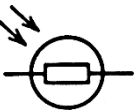
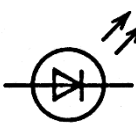
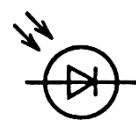
62. Який режим роботи польового транзистора називають режимом спокою?

- A) Режим роботи при відсутності вхідного сигналу.
- B) Режим роботи при відсутності вихідного сигналу.
- C) Режим роботи при відсутності зміни параметрів сигналу.

63. Що називають напівпровідниковим світлодіодом?

- A) Випромінюючий напівпровідниковий прилад для перетворення електричної енергії в енергію світлового випромінювання.
 - B) Випромінюючий напівпровідниковий прилад для перетворення електричної енергії в теплову енергію.
 - C) Випромінюючий напівпровідниковий прилад для перетворення електричної енергії в механічну енергію.
- випромінюючий напівпровідниковий прилад для перетворення електричної енергії в хімічну енергію.

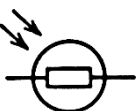
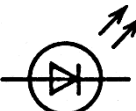
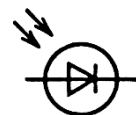
64. Вкажіть умовне графічне позначення напівпровідникового світлодіода.

- A) 
- B) 
- C) 

65. Що називають фотодіодом?

- A) Напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від освітленості.
- B) Напівпровідниковий діод, опір якого залежить від освітленості.
- C) Напівпровідниковий діод, напруга якого залежить від освітленості.

66. Вкажіть умовне графічне позначення фотодіода.

- A) 
- B) 
- C) 

67. Що таке інтегральна мікросхема (ІМС)?

- А) Мікроелектронний виріб, що виконує функцію перетворення та обробки сигналу і має не менше п'яти елементів (транзисторів, діодів, резисторів, конденсаторів), які розглядаються як єдине ціле.
- В) Мікроелектронний виріб, що виконує функцію перетворення та обробки сигналу і має не менше десяти елементів (транзисторів, діодів, резисторів, конденсаторів), які розглядаються як єдине ціле.
- С) Мікроелектронний виріб, що виконує функцію перетворення та обробки сигналу і має не менше п'яти елементів (транзисторів, діодів, резисторів, конденсаторів), які незв'язані між собою.

68. Які елементи використовують в напівпровідникових інтегральних мікросхемах як активні?

- А) Як активний елемент застосовують біполярний або польовий МДН- транзистор.
- В) Як активний елемент застосовують діод, резистор, конденсатор.
- С) Як активний елемент застосовують диністор, триністор, симістор.

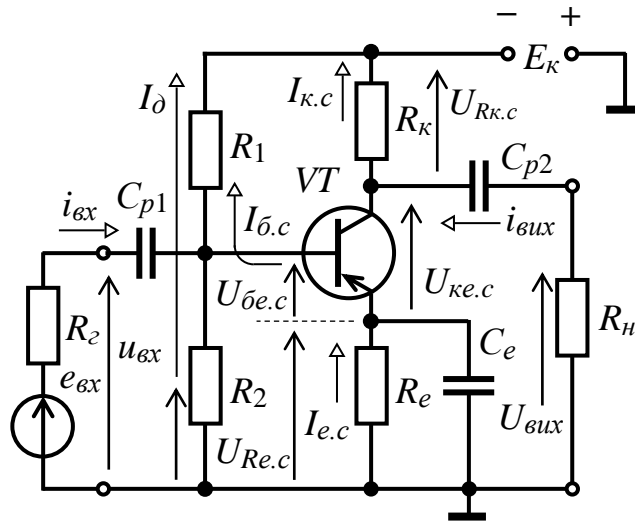
69. Для чого призначені цифрові ІМС?

- А) Для перетворення або обробки дискретних сигналів, виражених цифровому коді.
- В) Для перетворення або обробки безперервних (аналогових) сигналів.
- С) Для перетворення або обробки безперервних звукових сигналів.

70. Для чого призначені аналогові ІМС?

