



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет енергетики, робототехніки
та комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки,
робототехніки, біомедичної інженерії та
електротехніки**

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Конспект лекцій

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої
освіти денної та (заочної) форми навчання,
спеціальності
163 «Біомедична інженерія»**

**Харків
2023**

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних
технологій
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної
інженерії та електротехніки

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої
освіти денної та (заочної) форми навчання, спеціальності
163 «Біомедична інженерія»

Затверджено
рішенням Науково-методичної
ради факультету ЕРКТ
Протокол № 1 від 20
жовтня 2022 р.

Харків
2023

УДК 615.47+57.08

О 75

Схвалено

на засіданні кафедри електромеханіки, робототехніки,

біомедичної інженерії та електротехніки

Протокол № 1 від 31 серпня 2022 р.

Рецензент:

О.М. Мороз, д-р тех. наук, проф. кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державний біотехнологічний університет.

О 75 Електроніка та мікросхемотехніка: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навч., спец. 163 «Біомедична інженерія» / Державний біотехнологічний університет; уклад.: О.Д. Черенков, М.О. Чорна. – Харків: [б. в.], 2023. – 154 с.

Конспект лекцій призначено для вивчення курсу «Електроніка та мікросхемотехніка»

Видання призначене здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та (заочної) форми навчання, спеціальності 163 «Біомедична інженерія».

УДК 615.47+57.08

Відповідальний за випуск: М. О. Чорна, к.т.н., доцент.

© О.Д. Черенков, 2023

© М.О. Чорна, 2023

© ДБТУ, 2023

Лекція № 1

Електрофізичні властивості напівпровідників

Основними процесами в напівпровідникових приладах є отримання вільних носіїв зарядів, управління їх концентрацією, швидкістю і напрямом руху за допомогою електричних і магнітних полів.

1. Що являє собою напівпровідник?
2. Як виникають вільні носії зарядів?
3. Які чинники впливають на провідність напівпровідників?

Внутрішня структура напівпровідника

Напівпровідниками називаються матеріали, що займають проміжне положення між провідниками і діелектриками по електропровідності.

Питомий електричний опір провідників лежить в межах $10^{-8} - 10^{-5}$ Ом·м, напівпровідників $-10^{-5} \dots 10^7$ Ом·м, діелектриків - $10^7 - 10^{16}$ Ом·м. Для напівпровідників характерна сильна залежність провідності від температури, електричного поля, освітленості, стиснення і т.д.

В електроніці найбільш широке застосування знайшли германій, кремній, арсенід галію, сульфід Кадмія. У кристалах германію зв'язок між двома сусідніми атомами здійснюється двома валентними електронами, які утворюють ковалентний зв'язок.

В результаті зовнішня орбіта для кожного атома має як би по вісім електронів і стає повністю заповненою. Отримана кристалічна решітка є ідеальною і напівпровідники при $T=2730$ є ідеальними ізоляторами.

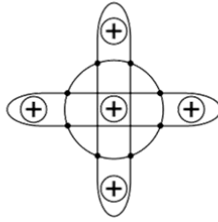


Рисунок 1

Власна провідність напівпровідників

1. Гіпотеза Планка. Енергія електрона в атомі може приймати певні дискретні значення.

2. Принцип заборони Паулі. Кожній орбіті відповідає суворо певний рівень енергії, або дозволений енергетичний рівень.

Таким чином в твердому тілі є:

Валентна зона - утворена сукупністю енергетичних рівнів валентних електронів;

Зона провідності - дозволени рівні енергії, які можуть займати електрони, які отримали додаткову енергію.

Ці енергетичні зони розділені проміжком, який не містить енергетичний рівень. Такий проміжок прийнято називати забороненою зоною (2). Шириною забороненої зони визначається електропровідністю матеріалу.

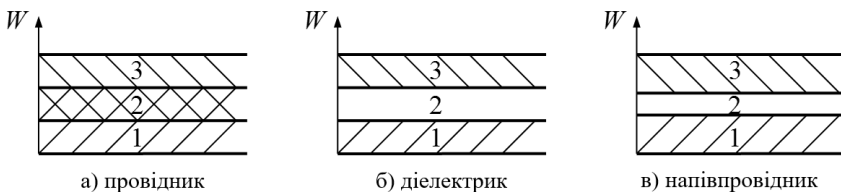


Рисунок 2 - Енергетична діаграма матеріалів

1- валентна зона; 2 - заборонена зона; 3 - зона провідності

У провідника зона валентних електронів перекриває зону провідності.

У діелектриків заборонена зона велика, і отже для переходу валентних електронів в зону провідності потрібно повідомити енергію не менше 3 еВ. Для напівпровідників заборонена зона становить 0,5 ... 3 еВ.

Таким чином під дією зовнішніх факторів Вален. Електрони атомів кристалічної решітки розривають ковалентні зв'язки і переходять в зону провідності. При звільненні електрона з ковалентного зв'язку в останній виникає вільне місце, що володіє позитивним зарядом рівним заряду ел-на. Це місце назвали діркою, а процес утворення пари електрон-дверцята отримав назву генерації зарядів. Процес заповнення дверки отримав назву рекомбінації.

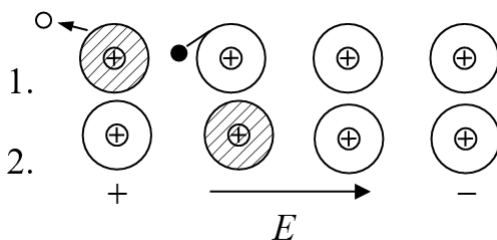


Рисунок 3

При відсутності зовнішнього поля електрони і дірки переміщуються в кристалі хаотично. Якщо ж на кристал діє електричне поле, рух електричних зарядів стає впорядкованим і в кристалі виникає електричний струм. Залежно від носіїв зарядів різняться два типу провідності: електронну, або провідність типу n, і дірковий, або провідність типу p.

У хімічно чистому кристалі число дірок дорівнює кількості вільних електронів і електричний струм в ньому утворює переноси як негативних так і позитивних зарядів. Число вільних електронів в безвикористаному германії рівне.

Така електронно-діркова провідність називається власною провідністю напівпровідника.

Домішкова провідність провідника

Залежно від домішок, що вносяться до кристал напівпровідника, можна отримати переважання надлишкових електронів або дірок.

Провідність, викликана внесенням домішок, називається примісною.

Домішки, що викликають в напівпровіднику збільшення електронів, називаються донорними, а викликають збільшення дірок - акцепторними.

Різну дію домішок пояснюється наступним чином.

Нехай вводиться миш'як (пятивалентного) (Рисунок 3).

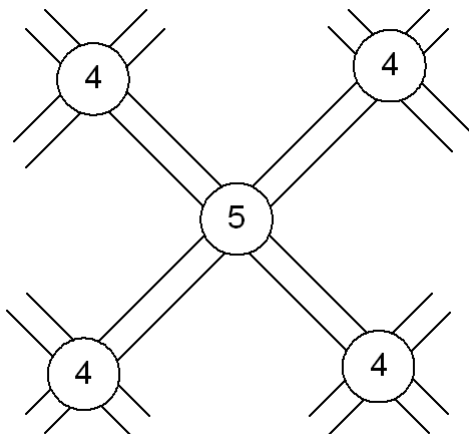


Рисунок 4

В цьому випадку атоми миш'яку своїми чотирма з 5 валентними електронами вступають в зв'язок з атомами германію. П'ятий електрон стає вільним.

Напівпровідник з домішками, що збільшують число вільних електронів називається напівпровідник типу n.

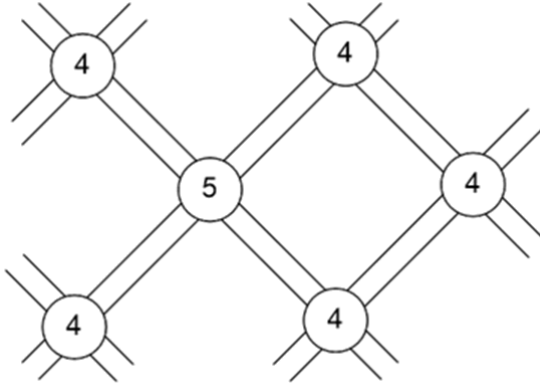


Рисунок 5

Введення в чотиривалентний напівпровідник 3х валентного елемента, наприклад ідія або алюмінію, призводить до надлишку дірок над вільними електронами (Рисунок 4).

Напівпровідник, електропровідність якого обумовлена рухом дверцят називається напівпровідником типу p.

На енергетичних діаграмах процес утворення надлишкових електронів або дірок показаний на рисунках 5, 6.

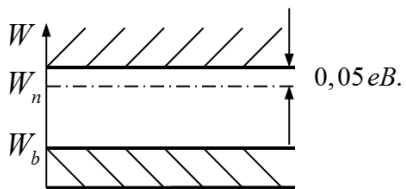


Рисунок 6

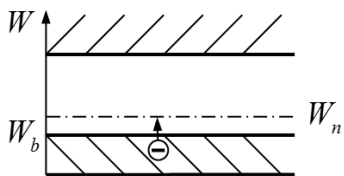


Рисунок 7

Формування електронно-діркового переходу

Електричний перехід між двома областями напівпровідника, одна з яких має електропровідність n-типу, а інша р-типу, називають електронно-дірковий, або р-n переходом.

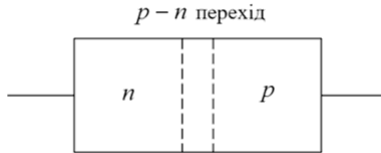


Рисунок 8

Внаслідок того, що концентрація електронів в n-області вище, ніж в р-області, а концентрація в р-області вище, ніж в n-області, на кордоні цих областей існує градієнт концентрації носіїв викликає дифузійний струм з n в р і з р в n.

Щільність дифузійного струму елементів і дірок визначається наступними виразами:

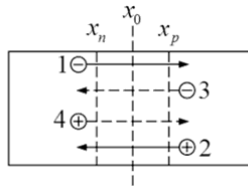


Рисунок 9

Крім основного струму існує ток і неосновних носіїв 3, 4.

Внаслідок суттєвої різниці в концентраціях основних і неосновних носіїв, ток обумовлений основними носіями заряду, буде переважати над струмом неосновних носіїв.

Якби електрони і дірки були нейтральними, то їх концентрація вирівнялася б по всьому об'єму кристала.

Насправді ж на кордоні розділу утворюються два шари протилежних за знаком зарядів. Область просторових зарядів є p-n перехід. Його ширина не перевищує десятих часток мікрометра. Просторові заряди в переході утворюють електричне поле спрямоване від позитивно заряджених іонів до негативно заряджених.

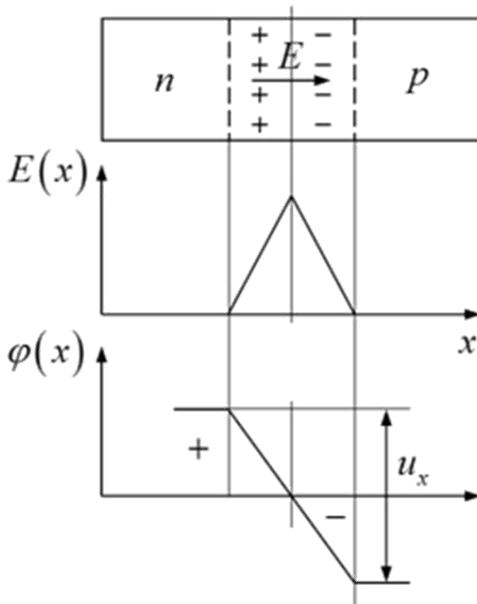


Рисунок 10

Це поле є гальмуючим для основних носіїв заряду і прискорює для неосновних.

Перехід потенціалу в переході дорівнює контактної різниці потенціалів U_x . Цей перепад обачним називають потенційним бартером, так як він перешкоджає переміщенню основних носіїв заряду.

Слід зазначити, що при кімнатній температурі в ізолюваному напівпровіднику щільність струму дорівнює нулю, тобто:

Властивості p-n переходу при наявності зовнішньої напруги

При порушенні електронно-діркового переходу зовнішнім електричним полем через нього починає протікати струм. Характер токопроходження і величина струму виявляються різними в залежності від полярності і прикладеної напруги.

Розглянемо 1^{ий} випадок, коли поле створюване напругою, направлено назустріч власному полю p-n переходу. Такі включення називають прямими.

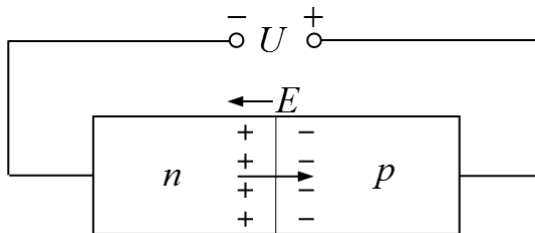


Рисунок 11

Під дією зовнішнього поля електрони і дірки будуть рухатися назустріч один одному. При такому русі в об'єднаному шарі n-p збільшується концентрація носіїв заряду, що призводить до зменшення потенційного бар'єру і опору перехідного шару.