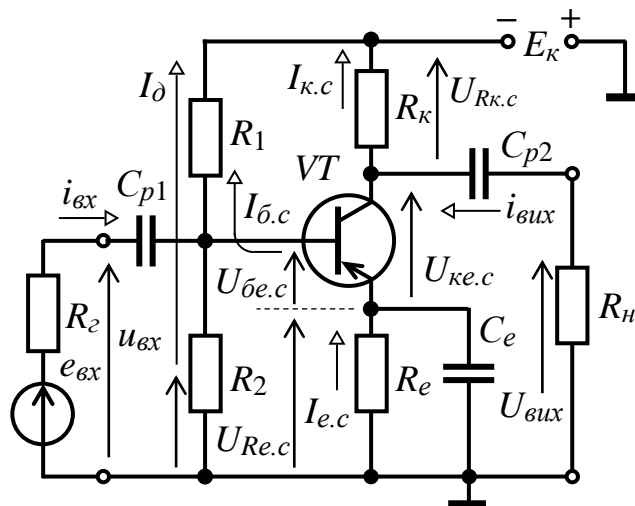
- А) Для перетворення або обробки безперервних (аналогових) сигналів.
- В) Для перетворення або обробки дискретних сигналів, виражених у цифровому коді.
- С) Для перетворення або обробки перервних (аналогових) сигналів.

71. Який з елементів підсилювального каскаду на біполярному транзисторі використовується для задання режиму спокою?



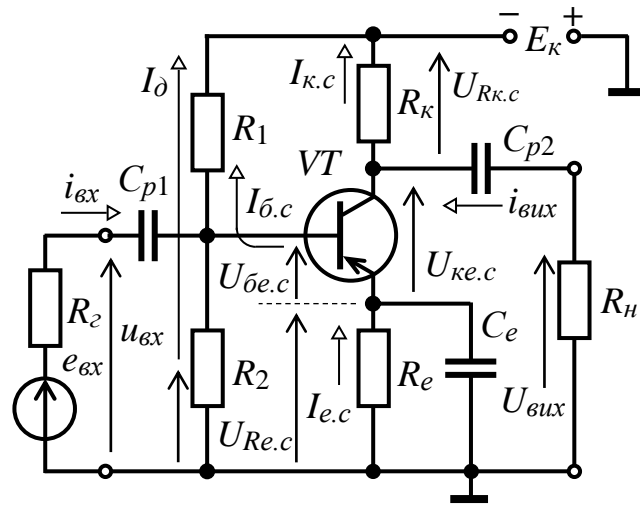
- A) Резистори R_1, R_2
- B) Резистор R_E
- C) Конденсатор C_E

72. Який з елементів підсилювального каскаду здійснює температурну стабілізацію положення робочої точки?



- A) Резистори R_1, R_2
- B) Резистор R_E
- C) Конденсатор C_E

73. Який з елементів підсилювального каскаду призначений для пропускання в коло навантаження змінної складової напруги і затримання постійної складової?



- A) Резистор R_E
- B) Конденсатор C_{P2}
- C) Конденсатор C_E

74. Яке призначення підсилювачів постійного струму?

- A) Для підсилення сигналів, що повільно змінюються.
- B) Для підсилення сигналів, що швидко змінюються.
- C) Підвищує коефіцієнт підсилення підсилювача.

75. Яке призначення генераторів синусоїдальних коливань ?

- A) Для перетворювання електричної енергії джерела постійного струму в енергію електричних синусоїдальних коливань заданої частоти.
- B) Для перетворювання електричної енергії джерела постійного струму в енергію електричних синусоїдальних коливань низької частоти.
- C) Для перетворювання електричної енергії джерела постійного струму в енергію електричних синусоїдальних коливань високої частоти.

76. Що називають електричним імпульсом?

- A) Тривалість зміни коливань заданої частоти.
- B) Тривалі зміни струмів і напруги.
- C) Короткочасні зміни струмів і напруги.

77. Що називають амплітудою імпульсу?

- A) Величина, що визначає найбільшу напругу імпульсного сигналу.
- B) Величина, що характеризує тривалість імпульсу в часі.
- C) Інтервал часу між відповідними точками двох сусідніх імпульсів.

78. Що називають тривалістю імпульсу?

- A) Величина, що визначає найбільшу напругу імпульсного сигналу.
- B) Величина, що характеризує тривалість імпульсу в часі.
- C) Інтервал часу між відповідними точками двох сусідніх імпульсів.

79. Що називають періодом повторення імпульсів?

- A) Величина, що визначає найбільшу напругу імпульсного сигналу.
- B) Величина, що характеризує тривалість імпульсу в часі.
- C) Інтервал часу між відповідними точками двох сусідніх імпульсів.

80. Що називають частотою повторення імпульсів?

- A) Величина, що характеризує тривалість імпульсу в часі;
- B) Інтервал часу між відповідними точками двох сусідніх імпульсів;
- C) Величина, зворотна періоду повторення: $f = 1/T$.

81. Що називають логічними елементами?

- A) Це електронні схеми, які відтворюють логічні функції і оперують логічними величинами, які приймають тільки два значення: логічну одиницю та логічний нуль..

В) Це електронні схеми, які відтворюють логічні функції і оперують аналоговими величинами.

С) Це електронні схеми, які відтворюють логічні функції і оперують цифровими величинами.

82. Яким виразом описується операція логічного заперечення НІ?

A) $y = \bar{x}$

B) $y = x_1 + x_2 + \dots$

C) $y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots$

83. Яким виразом описується операція логічного додавання АБО?

A) $y = x_1 + x_2 + \dots$

B) $y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots$

C) $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$

84. Яким виразом описується операція логічного множення І?

A) $y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots$

B) $y = \overline{x_1 + x_2}$

C) $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$

85. Яким виразом описується операція заперечення логічного додавання АБО – НІ ("стрілка Пірса")?

A) $y = \overline{x_1 + x_2}$

B) $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$

C) $y = x_1 \cdot \overline{x_2}$

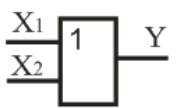
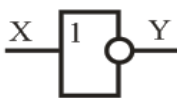
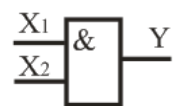
86. Яким виразом описується операція заперечення логічного множення І – НІ ("штрих Шеффера")?

- A) $y = \bar{x}$
- B) $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
- C) $y = x_1 + x_2 + \dots$

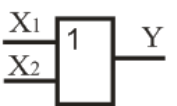
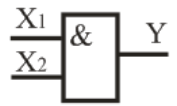
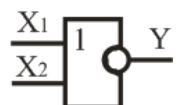
87. Яким виразом описується операція ЗАБОРОНА?

- A) $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
- B) $y = \overline{x_1 + x_2}$
- C) $y = x_1 \cdot \overline{x_2}$

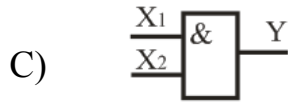
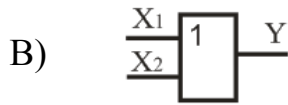
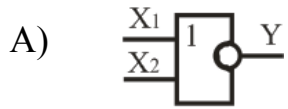
88. Вкажіть умовне позначення логічного елемента НІ.

- A) 
- B) 
- C) 

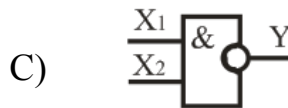
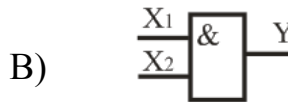
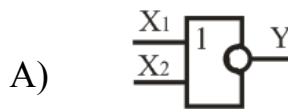
89. Вкажіть умовне позначення логічного елемента АБО.

- A) 
- B) 
- C) 

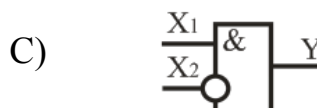
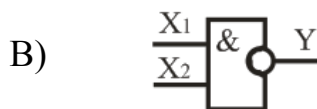
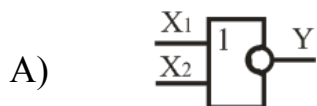
90. Вкажіть умовне позначення логічного елемента І.



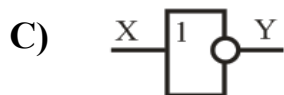
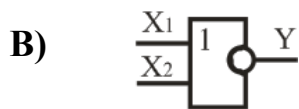
91. Вкажіть умовне позначення логічного елемента АБО-НІ. ("стрілка Пірса")?