Таким чином в ланцюзі встановиться струм. Незавжди помітити, що подолали потенційний бар'єр носії заряду потрапляють в область напівпровідника для якого вони є неосновними.

Цей процес називається інжекцією.

$$I = I_p + I_n$$

Сумарний струм у всіх точках напівпровідника залишається незмінним.

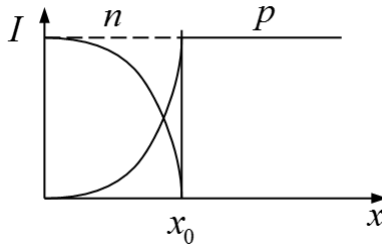


Рисунок 12

Змінивши полярність джерела живлення, ми тим самим збільшимо потенційний бар'єр за рахунок відтягування основних носіїв в глиб напівпровідника. Для неосновних носіїв потенційний бар'єр в переході відсутня і вони будуть втягуватися полем в область p-n переходу. Це явище називається екстракцією. При зворотному включенні переважну роль грає дрейфовий струм, який отримав назву зворотного струму.

Вольтамперна характеристика p-n переходу

Вольтамперная характеристика показує залежність струму від прикладеної напруги.

При збільшенні зворотної напруги відбувається пробій p-n переходу. Розрізняються два види пробію електричний (оборотний) і тепловий (необоротний).

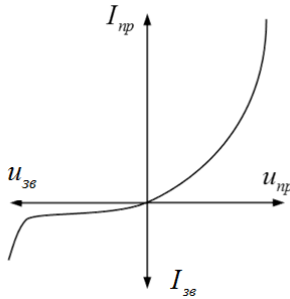


Рисунок 13

Електричний пробій відбувається в результаті внутрішньої електростатичної емісії і ударної іонізації атомів напівпровідника (лавинний пробій).

Тепловий пробій пов'язаний з видаленням електронів з ковалентних зв'язків за рахунок теплових коливань кристалічної решітки. Теплова генерація призводить до збільшення зворотного струму. Збільшення струму призводить до подальшого підвищення температури напівпровідника.

При надмірному нагріванні переходу відбувається зміна структури кристала і виходу його з ладу. Якщо ж при виникненні пробою струм через р-п перехід обмежений опором зовнішньому ланцюгу і потужність, що виділяє на переході, невелика, то пробій обернений. В цьому випадку можна управляти зворотним струмом шляхом зміни зовнішньої напруги.

Аналіз вольтамперної характеристики дозволяє розглядати перехід як нелінійний елемент.

Сутність електростатичної емісії полягає в тому, що під дією сильного електричного поля електрони можуть звільнитися з ковалентних зв'язків і подолати не потенційний бар'єр. Рухаючись з більшою швидкістю на ділянці р-п переходу, електрони зіштовхуються з нейтральними атомами і іонізують їх. В результаті чого з'являються нові вільні електрони і дірки.

Лекція № 2 Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковими діодами називаються прилади з одним електронно-дірковим переходом і двома виводами. Вони застосовуються для випрямлення змінного струму, детектування змінних коливань, стабілізації постійної напруги і т.д. За призначенням напівпровідникові діоди поділяються на випрямні, високочастотні, стабілітрони, тунельні, варікапи та ін.

У довідниках позначення діодів складається з 6 елементів:

Перший елемент (буква або цифра) позначає вихідний матеріал: г або 1- германій; к або 2 – кремній; А або 3- з'єднання Галія.

Другий елемент (буква) вказує тип напівпровідникового приладу;

Д - випрямні діоди; Ц - випрямні стовпи; А - надвисокочастотні діоди; С - стабілітрони; И - тунельні діоди; В - варікапи; Л - випромінюючі діоди; Г - генератори шуму; Б - діоди Ганна; К - стабілізатори струму.

Третій елемент - число, що визначає призначення і якісні властивості діода. У стабілітронів 3 елемент визначає індекс потужності.

Четвертий і п'ятий елемент - позначають порядковий номер розробки. У стабілітронів п'ятий і четвертий елементи позначають напругу стабілізації.

Шостий елемент (буквений) визначає різновид приладу технічним ознаками.

Приклади маркування:

ГД412А – діод германієвий; Д - випрямний; 4 - універсальний (з робочою частотою не більше 1000 мГц);

Номер розробки 12, група А.

АИ301А – діод тунельний; 3 - комутаційний для широкого застосування; номер розробки 01, група А.

АЛ302А – світлодіод; 3 - для широкого застосування з
яскравістю не більше 500 кд/м²; номер розробки 0,2, гр. А.
КС168А - кремнієвий стабілітрон; 1 - потужністю 0,3 Вт;
68 - напруга стабілізації 6,8 В; гр. розробки А.

Випрямні діоди умовне позначення

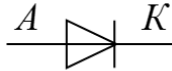


Рисунок 1

Випрямні діоди призначені для перетворення змінного струму в постійний (пульсуючий).

Як матеріал використовують кремній, германій.

Для поліпшення відводу тепла в діодах середньої і великої потужності до їх корпусу приварюють гвинт.

Основною характеристикою діода є вольт-амперна характеристика (ВАХ).

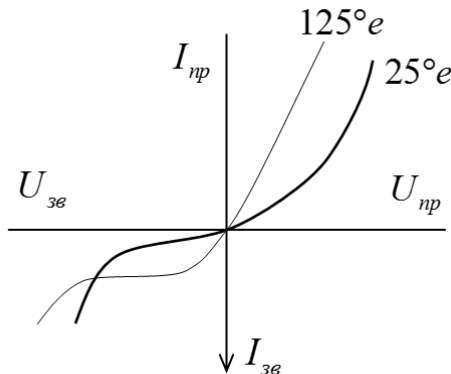


Рисунок 2

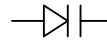
Основними параметрами є:

- постійна пряма напруга;
- максимальна додаткова зворотна напруга;
- постійний зворотний струм;
- середній випрямлений струм;
- максимальна додаткова потужність P_{\max} що розсіюється

діодом.

За максимально допустимим випрямленим значенням середнього струму діоди діляться на малопотужні

Варікапи. Умовне позначення варікапа.



Варікапами називають напівпровідникові діоди, дія яких заснована на використанні залежності ємності $p-n$ переходу від зворотної напруги.

Варікапи використовуються в якості елемента з електрично керованою ємністю.

У варікапах зміна зворотної напруги, прикладеної до $p-n$ переходу, призводить до зміни бар'єрної ємності між областями $p-n$.

Величина бар'єрної ємності діода C_b може бути визначена з формули

Характеристика варікапа має вид:

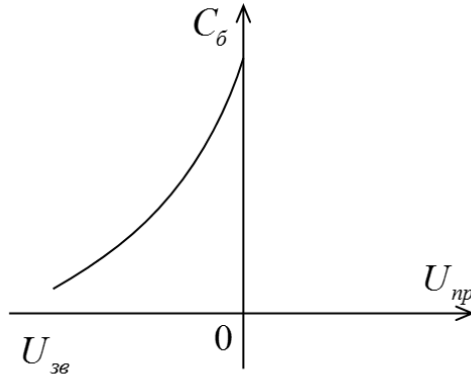
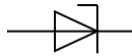


Рисунок 3

Основними параметрами варікапа є:

- номінальна ємність
- коефіцієнт перекриття ємності
- максимальна зворотна напруга

Напівпровідникові стабілітрони



Стабілітроном називається діод, напруга на якому зберігається з певною точністю при зміні в заданому діапазоні струму, що проходить через нього. Він призначений для стабілізації напруги в колах постійного струму.

ВАХ показана на малюнку.

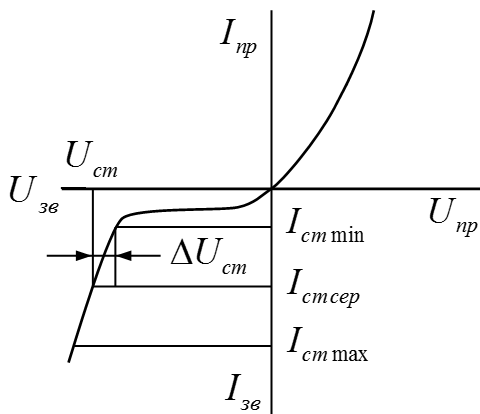


Рисунок 4

Робочим ділянкою стабілітрона є ділянка електричного оборотного пробою. При зміні струму, що протікає через стабілітрон, напруга на ньому мало відрізняється від значення

Принцип роботи стабілітрона полягає в тому, що при зміні U_{Bx} змінюється струм, що протікає через стабілітрон, а напруга на стабілітроні і підключеної паралельно до нього навантаженні R_n практично не змінюється.

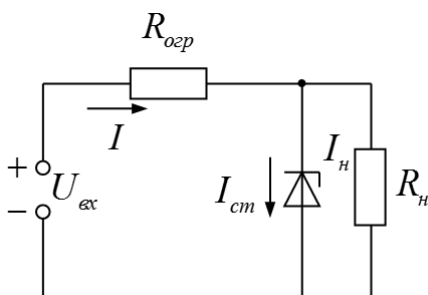
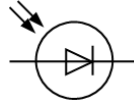


Рисунок 5

У сучасних стабілітронів напруга стабілізації лежить в межах від 1 до 1000 В при токах стабілізації від 1 мА до 2А.

Диференціальний опір $r_o = \frac{\Delta V_{cm}}{\Delta I_{cm}}$ на ділянці стабілізації

приблизно дорівнює 0,5 ... 200 Ом.



Фотодіоди. Умовне позначення

Фотодіоди представляють собою фотогоальванічний приймач випромінювання без внутрішнього підсилення, фоточутливий елемент якого містить структуру напівпровідникового діода.

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

Схема включення фотодіода показана на малюнку.

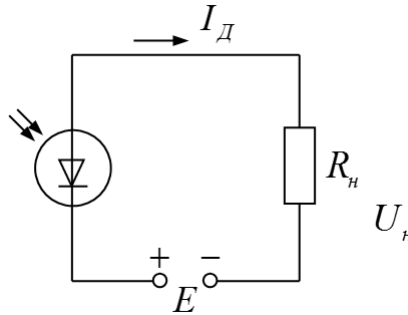


Рисунок 6

Напруга джерела живлення докладено до діода в зворотному напрямку. Коли фотодіод не освітлений, в ланцюзі протікає зворотний струм невеликої величини для германієвих і для кремнієвих. При висвітленні фотодіода з'являється додаткове число електронів і дірок, внаслідок чого збільшується перехід неосновних носіїв заряду через перехід. Це призводить до

збільшення струму в ланцюзі. Слід зазначити, що фотодіод можна включати і без зовнішнього джерела напруги. Режим роботи з зовнішнім джерелом називається фотодіодних, а без зовнішнього -вентильним. У вентильному режимі під дією світлового потоку виникає ЕРС, тому він не потребує стороннього джерела напруги.

Вольтамперная характеристика визначає залежність струму фотодіода від напруги на ньому при постійному світловому потоці (Рисунок 7).

При $\Phi = 0$ через діод протікає темновий ток.

Характерною особливістю робочої області характеристик є повна незалежність струму фотодіода від прикладеної напруги.

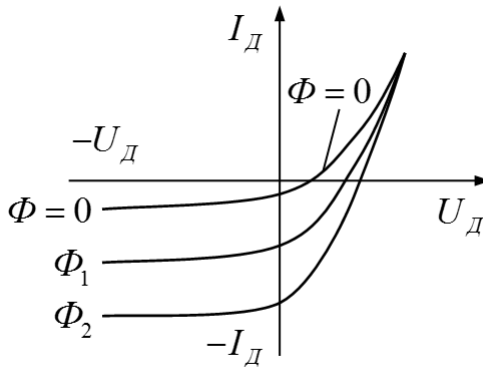


Рисунок 7

Світлова характеристика фотодіода в широкому діапазоні змін світлового потоку виявляється лінійною (Рисунок 8).

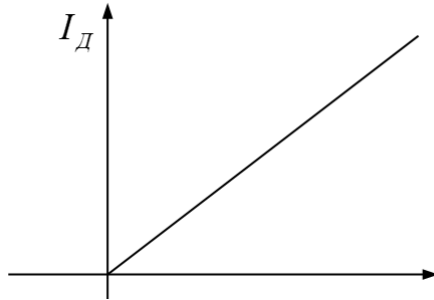


Рисунок 8

Спектральна характеристика показує залежність спектральної чутливості від довжини падаючого на фотодіод світла (Рисунок 9).