92. Вкажіть умовне позначення логічного елемента І – НІ ("штрих Шеффера")?



93. Вкажіть умовне позначення логічного елемента ЗАБОРОНА



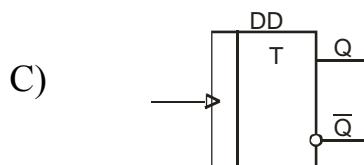
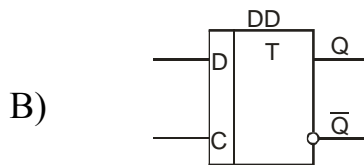
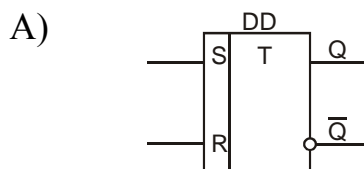
93. Що називають тригером?

A) Пристрій, що має два стани стійкої рівноваги і здатний стрибком переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу.

B) Пристрій, що має три стани стійкої рівноваги і здатний стрибком переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу.

C) Пристрій, що має два стани стійкої рівноваги і здатний стрибком переходити з одного стану в інший під впливом внутрішнього керуючого сигналу.

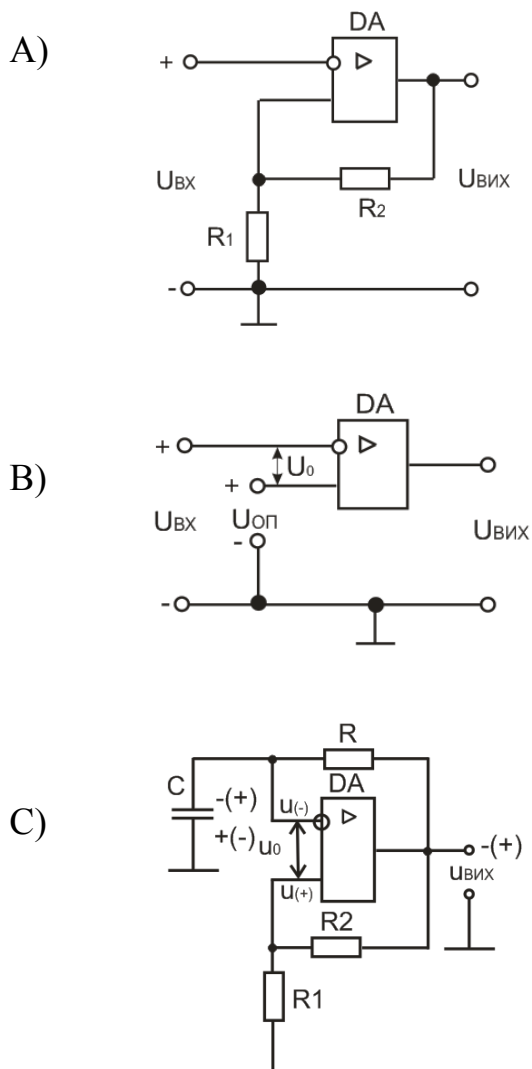
94. Вкажіть умовне графічне позначення асинхронного RS тригера.



95. Що називають компаратором?

- A) Пристрій, який призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його входи.
- B) Пристрій, який призначений для формування напруги прямокутної форми з вхідної напруги довільної форми
- C) Пристрій, який призначений для формування прямокутного імпульсу напруги з необхідними параметрами при дії на вході короткого запускаючого імпульсу.

96. Вкажіть схему компаратора.



97. Що називають мультівібратором?

- А) Пристрій, який призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його входи.
- В) Пристрій, який призначений для формування напруги прямокутної форми з вхідної напруги довільної форми
- С) Пристрій, який призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його виходи.

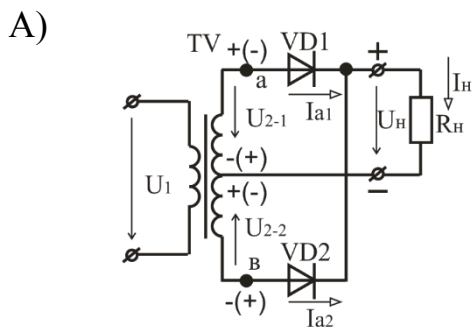
98. Що називають одновібратором?

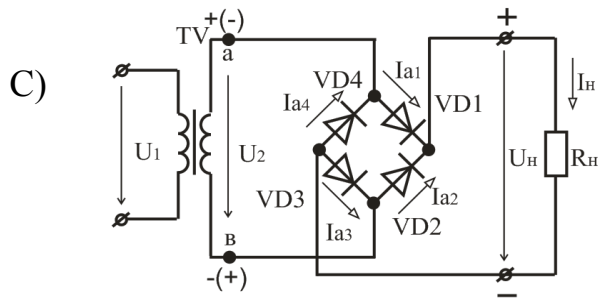
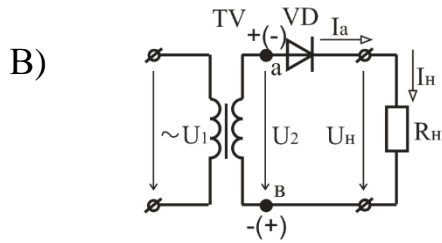
- А) Пристрій, який призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його входи.
- В) Пристрій, який призначений для формування напруги прямокутної форми з вхідної напруги довільної форми
- С) Пристрій, який призначений для формування прямокутного імпульсу напруги з необхідними параметрами при дії на вході короткого запускаючого імпульсу.

99. Що називають випрямлячем?

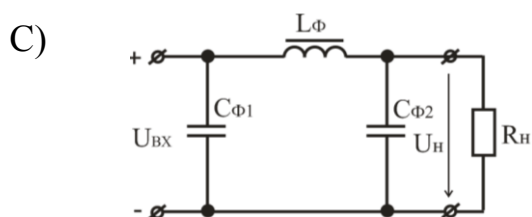
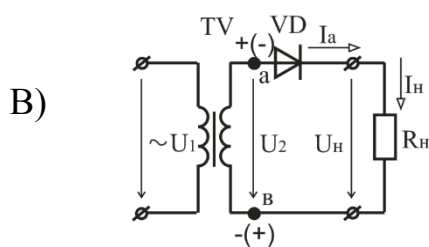
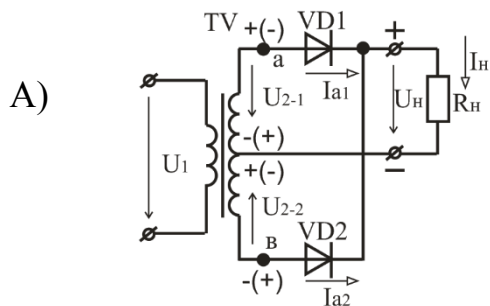
- А) Пристрій, який призначений для перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму.
- В) Пристрій, який призначений для перетворення енергії постійного струму в енергію змінного струму.
- С) Пристрій, який призначений для зменшення пульсацій випрямленої напруги.

100. Вкажіть схему однофазного однонапівперіодного випрямляча.