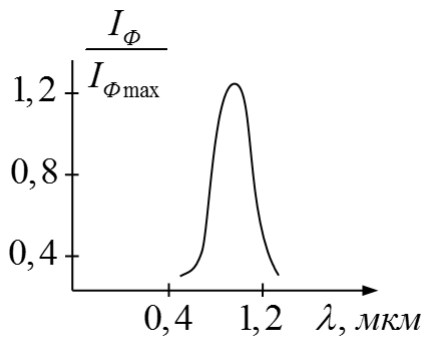


Рисунок 9

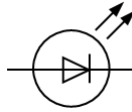
Параметри фотодіодів:

Інтегральна чутливість. Робоча напруга U_p - постійна напруга, при якому забезпечуються номінальні параметри фотодіода.

Темновий струм

Фотодіоди широко застосовуються в фотометрії, фотоколметрії, для контролю джерел світла, прозорості

середовища, реєстрації та рахунки ядерних частинок, автоматичного регулювання і контролю температури, в ЕОМ пристроях введення і виведення.



Світлодіоди.

Світлодіодом називають напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковий переходом, призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії в енергію некогерентного світлового випромінювання.

При подачі на перехід p - n прямого напруги спостерігається інтенсивна інжекція дірок в область n , а електронів в область p . При зустрічі електрона і дірки їх заряди компенсуються і дані носії зникають. У багатьох напівпровідників при рекомбінації відбувається виділення тепла, яке віддається кристалічній решітці. Однак у напівпровідників, виконаних на основі карбиду кремнію (SiC), галію (Ga), миш'яку (As) рекомбінація є випромінювальною у вигляді квантів світла-фотонів. Залежно від ширини забороненої зони напівпровідника і особливостей рекомбінації носіїв заряду випромінювання може лежати в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах спектра.

Найбільшого поширення набули діоди, що випромінюють жовтий, червоний і зелений світло.

Параметрами світлодіодів є:

Яскравість світіння діодів V (кд/м²) при тах прямому струмі;

Постійна пряма напруга при тах допустимому струмі;



Тунельні діоди.

Тунельні діоди відрізняються малим питомим опором p і n областей (вміст домішок до $10^{21}/\text{см}^3$).

Як матеріал використовуються германій, арсенід і антимонід галію.

У тунельних діодах використовуються тунельний механізм переносу носіїв заряду через $p-n$ перехід і в характеристиці діода є область з негативним опором.

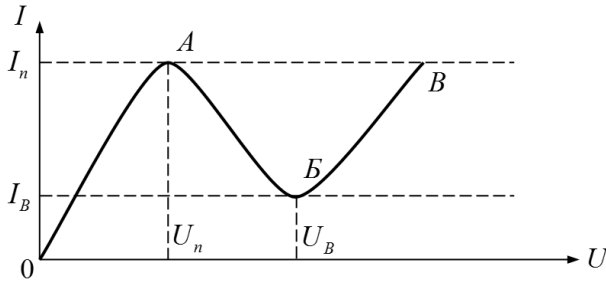


Рисунок 10

За призначенням поділяються на генераторні, перемикаючі, підсилювальні.

Лекція № 3

Пристрій біполярного транзистора

Транзистором називається напівпровідниковий прилад, який має не менше трьох виводів, придатний для підсилення потужності.

Найбільш поширеними є транзистори, що мають носії заряду обох полярностей. Такі транзистори називаються біполярними.

Особливу групу займають польові транзистори, (канальні, уніполярні). Особливу специфічну групу, в сучасній електронній апаратурі, утворюють фототранзистори.

До групи транзисторів слід віднести тиристори і диністори.

Основним елементом біполярного транзистора є кристал германію та кремнію, в якому створені три області різних провідностей.

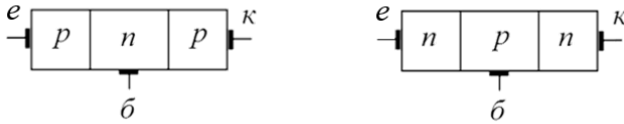


Рисунок 1

Розрізняють транзистори 2-х типів р-п-р і п-р-п. Фізичні процеси, що протікають в транзисторах обох типів однакові. Середня область називається базою, вкрай емітером і колектором.

Умовне позначення транзисторів

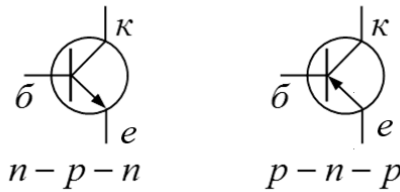


Рисунок 2

Принцип роботи транзистора

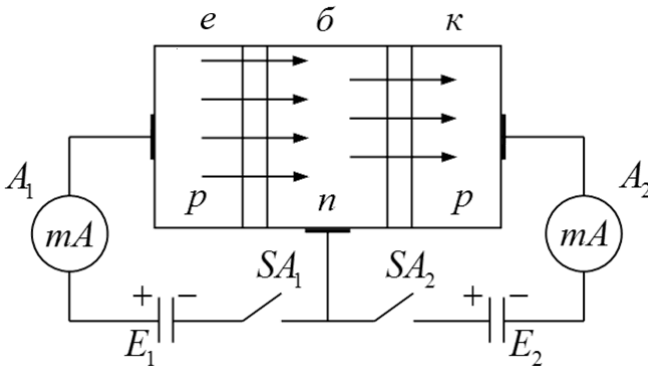


Рисунок 3.

З малюнка видно, що транзистор являє по суті два напівпровідникових діода. При замиканні ключа SA₁ і розімкнутому SA₂ до емітерного переходу підключається джерело E₁ в прямому (пропускну) напрямку, а при замиканні ключа SA₂ до колекторного переходу підключається джерело E₂ в зворотному напрямку зазвичай E₂ >> E₁.

При підключенні джерел E₁ і E₂ змінюються потенційні бар'єри р-п переходів. Потенційний бар'єр емітера знижується, а колекторного підвищується. Струм, що проходить через емітер отримав назву I_e.

Оскільки концентрація носіїв заряду в базі менше ніж в емітер, то неосновні носії зарядів в базі повністю дійдуть до колектора.

Ефективність емітера оцінюється коефіцієнтом інжекції.

$$\gamma = \frac{I_{\text{эп}}}{I_{\text{э}}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{эн}}}{I_{\text{эп}}}} \approx 0,999$$

Підійшовши до колектора, дірки починають відчувати дію електричного поля колекторного переходу.

В результаті екстракції дірки швидко втягуються в колектор, створюючи струм колектора.

Приймаючи до уваги малу степінь рекомбінації дірок з електронами бази, можна вважати, що $I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}$.

Ті дірки, які все ж таки рекомбінують з електронами, створюють струм бази, тому $I_{\text{б}} = I_{\text{э}} - I_{\text{к}}$.

На підсилюючі властивості тр-ра впливає рекомбінація носіїв в базі, яка визначається через коефіцієнт передачі носіїв в базі

$$\delta = \frac{I_{KP}}{I_{ЭP}};$$

Одним із основних параметрів тр-ра є коефіцієнт передачі струму емітера

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э};$$

$$\alpha = \gamma \cdot \delta;$$

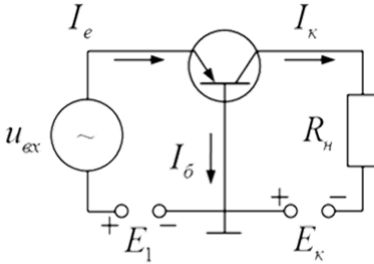
Слід уточнити, що повний струм колектора дорівнює $I_K = \alpha I_Э + I_{KBO}$ так як:

$$\underline{I_{KBO} \approx \alpha I_{ЭТО}}; \quad \underline{I_K \approx \alpha I_Э}.$$

Схеми включення транзисторів

Розрізняють три можливі схеми включення транзисторів: СБ; СЕ; СК.

Це залежить від того, який з електродів є загальним для входу і виходу.

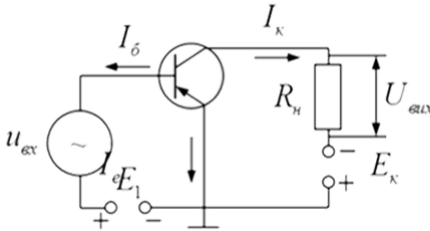


$$I_{\kappa} = I_E - I_B$$

$$I_{BX} = I_E$$

$$I_{ВИХ} = I_{\kappa}$$

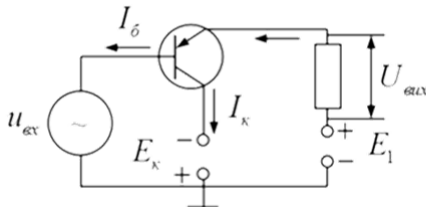
Рисунок 4



$$I_{BX} = I_B$$

$$I_{ВИХ} = I_{\kappa}$$

Рисунок 5



$$I_{BX} = I_B$$

$$I_{ВИХ} = I_E$$

Рисунок 6

Незалежно від схеми включення транзистори характеризуються диференціальним коефіцієнтом прямої передачі струму.

Для СБ $\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}}}$ при

$$E_K = const, R_{BBLX} = \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta I_{BX}} = \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta I_{\mathcal{E}}} \approx r_{\mathcal{E}}$$

Основною особливістю схеми з СЕ є великий коефіцієнт передачі по струму

$$\beta = \frac{\Delta I_{BBLX}}{\Delta I_{BX}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B};$$

або

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}} - I_K} = \frac{\alpha}{1 - \alpha};$$

враховуючи, що $\alpha \approx 0,98$, то $\beta = 45$; тобто в схемі з ЗЕ можна отримати коефіцієнт прямої передачі струму декількох десятків. Вхідний опір схеми з ЗЕ значно більший схеми з ЗБ. Перевага схеми в тому, що її можна живити від одного джерела напруги.

Слід відмітити, що температурна стабільність схеми з ЗБ краща схеми з СЕ.

Для схеми з СК

$$\frac{\Delta I_{\mathcal{E}}}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_K + \Delta I_B}{\Delta I_B} = \beta + 1$$

Не дивлячись на великий коефіцієнт передачі по струму, схема не забезпечує підсилення по напрузі.

Основними показниками транзисторного підсилувального каскаду є:

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}; \quad K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}; \quad K_P = K_I \cdot K_U; \quad R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}.$$

Для схеми з загальним емітером:

$$K_{I\Omega} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta; \quad K_{U\Omega} = \frac{\Delta I_K \cdot R_H}{\Delta I_B \cdot R_{\text{ВХ}}} = \beta \frac{R_H}{R_{\text{ВХ}}}; \quad K_P = \beta^2 \frac{R_H}{R_{\text{ВХ}}}.$$

Низький вхідний опір схеми з СБ (одиниці, десятки Ом) є істотним недоліком, тому що в міжкаскадних з'єднаннях знижує підсилення по напрузі і потужності.

Основною особливістю схеми з СЕ є великий коефіцієнт передачі по струму, враховуючи що то тобто в схемі з СЕ можна отримати коефіцієнт прямої передачі струму кілька десятків. Вхідний опір схеми з СЕ значно більше схеми з СБ. Перевагою схеми є те, що її можна живити від одного джерела напруги.

Реальні властивості транзисторів можна визначати за допомогою схем заміщення. Широке поширення отримали Т-образні схеми.

Рисунок 5

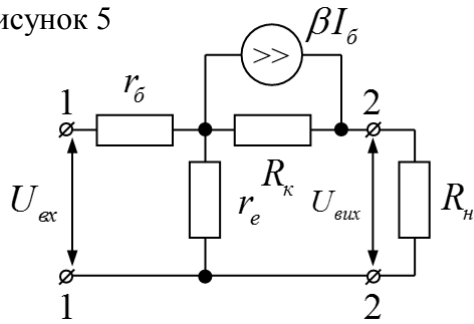


Рисунок 7. Схема с СЕ

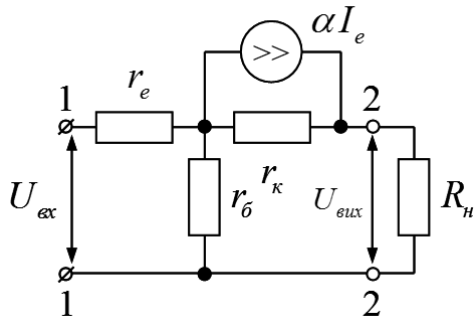


Рисунок 8. Схема з СБ

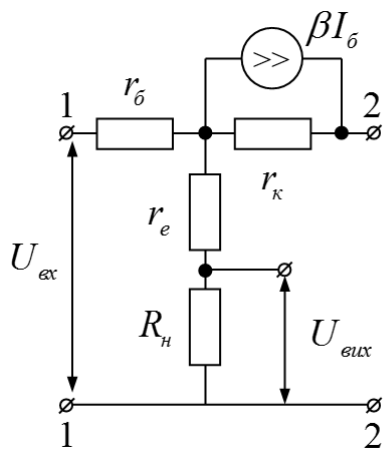


Рисунок 9. Схема з СК

Для схеми з ЗБ $I_B = I_{\text{Э}} - I_K$,

$$R_{\text{ВХ Б}} = \frac{U_{\text{ВХ Б}}}{I_{\text{ВХ Б}}} = \frac{I_{\text{Э}}r_{\text{Э}} + I_B r_B}{I_{\text{Э}}} = r_{\text{Э}} + (1 - \alpha)r_B;$$

Для схеми з ЗЕ $R_{\text{ВХ Э}} = \frac{I_B r_B + I_{\text{Э}}r_{\text{Э}}}{I_B} = (\beta + 1)r_{\text{Э}} + r_B;$

Для схеми з ЗК

$$R_{\text{ВХ К}} = \frac{I_B r_B + I_{\text{Э}}(r_{\text{Э}} + R_H)}{I_B} = r_B + (\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_H).$$

Таблиця 1.