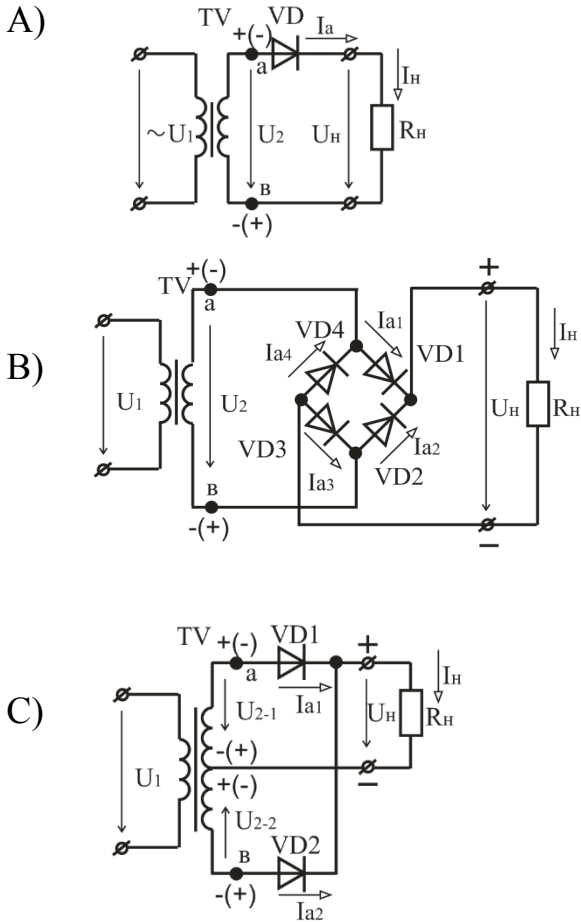




101. Вкажіть схему однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом.



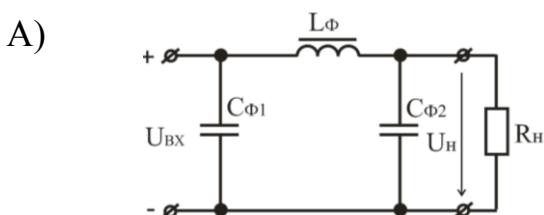
102. Вкажіть схему однофазного мостового випрямляча.

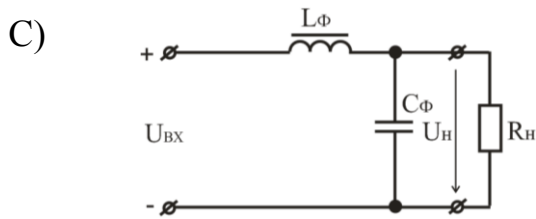
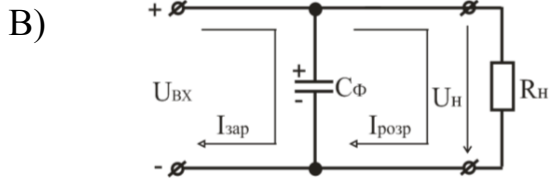


103. Що називають згладжуючим фільтром?

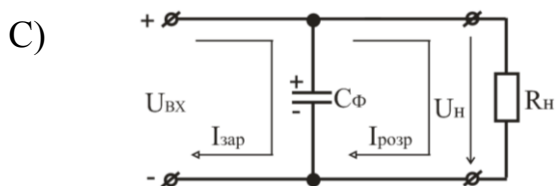
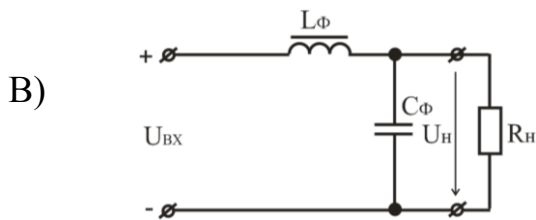
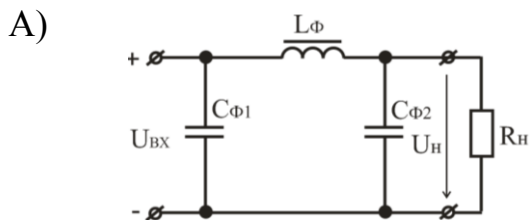
- A) Пристрій, який призначений для зменшення пульсацій випрямленої напруги.
- B) Пристрій, який призначений для перетворювання енергії постійного струму в енергію змінного струму.
- C) Пристрій, який дозволяє отримати на виході напругу, в будь-яке число разів більше напруги на його вході.

104. Вкажіть схему ємнісного згладжуючого фільтра.





105. Вкажіть схему Γ -подібного згладжуючого LC -фільтра.



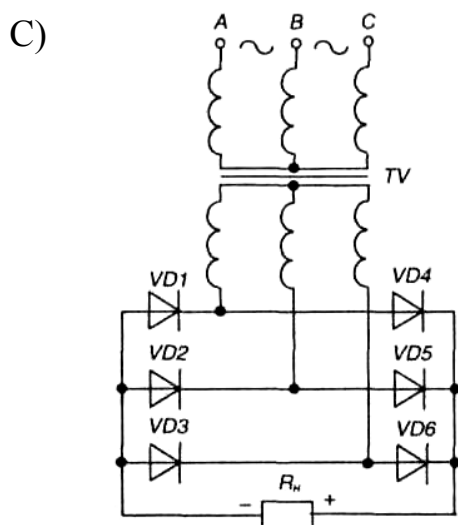
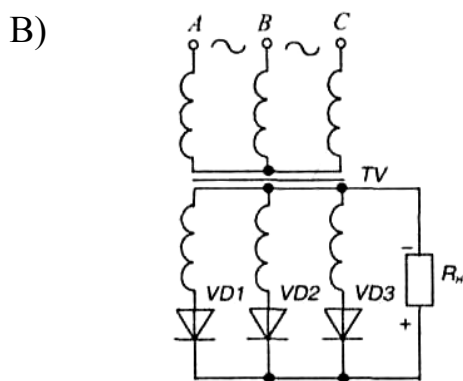
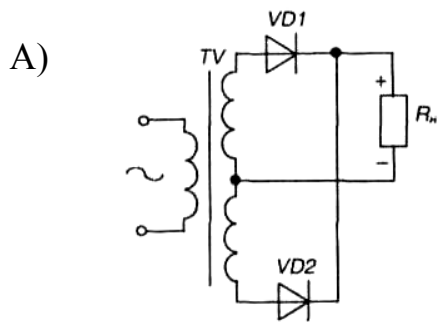
106. Що називають стабілізатором напруги?

A) Електронний пристрій, який призначений для автоматичної підтримки незмінного значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору (струму) навантаження.

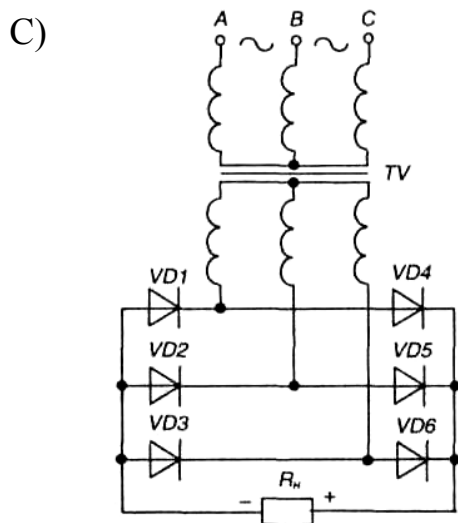
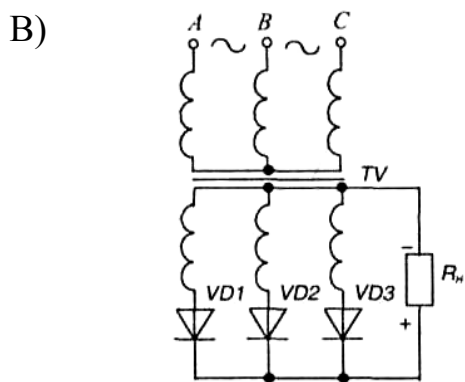
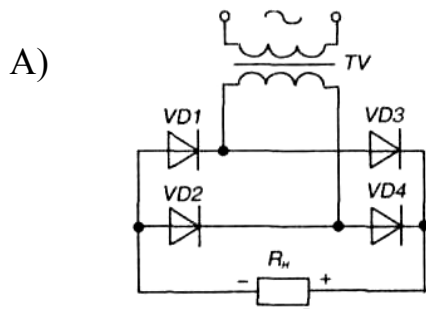
B) Електронний пристрій, який призначений для автоматичної підтримки незмінного значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела.

С) Електронний пристрій, який призначений для автоматичної підтримки незмінного значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни опору (струму) навантаження.

107. Вкажіть схему трифазного однонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом (схема Міткевича).



108. Вкажіть схему трифазного двонапівперіодного мостового випрямляча (схема Ларіонова).



Література.

1. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники. – К.: Вища школа, 1989.
2. Квітка О.Г. Яковлєв В.Ф. Нікітіна О.В. Електроніка та мікросхемотехніка. – К.: Аграрна освіта, 2010.
3. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка. – К.: Каравела, 2003.
4. Н.М. Щупляк. Основи електроніки і мікроелектроніки. - м. Дрогобич 2012р.