Орієнтовні показники схем включення тр-ів.

Тип схеми	Підсилення			Вхідний опір Ом
	K_I	K_U	K_P	
СБ	1	до 1000	до 1000	Одиниці - десятки
СЕ	10-100	до 100	до 1000	Сотні
СК	10-100	1	до 100	Десятки тисяч

Транзистор як активний чотириполюсник

При роботі транзистора в підсилювальному режимі його властивості визначаються малосигнальними параметрами для яких транзистор можна вважати лінійним елементом. На практиці найбільше застосування отримали малосигнальні гібридні h - параметри.

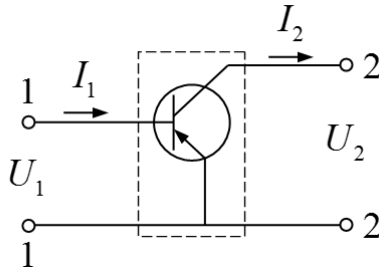


Рисунок 10.

Для будь-якої схеми вкл. тр-ра можна записати:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{aligned} \right\}$$

Коефіцієнти $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ - називають h - параметрами. Кожен параметр має певний фізичний зміст.

Параметр h_{11} є вхідний опір (при $U_2 = 0$).

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{при} \quad U_2 = 0$$

Параметр h_{12} визначає ступінь впливу вихідної напруги на режим вхідного кола і називається коефіцієнтом зворотного зв'язку.

$$\alpha \quad h_{12} = \frac{U_1}{U_2} \quad \text{при} \quad I_1 = 0$$

Параметр β , $h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ при $U_2 = 0$ - називається

коефіцієнтом підсилення по струму.

Параметр $h_{22} = \frac{I_2}{U_2}$ при $I_1 = 0$ - називається вихідною

провідністю.

Між h - параметрами і параметрами Т-образної схеми заміщення існує певна залежність.

Статичні характеристики біполярного транзистора

Статистичні характеристики тр-ра відображають залежність між струмами і напругами на його вході і виході.

Для схеми з СЕ статистичною вхідною характеристикою є графік $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = const$.

Графік $I_K = \varphi(U_{КЭ})$ при $I_B = const$ називається статичною вхідною характеристикою.

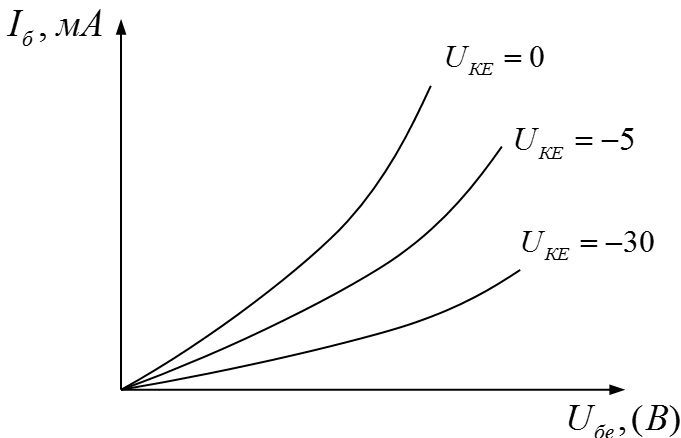


Рисунок 11. Вхідна характеристика біполярного транзистора, СЕ.

З малюнка видно, що з ростом напруги, струм I_B зменшується. Це пов'язано з тим, що при великій напрузі дірки не встигають рекомбінувати в базі.

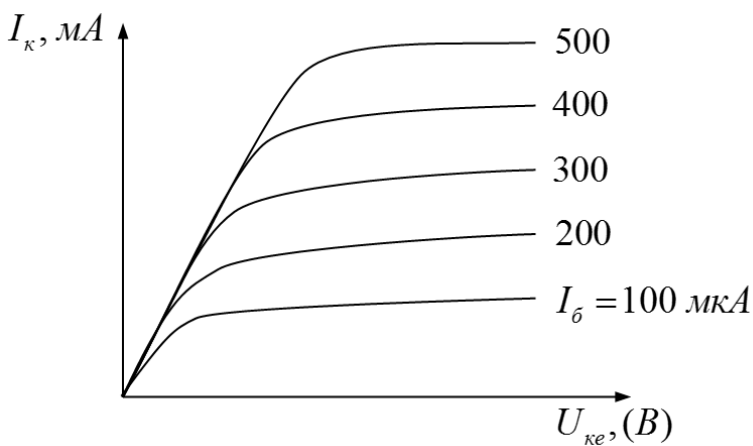


Рисунок 12. Вихідна характеристика біполярного транзистора, СЕ.

Різка крутизна струму залежить від того, що до колекторного переходу прикладається напруга $U_{ке}-U_{б\bar{e}}$.

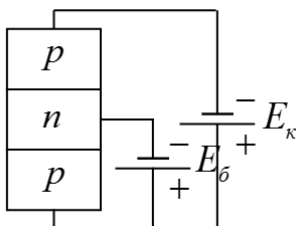


Рисунок 13. Функціональна схема транзистора типу р-п-р з джерелами живлення.

Експлуатаційні параметри транзистора

Для транзистора існує ряд експлуатаційних параметрів, граничні значення яких наводяться в довіднику.

До числа таких параметрів відносяться:

1) Максимально допустима потужність, що розсіюється колектором.

У загальному випадку потужність, розсіювання транзистором, складається з потужностей, що розсіюються кожним р-п переходом.

$$P = P_K + P_{\text{э}} + I_K U_{K\text{э}} + I_{\text{э}} U_{\text{эБ}} \quad \text{оскільки} \quad I_{\text{э}} U_{\text{эБ}} \ll I_K$$

то $P = P_K$.

Необхідно стежити, щоб $P_K \ll P_{K \text{ max доп.}}$

2) Максимально допустимий струм колектора $I_{K \text{ max}}$ обмежується максимально допустимою потужністю, що розсіюється колектором. Перевищення струму колектора призводить до теплового пробою.

3) Максимально допустима напруга U_m - напруга що визначається величиною пробивної напруги р-п переходу.

З міркувань надійності роботи схеми не рекомендується використовувати величини струмів, напруг і потужностей вище 70 % їх найбільших допустимих значень.

4) Гранична частота підсилення по струму $f_{\text{гп}}$ (або - частота при якій коефіцієнт підсилення по струму зменшується до 0,7 (в раз) свого значення на низьких частотах.

Лекція № 4

Польові транзистори

Польовим транзистором називається трьохелектродний напівпровідниковий прилад, в якому струм створюють основні носії заряду під дією поздовжнього електричного поля, а управління величиною струму здійснюється поперечним електричним полем, що створюється напругою, прикладеною до керуючого електрода.

За конструктивними особливостями ПТ діляться:

- 1) На каналні (з р-п переходами);
- 2) З ізольованим затвором (МДН (JFET) або МОН (MOSFET)).

Умовні позначення каналних транзисторів.

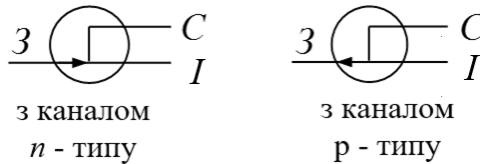


Рисунок 1

Конструктивно польовий-каналний транзистор виконаний у вигляді тонкого шару напівпровідника типу n або p, який обмежений з двох сторін електронно-дірковими переходами.

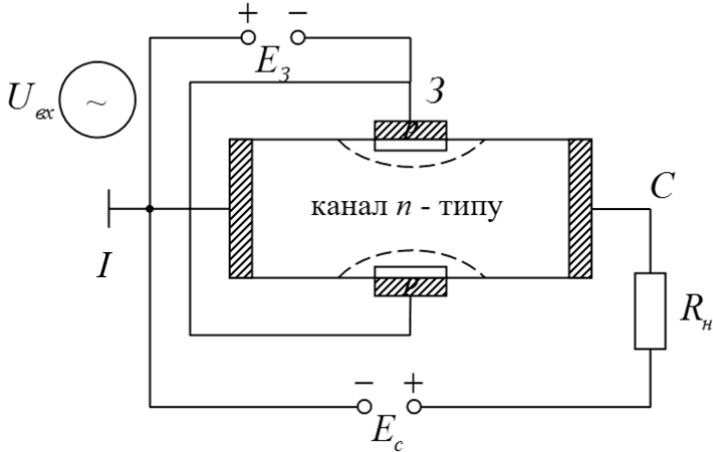


Рисунок 2

Включення в електричний ланцюг здійснюється за допомогою двох електродів В і С.

Висновок приєднаний до областей Р називається затвором (3).

Висновки В, С, 3, відповідають Е, К, Б, в біполярних транзисторах.

Величина струму в каналі залежить від напруги навантажувального опору, і опору напівпровідникової пластини.

Польові транзистори МОН або МДН мають структуру: метал - діелектрик (окисел) - напівпровідник. Принцип роботи заснований на ефекті поля в поверхневому шарі напівпровідника.

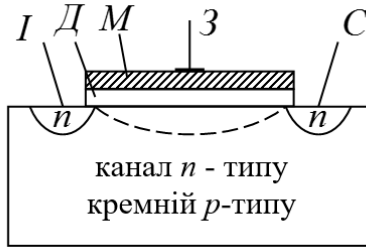


Рисунок 3.

Основою приладу служить пластина (підкладка) монокристалічного кремнію р-типу. Области стоку і витoku є ділянками кремнію, сильно леговані домішкою типу -п. Затвором служить металева пластина, ізольована від каналу шаром діелектрика 0,1 мкм. (Можна використовувати і плівку двоокису кремнію).

Залежно від полярності напруги на затворі канал може збіднюватися або збагачуватися носіями зарядів. Позитивне напруга на затворі сприяє втягуванню електронів з підкладки в канал. На відміну від каналного транзистора МДН і МОН можуть працювати при позитивному і негативному напрузі на затворі.

Умовні позначення тр-рів МДН і МОН

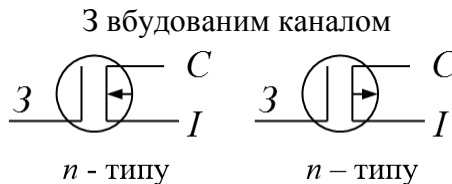


Рисунок 4

З індивідуальним каналом

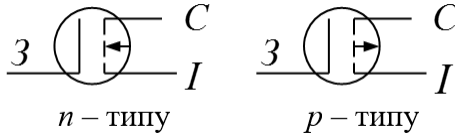


Рисунок 5

Схеми включення польових транзисторів

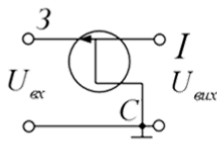


Схема із загальним
стоком

Рисунок 6

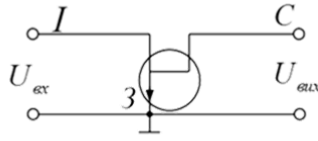


Схема із загальним
затвором

Рисунок 7

Статистичні характеристики польових транзисторів

Розрізняють вихідні (стокові) вольтамперні характеристики польових транзисторів:

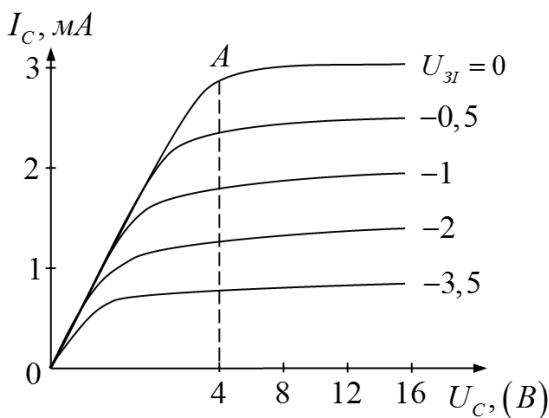


Рисунок 8

При U_{BE} струм I_C росте майже лінійно. Однак зі зростанням струму I_C збільшується падіння напруги на каналі, підвищується зворотне зміщення для р-п переходів, що веде до звуження каналу і уповільнює зростання струму I_C , при якому відбувається насичення зв. напруги $V_{C\text{нас}}$.

Залежність $I_C = \varphi(U_{BE})$ при $U_C = \text{const}$ отримала назву стокзатворної характеристики.

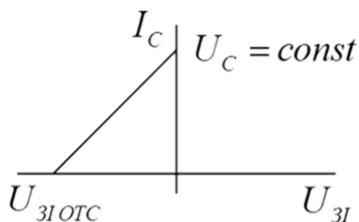


Рисунок 9

Основні параметри польових транзисторів

Основними параметрами польових транзисторів є:

- 1) Крутизна характеристики.
- 2) Диференціальний опір
- 3) Статистичний коефіцієнт підсилення
- 4) Вхідний опір

Чотирьохшарові напівпровідникові прилади (тиристри)

Тиристри відносяться до класу 4х шарових напівпровідникових приладів складаються з чотирьох послідовно чергуються областей з провідністю р і n-типу.

Доданий тиристор - має вивод від двох крайніх областей

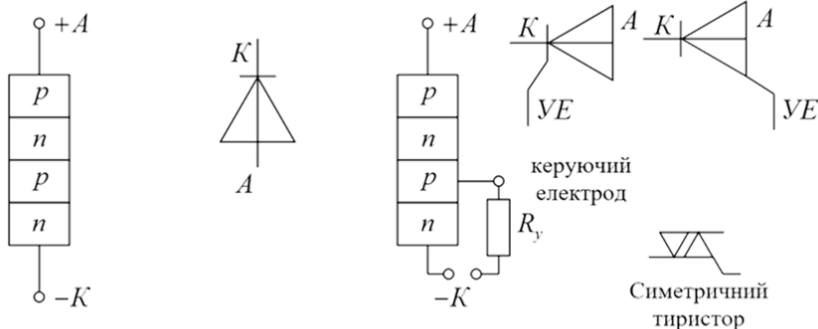


Рисунок 10

Триодний тиристор на відміну від динистора має ще і керуючий електрод.

У цих структурах крайні електронно-діркові переходи називаються емітерами, середній перехід - колекторним. Внутрішні області n-р називаються базами. Електрод пов'язаний

із зовнішнім р-областю називається анодом, а з n-областю катодом. Зі схеми включення динистора видно, що колекторний перехід замкнений зворотною напругою джерела E.

Типова вольт-амперна характеристика динистора приведена на малюнку.

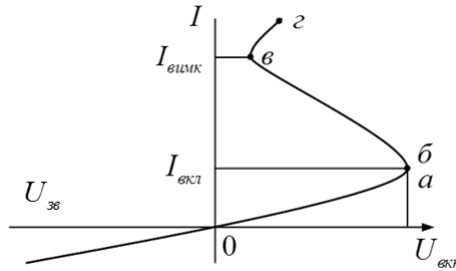


Рисунок 11

Для області Оа характерно те, що значне зростання напруги супроводжується малим зростанням струму.

Область аб - область лавинного пробою. Ділянка бв - область негативного опору, на якому зростання струму супроводжується зменшенням напруги.

Динистор характеризується 2 стійкими станами (Оа і ВГ) наявність яких дозволяє використовувати прилад в якості потужного переключального елемента в різних пристроях автоматики.

Для аналізу роботи тиристорів представимо його у вигляді двох транзисторів.

Причому:

$$I_{B1} = I_{K2}$$

$$I_{B2} = I_{K1}$$

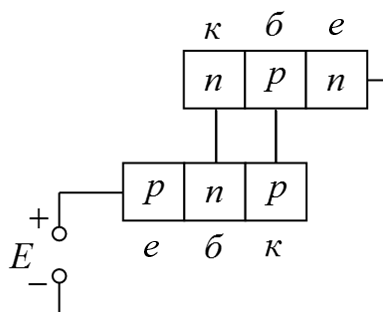


Рисунок 12

При збільшенні $E.P.C.$ джерела інжектівани одним з емітерів основні носії зарядів перетинають область, де вони не є основними частково рекомбінуючи в ній.

Нерекомбініровавшієся носії проходять через колекторний перехід і, опинившись в області, для якої вони є основними тобто в шарі бази сполученого транзистора, знижують висоту потенційного бар'єру, сприяючи інжектування зарядів з другого емітера, що веде до збільшення загального струму приладу.

Перехід структури р-п-р-п з непровідного стану в провідний можна викликати не тільки зовнішнім напругою, а й збільшенням напруги в одному з еквівалентних транзисторів. Для цього в тиристорі від однієї з баз роблять висновок (керуючий електрод). Змінюючи струм керуючого електрода можна регулювати напругу перемикавання, а отже управляти роботою приладу.

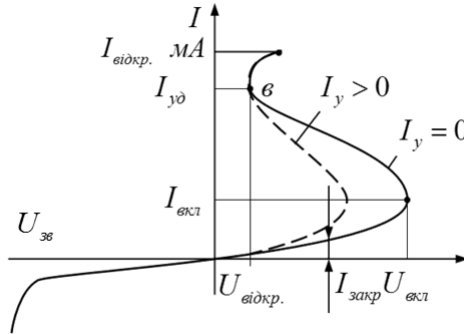


Рисунок 13

Основні параметри:

- 1) Напруга вкл. $U_{ВКЛ}$ - напруга при якому струм через прилад починає різко зростати.
- 2) Струм включення - струм при додатку напруги включення.
- 3) Утримує струм - мінімальний струм необхідний для удержання тиристора в відкритому стані.
- 4) Напр. у відкритому стані.
- 5) Струм в закритому стані.
- 6) Пост. відмикаючи. Струм U_E - мінімальний струму U_E , який по рекл. тиристор.

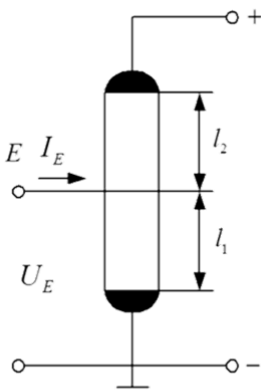


Рисунок 14

Одноперехідний транзистор (двухбазовий діод).

Одноперехідний транзистор являє собою монокристалічну пластинку кремнію n-типу з високим значенням питомого опору, на кінці якої розташовані омичні контакти Б1 і Б2, а на бічній стороні - один емітерний перехід (Рисунок 14).

Ділянки кристала довжиною виконують роль бази.

Емітерний контакт пов'язаний із зовнішнім виводом емітера Е.

Схема включення одноперехідного транзистора показана на Рисунок 2. До висновків баз Б1 і Б2 підключають напруга живлення $U_{Б1 Б2}$, причому Б2 має позитивний потенціал щодо Б1. Під дією цієї напруги в кремінній платівці виникає струм $I_{Б1 Б2}$.

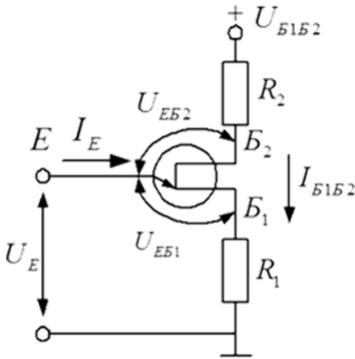


Рисунок 15

Ділянка між базами Б1 і Б2 одноперехідного транзистора являє собою омичний опір в кілька кОм з лінійної вольт амперної характеристикою. Тому напруга $U_{Б1 Б2}$ розподіляється по базах пропорційно їх опорам. Ці напруги відповідно рівні $U_{ЕБ1}$ і $U_{ЕБ2}$. Полярність напруги $U_{Б1}$ така, що в початковому стані емітерний р-п перехід буде зміщений у зворотному напрямку і через нього пройде тільки невеликий

зворотний струм $I_{ЕБ0}$.

Під дією напруги $U_{Б1 Б2}$ дірки будуть рухатися до висновку Б1, утворюючи емітерний струм, що призведе до збільшення провідності на ділянці. В результаті внутрішнє напруження $U_{Б1}$ зменшиться, що приведе до подальшого зростання I_E . Цей процес буде протікати лавиноподібно. З ростом емітерного струму, опір емітерного переходу знижується, а напруга U_E зменшується.

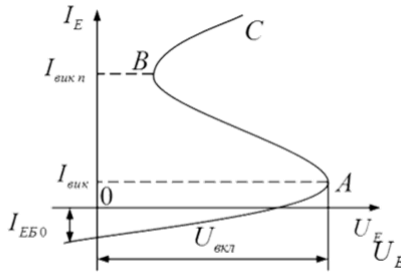


Рисунок 16

Завдяки простоті конструкції, стабільному напрузі спрацьовування, малому споживанню струму в ланцюзі управління хорошою повторюваності параметрів від зразка до зразка, можливості передачі потужних імпульсів, одноперехідні транзистори з успіхом використовують в різноманітних імпульсних схемах.

Фототранзистори

Фототранзистор є фото гальванічний приймач випромінювання, фоточутливий елемент якого містить структуру транзистора, що забезпечує внутрішнє підсилення. Конструктивно фото транзистор виконаний так, щоб світловий потік впливав на базову область. Зазвичай фото транзистор включається за схемою з загальним емітером і при відсутності освітлення через нього протікає темновий струм $I_{КЕ0}$. При освітлення бази в ній відбувається генерація додаткових пар електрон-дірка. Дірки будучи неосновними носіями зарядів в базі дифундують до колекторного переходу і втягуються полем в колектор, утворюючи першу складову фототоку $I_{\phi 1}$.

Лекція № 5

Електронні підсилювачі

Електронним підсилювачем називають пристрій, що забезпечує збільшення потужності електричних сигналів, що надходять на його вхід.

Збільшення потужності сигналу в підсилювачі відбувається за рахунок перетворення енергії джерела живлення. Це перетворення відбувається за допомогою активних елементів, які управляються вхідними сигналами. Коло ланцюг, яке називається вхідним або входом підсилювача.

Електричне коло, в якому утворюється підсилений сигнал, називається вихідним колом. Для виділення підсиленого сигналу в вихідний ланцюг включається навантаження.

Навантаженням може служити резистор, коливальний контур, обмотка трансформатора.

Навантаження, по якому протікає постійна складова вихідного струму, називається навантаженням по постійному струму.

Опір кола, по якому протікає змінна складова вихідного струму, утворює навантаження по змінному струмі.

Для поділу навантажень по змінному і постійному струмі застосовуються розділові конденсатори і тр-ри.

Найпростіший підсилювач містить один активний елемент з приєднаним до нього пасивними елементами.

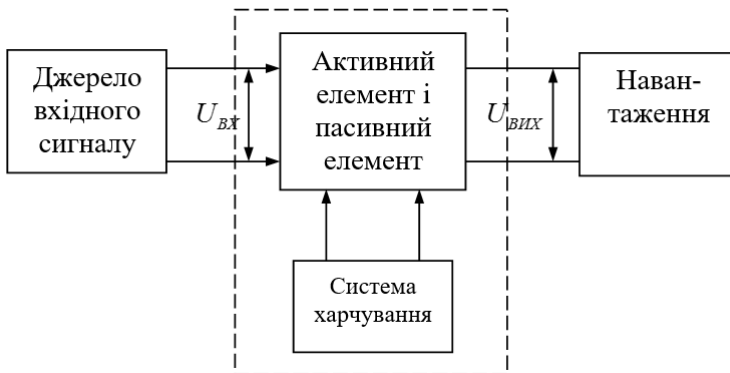


Рисунок 1

Класифікація підсилювачів

Класифікація підсилювачів може бути проведена за кількома ознаками.

1. Характер підсилювальних сигналів:
гармонійних сигналів, імпульсних, підсилювачі постійного струму;
2. По ряду підсилювальних елементів:
транзисторні, лампові, діодні;
3. За родом підсилюваної величини:
підсилювачі I, U, P.
4. За кількістю каскадів:
одно і багатокаскадні;
5. За діапазоном частот електричних сигналів, в межах яких підсилювач може задовільно працювати.
6. По виду зв'язків підсилювача з джерелами вхідного сигналу і навантаженням, а також між окремими каскадами в багатокаскадних підсилювачах:
 - реостатно-ємнісні;
 - трансформаторні;
 - з гальванічним зв'язками.

1. Підсилювачі низької частоти (ПНЧ):

Призначені для підсилення безперервних періодичних сигналів, частотний спектр яких лежить в межах від одиниць Гц до 10 кГц.

Характерною особливістю ПНЧ є відношення $\frac{f_B}{f_H}$

підсилюючих частот, що становить від 10 до 10 тисяч.

2. Підсилювачі постійного струму (ППС):

Підсилювачі повільно змінюючихся напруг і струмів, що підсилюють сигнали в діапазоні частот від ($f_H = 0$) до вищої робочої частоти f_B , складової нерідко десятки і сотні кілогерц.

3. Вибіркові (або селективні) підсилювачі, що підсилюють сигнали в дуже вузькій смузі частот.

Для них характерна невелика величина відношення верхньої частоти до нижньої (зазвичай $\frac{f_B}{f_H} < 1,1$).

Вони використовуються як на низьких так і на високих частотах і використовуються в якості частотних виборчих фільтрів.

4. Широкопasmові або імпульсні підсилювачі. Застосовуються для підсилення сигналів в широкій смузі частот (від декількох кілогерц і нижче та до декількох мегагерц і вище).

Основні технічні показники та характеристики підсилювачів

Найважливішими технічними показниками підсилювача є:

1. Коефіцієнти підсилення (по I, U і P);
3. Вхідний і вихідний опори;
4. Вихідна потужність;
5. Коефіцієнт корисної дії;
6. Діапазон підсилюються частот;

7. Динамічний діапазон амплітуд;
8. Нелінійні, частотні і фазові спотворення.

Коефіцієнти підсилення

Коефіцієнтом підсилення називається величина, що показує, у скільки разів сигнал на виході підсилювача більше, ніж на його вході.

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} ; K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}} ; K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}$$

В багатокаскадному підсилювачі

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \dots K_n,$$

де n - кількість каскадів підсилення.

В електроніці отримав розповсюджений спосіб вираження підсилювальних властивостей в логарифмічних одиницях – децибелах (ДБ).

$$K_{ДБ} = 201g \frac{U_{ВВЛX}}{U_{ВX}} = 201gKu ;$$

$$K_{РДБ} = 101g \frac{P_{ВВЛX}}{P_{ВX}} = 201gKu$$

Вхідний і вихідний опору

Вхідний опір являє собою опір між вхідними затискачами підсилювача.

$$\text{Він дорівнює } R_{ВX} = \frac{U_{ВX}}{I_{ВX}} ;$$

Вихідний опір $R_{ВІХ}$ визначають між вихідними затискачами підсилювача $R_{ВІХ} = \frac{U_{ВІХ}}{I_{ВІХ} = I_H}$.

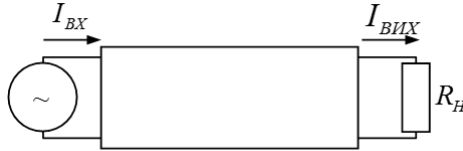


Рисунок 2

Вихідна потужність

Вихідна потужність – це корисна потужність, що розвивається підсилювачем в навантаженні.

При активній характеристиці навантаження потужність дорівнює:

$$P_{ВІХ} = \frac{U_{ВІХ}^2}{R_H} = \frac{U_{mВІХ}^2}{2R_H}$$

Коефіцієнт корисної дії

К.К.Д. є відношення корисної потужності в навантаженні до потужності споживаної від всіх джерел живлення.

$$\eta = \frac{P_H}{P_{дж}}$$

Діапазон підсилюваних частот

Діапазоном підсилюються частот, або смугою пропускання підсилювача, називається та область частот, в якій коефіцієнт підсилення змінюється не більше ніж це допустимо за технічними умовами.

Динамічний діапазон амплітуд

Графічна залежність вихідної напруги підсилювача від його вхідної напруги на деякій незмінній частоті сигналу отримала назву амплітудної характеристики.

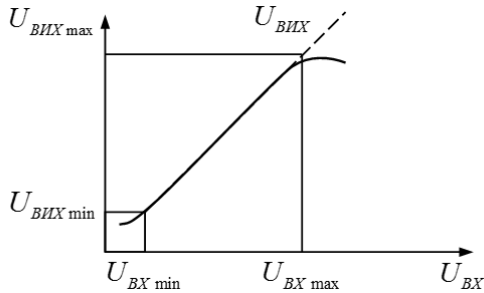


Рисунок 3

Ставлення амплітуд найбільш сильного і найбільш слабого сигналів на вході підсилювача називають динамічним діапазоном амплітуд D .

$$D_{дБ} = 20 \lg \frac{U_{ВХ \max}}{U_{ВХ \min}} .$$

Нелінійні спотворення в підсилювачах

Нелінійні спотворення представляють собою зміну форми кривої підсилюються коливань, що викликається нелінійними властивостями ланцюга, через яку ці коливання проходять.

Ступінь нелінійних спотворень оцінюється коефіцієнтом нелінійних спотворень або коефіцієнтом гармонік.

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}}$$

$P_2 + P_3 + \dots + P_n$ - сума електричних потужностей, що виділяються на навантаженні гармоніками.

Для многокаскадного підсилювача

$$K_{\Gamma_{\text{ОБЩ}}} = K_{\Gamma_1} + K_{\Gamma_2} + K_{\Gamma_3} + \dots K_{\Gamma_n}$$

В підсилювачах контр.-виміральної апаратури K_{Γ} становить десяті частки відсотка.

Частотні спотворення

Частотними називаються спотворення, обумовлені зміною величини коефіцієнта підсилення на різних частотах.

Частотні спотворення, що вносяться підсилювачем, оцінюють по його амплітудно-частотній характеристиці, що представляє залежність коефіцієнта підсилення від частоти.

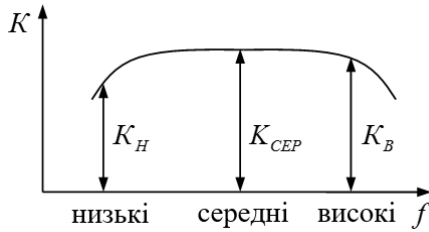


Рисунок 4

Ступінь спотворень на окремих частотах висловлюють коефіцієнтом частотних спотворень M , рівним відношенню:

Зазвичай найбільші спотворення виникають на кордонах діапазону частот

$$f_B \text{ і } f_H.$$

Коефіцієнт частотних спотворень многокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнта частотних спотворень окремих каскадів

$$M = M_1 \cdot M_2 \dots M_n.$$

Для контрольних вимір. апаратури коефіцієнт частотних спотворень повинен становити десятки і навіть соті частки ДБ.

Частотні спотворення завжди супроводжуються фазовими спотвореннями.

Фазові спотворення

Фазові спотворення оцінюються по фазочастотній характеристиці, що представляє графік залежності кута зсуву

фаз φ між вхідною і вихідною напругами підсилювача від частоти.

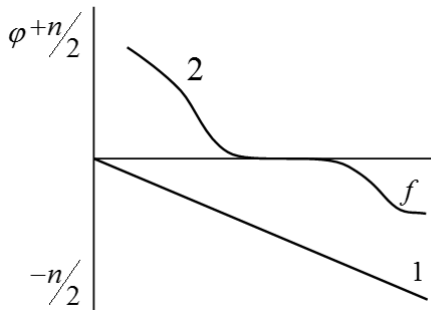


Рисунок 5

Реальна ф.ч.х. (крива 2) відрізняється від ідеальної (крива 1). Це означає, що різні спектральні складові вхідного сигналу затримуються підсилювачем на різний час.

Зворотній зв'язок в електронних підсилювачах

Зворотним зв'язком називається такий електричний зв'язок між каскадами підсилювача, при якому частина енергії підсиленого сигналу з виходу підсилювача подається на його вхід.

Ланцюг, по якому здійснюється така передача енергії, називається ланцюгом ЗЗ.

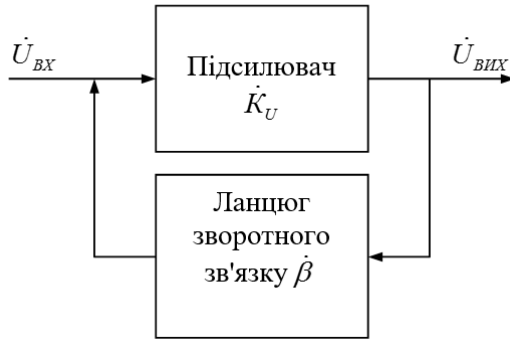


Рисунок 6

K_U - коефіцієнт підсилення підсилювача;

β - коефіцієнт передачі ланцюга ЗЗ.

Якщо електричні коливання з вихідного ланцюга надходять до вхідного в фазі з електричними коливаннями вхідного сигналу, то це - позитивний ЗЗ. При протифазній зазначених електричних коливань утворюється НЗЗ.

За принципом дії розрізняються ЗЗ по напрузі і ЗЗ по струму.

При ЗЗ по напрузі ланцюг ЗЗ включається паралельно навантаженню.

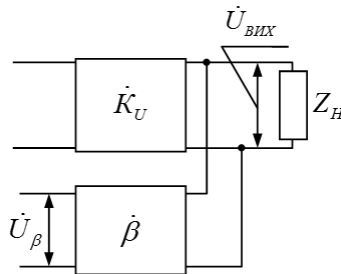


Рисунок 7

При 33 по струму ланцюг 33 включається послідовно з навантаженням.

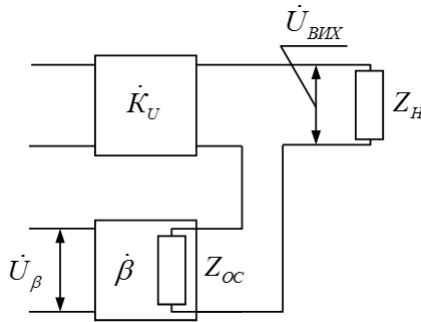


Рисунок 8

Напруга 33 може подаватися на вхід підсилювача або паралельно або послідовно з напругою вхідного сигналу. У першому випадку 33 називається паралельним, а в другому послідовним.

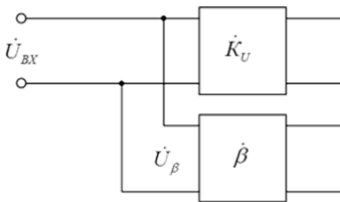


Рисунок 9

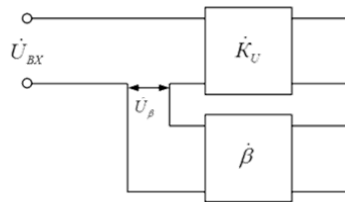


Рисунок 10

Вплив 33 на коефіцієнт підсилення

Для виведення коефіцієнта підсилення підсилювача охопленого 33 розглянемо схему:

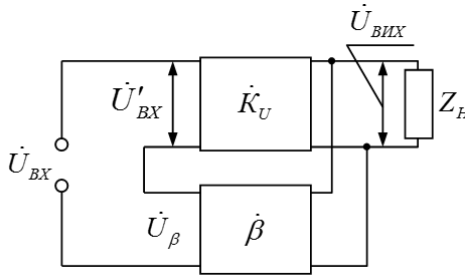


Рисунок 11

β - може приймати значення від ОТО +1 при ПОС і ОТО до -1; при ООС $U_\beta = \pm \beta U_{ВИХ}$.

$U'_{ВХ} = U_{ВХ} \pm U_\beta$ розділивши обидві частини рівняння на $U_{ВИХ}$ получимо:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{OC}} \pm \beta \quad \text{або} \quad K_{OC} = \frac{K}{1 - (\pm \beta K)}$$

Для речових значень коефіцієнт підсилення підсилювача K і коефіцієнт передачі β ланцюга зворотного зв'язку запишемо для ООС, що $K_{OC} = \frac{K}{1 + \beta K}$, тобто коефіцієнт підсилення підсилювача, охопленого ООС зменшується в $(1 + \beta K)$ раз.

Введення НЗЗ покращує ряд параметрів підсилювача:

1. Підвищує стабільність коефіцієнта підсилення, наприклад:

$$K_{oc} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{80}{1 + 0,2 \cdot 80} = 4,7$$

Припустимо, що K змінився на 10 % тобто на 8, тоді

$$K_{oc} = \frac{80 + 8}{1 + 0,2(80 + 8)} = 4,73 \text{ тобто змінився менш 1 \%}$$

Таким чином, негативний зворотний зв'язок перешкоджає будь-яким змінам величини коефіцієнта підсилення.

2. Збільшується вхідний опір підсилувача в $(1 + \beta K)$ раз для послідовного НЗЗ.

$$U'_{BX} = U_{BX} - U_P; \quad U_{BX} = U'_{BX} + U_P;$$

$$Z_{BX OC} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{U'_{BX} + \beta K U'_{BX}}{I_{BX}} = \frac{U'_{BX}}{I_{BX}} (1 + \beta K)$$

3. Зменшує нелінійні і частотні спотворення.

$$K_{ГOC} = \frac{K_{\Gamma}}{1 + \beta K}$$

Найбільший внесок в рівень нелінійних спотворень вносить вихідний каскад підсилувачів. Тому НЗЗ часто вводять саме в вихідному каскаді.

Введення НЗЗ дозволяє отримати більш рівномірну амплітудно-частотну характеристику підсилувача.

Так як $\frac{1 + \beta K_H}{1 + \beta K_{CEP}} \ll 1$, то $M_{HOC} \ll M_H$.

Припускаючи, що зворотний зв'язок глибокий ($\beta K \gg 1$), отримаємо $M_{HCB} \approx 1$, тобто частотні спотворення з НЗЗ значно зменшуються.

На Рисунок 7. показаний амплітудно-частотні характеристики підсилювача без ЗЗ і з НЗЗ.

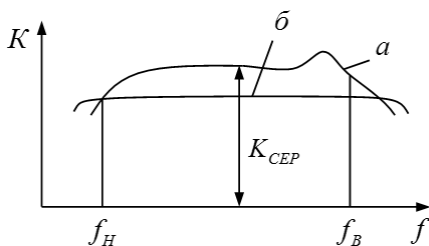


Рисунок 12

Лекція № 6 Підсилювачі змінної напруги

Призначення підсилювача полягає в отриманні на заданому опорі кінцевого навантажувального пристрою необхідної потужності підсилюваного сигналу.

Серед підсилювачів змінної напруги найбільш чільне місце займають ПНЧ, що підсилюють електричні коливання в діапазоні частот від одиниць Гц до десятків кГц. ПНЧ застосовують в радіоприймачах і радіотрансляційних пристроях, системах автоматичного регулювання та телеметрії.

Напруга на вході може змінюватися від часток мікрвольта до декількох вольт.

Значення напруг підсилених електричних коливань можуть бути до сотень вольт, а по потужності до сотень ват і кіловат.

Для отримання такого підсилення підсилювачі будуються за многокаскадною схемою

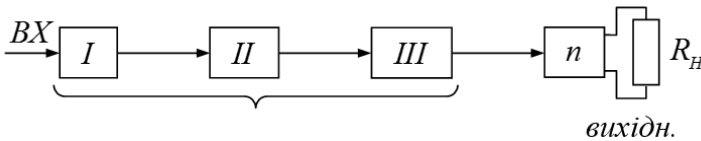


Рисунок 1

Як навантаження ПНЧ можуть використовуватися резистори, трансформатори, обмотки електродвигунів, динамічні головки гучномовців і т.д.

З трансформаторних ПНЧ найбільше застосування отримали підсилювачі з СЕ і СВ, так як вони забезпечують найбільший коефіцієнт підсилення при порівняно високим вхідним опором.

Схеми ПНЧ попереднього підсилення

Найпростішу схему резистивного підсилювача з СЕ можна представити в наступному вигляді.

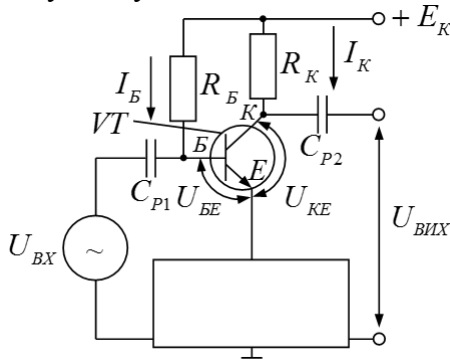


Рисунок 2

Схема з фіксованим базовим струмом.

Принцип роботи підсилювача

Джерело сигналу створює на вході підсилювача змінна напруга змінюється за законом:

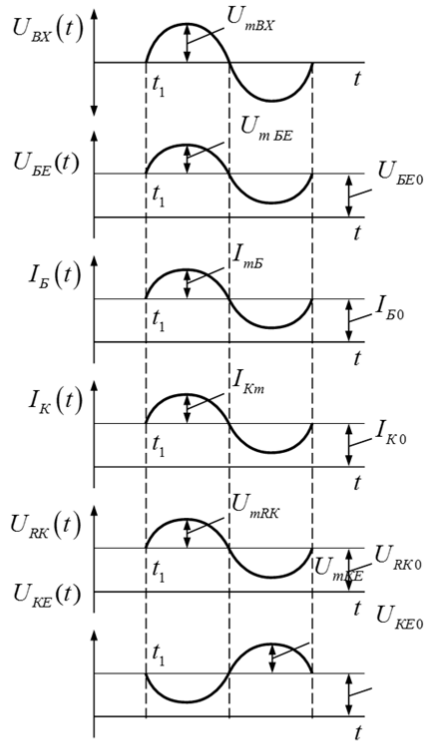


Рисунок 3

$$U_{ex} = U_{be} = U_{mex} \sin \omega t$$

При непрацюючому джерелі ($U_{ex} = 0$) підсилювач знаходиться в режимі спокою (інтервал часу $0 \dots t$), який характеризується постійними напругами і постійними струмами.

Зміна базового струму викликає зміну струму колектора і напруги на колекторі, причому амплітуда виявляється значно більше амплітуди U_{mex} .

Крім того напругу зрушено на 180° по відношенню до напруги входу. Підсилювачі у яких фаза вихідної напруги протилежна фазі вхідної напруги називаються інвертуючими.

Процес роботи підсилювача можна відобразити на вхідних і вихідних статистичних характеристиках транзистора, користуючись поняттям динамічного режиму роботи транзистора.

Режим роботи транзистора з навантаженням називається динамічним. В цьому режимі струми і напруги на електродах транзистора не залишаються постійними, а безперервно змінюються. Графічний аналіз роботи підсилювача почнемо з побудови навантажувальної прямої, положення якої на вихідних статистичних характеристиках тр-ра визначається рівнянням динамічного режиму для вихідного кола.

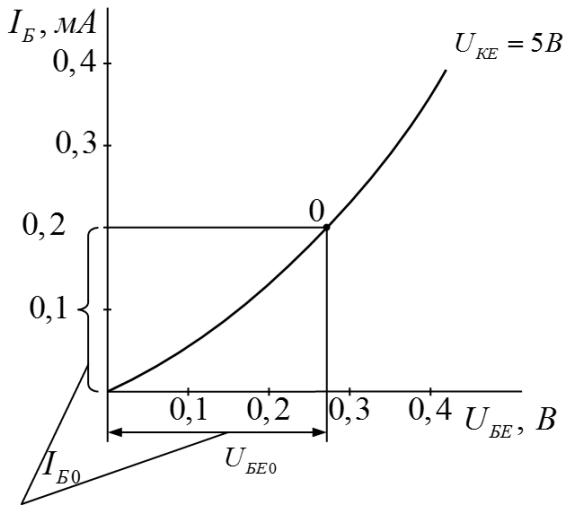


Рисунок 4

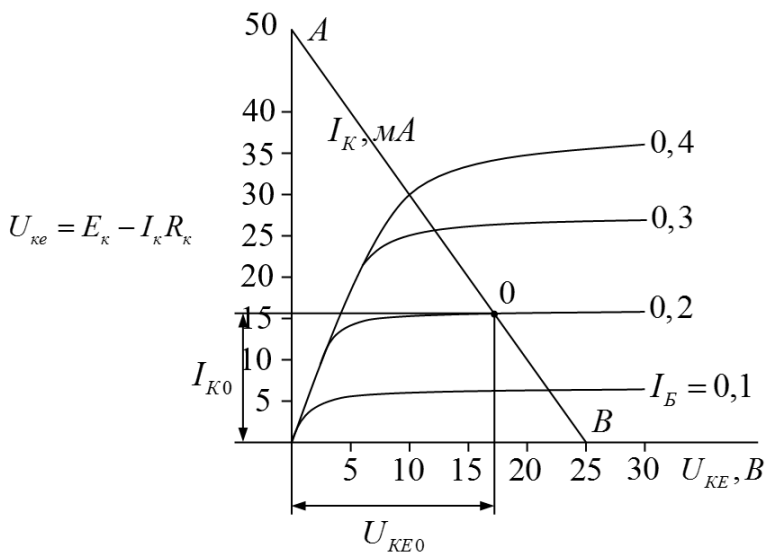


Рисунок 5

Знаходимо дві точки А на осі струму і В на осі напруг.
Для точки А має задовольнятися умова

$$I_{KA} = \frac{E_{к}}{R_{к}} = \frac{25}{500} = 50 \text{ мА}$$

Для отримання найменших спотворень підсилюється сигналу робочу точку О слід розташовувати на середині робочої частини навантажувальної прямої. Обрана робоча точка О однозначно визначає відсутність вхідного сигналу.

Струм бази дорівнює значенню для кривої на якій знаходиться обрана точка О. Встановивши постійний струм бази ($I_{б0}$), на вхідних характеристиках знаходимо напруги зсуву.

Для отримання обраного режиму необхідно в підсилювачах забезпечити необхідну величину струму зміщення в ланцюзі бази. Для цього і служить резистор R_{σ} .

Переваги: одне джерело живлення, мале число деталей, великий опір R_{σ} (десятки кОм).

Недоліки: схема непридатна для роботи в широкому діапазоні температур; великий розкид і нестабільність параметра β робить режим роботи підсилювача нестійким.

Більш ефективною є схема з фіксованою напругою зміщення.

Схема з фіксованою напругою зміщення на базі

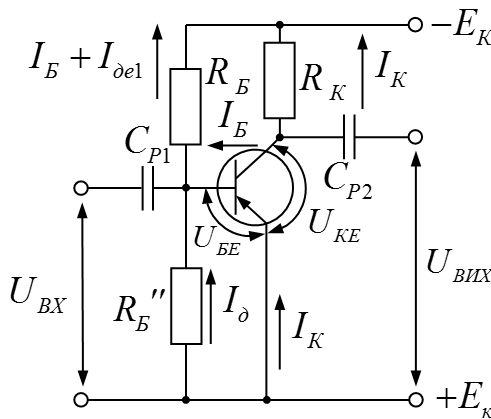


Рисунок 6

У цій схемі опору R_{σ}' і R_{σ}'' , підключені паралельно RE_{κ} , складають дільник напруги.

Опір дільника визначають із очевидних співвідношень:

$$R'_\sigma = \frac{E_K - U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}0}}{I_\sigma + I_{\bar{\sigma}0}}$$

$$R''_\sigma = \frac{U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}0}}{I_\sigma}$$

Для підвищення стабільності режиму роботи схеми струм I_g обирають в межах

$$I_\sigma \approx (2 \div 5) I_{\bar{\sigma}0}$$

Для підвищення стабільності режиму роботи схеми струм обирають в межах

Опори R'_σ і R''_σ включені паралельно один одному. Тому необхідно щоб $\frac{R'_\sigma \cdot R''_\sigma}{R'_\sigma + R''_\sigma} \ll R_{ex}$, тобто дільник повинен володіти великим опором (кілька кОм).

Для стабілізації робочої точки на характеристиках доводиться приймати різні заходи.

За допомогою термоопорів:

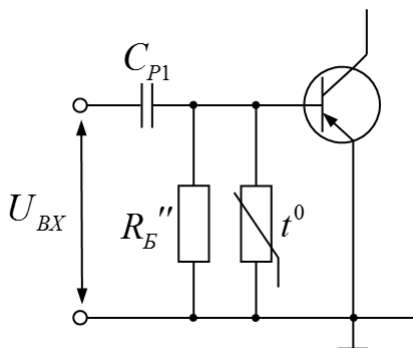


Рисунок 7

Включення терморезистора дозволяє при підвищенні температури зменшити негативну напругу на базі за рахунок зменшення опору термотранзистора.

За допомогою напівпровідникового діода.

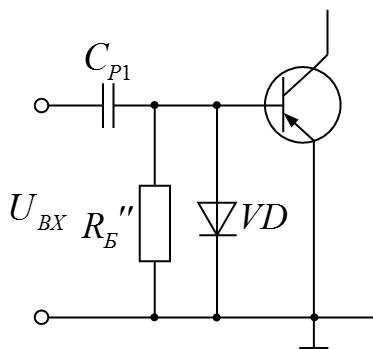


Рисунок 8

У цій схемі діод включений у зворотному напрямку, а температурна характеристика зворотного струму діода повинна бути аналогічна температурній характеристиці зворотного струму колекторного переходу тр-ра.

Найбільшого поширення набула схема термостабілізації режиму за допомогою резистора включеного в ланцюг емітера.

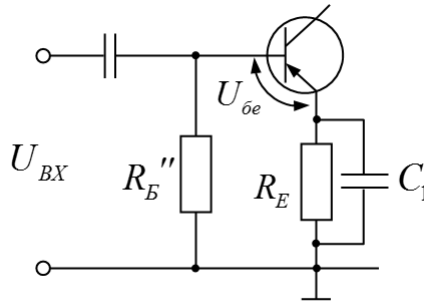


Рисунок 9

Нехай з якої-небудь причини, наприклад при збільшенні температури, постійна складова колекторного струму зростає. Збільшення I_k призводить збільшення I_e і падіння напруги на R_e , що в свою чергу призводить до зменшення U_{be} . Навпаки, якщо I_k зменшується, то зменшується падіння напруги на R_e , що призведе до збільшення U_{be} .

Для відводу змінної складової струму емітера R_e опір R_e шунтується конденсатором C_e досить великої ємності (близько десятка мікрофарад).

Найбільш важливі показники характеризують роботу підсилювача при малому сигналі можуть бути визначені графічним або аналітичним шляхом.

Графічним шляхом за вхідними та вихідними статистичними характеристиками можна визначити наступні значення:

вхідний опір

$$R_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{твх}}}{I_{\text{твх}}} = \frac{U_{\text{бэм}}}{I_{\text{бт}}};$$

Коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = \frac{U_{\text{тввх}}}{U_{\text{твх}}};$$

де
$$U_{\text{тввх}} = \frac{U_{\text{кэ max}} - U_{\text{кэ min}}}{2}$$

$$U_{\text{твх}} = \frac{U_{\text{бэ max}} - U_{\text{бэ min}}}{2};$$

Коефіцієнт підсилення за струмом

$$K_I = \frac{I_{\text{тввх}}}{I_{\text{твх}}} = \frac{I_{\text{км}}}{I_{\text{бт}}}; \quad K_P = K_I \cdot R_U;$$

Аналітичний розрахунок підсилювача

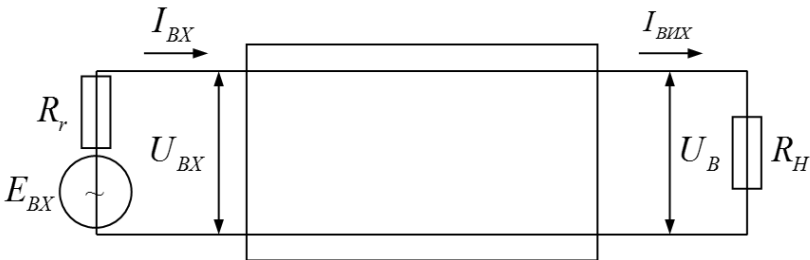


Рисунок 10

Для них можна записати систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{ex}} &= h_{11} I_{\text{ex}} + h_{12} U_{\text{ввх}} \\ I_{\text{ввх}} &= h_{21} I_{\text{ex}} + h_{22} U_{\text{ввх}} \end{aligned} \right\}$$

Із наведеної схеми підсилення виходить, що

$$\left\{ \begin{aligned} I_{\text{ввх}} &= -\frac{U_{\text{ввх}}}{R_H} \\ U_{\text{ex}} &= E_{\text{ex}} - I_{\text{ex}} R_r \end{aligned} \right.$$

Знак мінус відображає той факт, що $U_{\text{ввх}}$ відрізняється від U_{ex} на 180° .

Вирішуючи спільно рівняння отримаємо:

$$R_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{I_{\text{ex}}} = \frac{h_{11} + hR_H}{I + h_{22}R_H}, \text{ де } h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21};$$

$$K_I = \frac{I_{\text{ввх}}}{I_{\text{ex}}} = \frac{h_{21}}{I + h_{22}R_H};$$

$$K_U = \frac{U_{\text{ввх}}}{U_{\text{ex}}} = K_I \frac{R_H}{R_{\text{ex}}}; \quad K_p = K_I \cdot K_U;$$

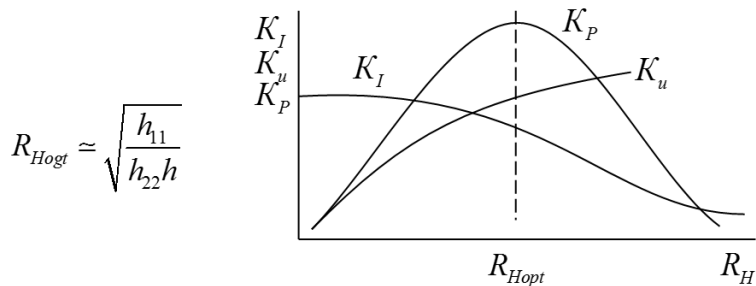


Рисунок 11

Оскільки у звичайних каскадах $R_H \prec R_{Hopt}$ то:

$$R_{ex} \approx h_{11}; \quad K_U = -K_1 \frac{R_H}{R_{ex}};$$

$$K_1 \approx h_{21}; \quad K_P = -K_1 \frac{h_{21}^2}{h_{11}} R_H.$$

Лекція № 7

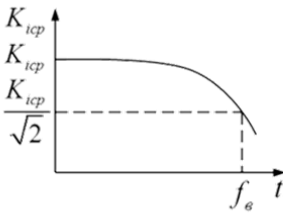
Підсилювачі постійного струму

В підсилювачах змінної напруги зв'язок між каскадами здійснюється за допомогою RC-ланцюгів або трансформаторів. При такому зв'язку підсилювалася тільки змінна складова.

В стабілізаторах напруги і струму, вимірновальних приладах, пристроях автоматики (для реєстрації тиску, температури, освітленості, вологості та ін.), для підсилення повільно змінюючихся напруг і струмів необхідні підсилювачі, смуга пропускання яких має нижню граничну частоту. Підсилювачі, що володіють цією властивістю, зуться ППС.

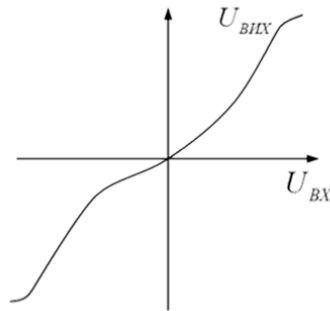
За допомогою ППС можна підсилювати струми $10^{-15} \dots 10^{-16}$ А.

Вид АЧХ і амплітудної характеристики ППС показано на рисунках.



Вид АЧХ

Рисунок 1



Вид амплітудної характеристики

Рисунок 2

ППС прямого підсилення

В ППС прямого підсилення сигнал з виходу попереднього каскаду надходить безпосередньо на вхід наступного.

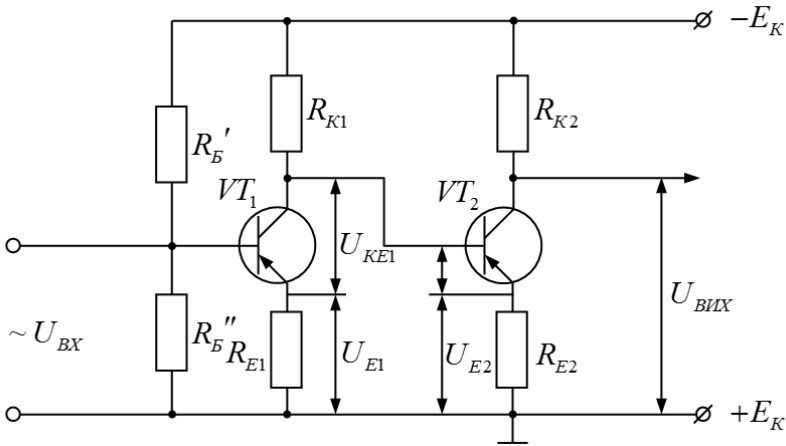


Рисунок 3

Режим спокою розраховується так само, як і для ПНЧ.

Опір резистора R_{E2} повинен бути таким, щоб забезпечувалась умова

$$U_{KE1} + U_{E1} = U_{BE2} + U_{E2}$$

звідси

$$U_{E2} = U_{KE1} + U_{E1} - U_{BE2}$$

зазвичай $U_{KE1} \gg U_{E1}$, *поэтому* $U_{E2} \gg U_{E1}$.

Таким чином, при однакових режимах роботи справедливі нерівності

$$R_{E2} \gg R_{E1}, \quad R_{K2} \ll R_{K1}.$$

Коефіцієнт підсилення кожного каскаду буде дорівнювати:

$$K_u = \frac{K}{1 + \beta_1 K_1}, \quad \text{де} \quad \beta_1 = \frac{U_{10C}}{U_{1ВЫХ}} = \frac{I_{K1} \cdot R_{Э1}}{I_{K1} \cdot R_{K1}} = \frac{R_{Э1}}{R_{K1}}; \quad K_1 = \frac{h_{21}}{h_{11}} R_K.$$

Аналіз отриманих виразів показує, що в такому підсилювачі неможливо отримати значне підсилення за рахунок збільшення кількості каскадів.

Дрейф нуля в ППС

Недоліком розглянутих ППС є дрейф нуля.

Зміна вихідної напруги, не пов'язаною з вхідною напругою і обумовлене внутрішніми процесами в підсилювачі, називають дрейфом нуля підсилювача.

Основні причини, що викликають дрейф нуля ППС:

Зміна температури навколишнього середовища; зміна тиску і вологості навколишнього середовища.

Зміна напруг джерел живлення; шуми, створювані активними і пасивними елементами.

Кількісно дрейф нуля оцінюється дрейфом наведеним до входу.
$$U_{др.вх} = \frac{U_{др.ввых}}{K_U}$$

Величина наведеного дрейфу обмежує мінімально помітний вхідний сигнал. Наведений дрейф нуля за напругою для каскадів з СЕ приблизно дорівнює 2...8 мВ/град для кремнієвих БТ і 20...30 мВ / град для германієвих БТ.

Зменшення дрейфу нуля досягається наступними заходами:

- стабілізацією джерел живлення;
- термостатуванням;
- застосування НЗЗ по постійному струму;
- застосуванням кремнієвих БТ і ПТ;

- використанням балансових (мостових схем).

Балансні підсилювачі

У транзисторних і інтегральних підсилювачах широкого поширення набула схема паралельного балансу.

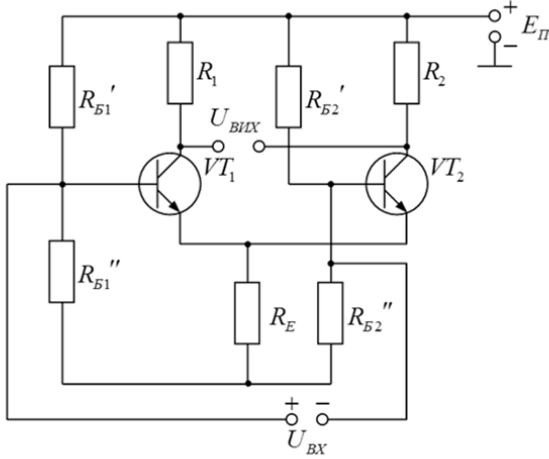


Рисунок 4

Дана схема являє собою міст, плечами якого є резистори R_1 і R_2 і транзистори VT_1, VT_2 .

Для нормальної роботи схеми вона повинна бути суворо симетричною. В цьому випадку міст виявляється збалансованим, а напруга на його виході дорівнює 0.

Схема з симетричним входом і симетричним виходом на біполярних транзисторах.

Зміна напруги живлення та інших факторів в даній схемі призводить до однакової зміни струмів i_1 і i_2 . В результаті напруга вихідних електродів змінюється однаково і різниця напруг між ними як і раніше залишається рівною нулю.

Вхідна напруга викликає зміну струмів i_1 і i_2 причому $\Delta i_1 = -\Delta i_2$.

Напруга на резисторі R_e при цьому не змінюється, так як

$$\Delta U_{\text{e}} = (\Delta i_1 + \Delta i_2) R_e = 0$$

Це означає, що транзистори VT_1 і VT_2 разом з R_1 і R_2 утворюють однокаскадні підсилювачі НЗЗ.

Коефіцієнт підсилення можна визначити із співвідношень:

$$U_{\text{ВВХ}1} = K \frac{U_{\text{ВХ}}}{2}, \quad U_{\text{ВВХ}2} = -K \frac{U_{\text{ВХ}}}{2}, \quad U_{\text{ВВХ}} = K U_{\text{ВХ}}.$$

Диференціальні підсилювачі

Диференціальні підсилювачі (ДП) на біполярних тр-рах і польових відрізняються від балансних підсилювачів наявністю 2^x несиметричних входів (Рисунок 5).

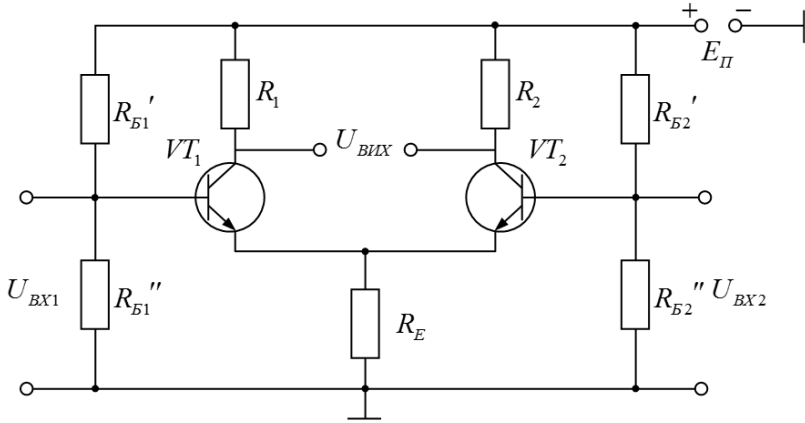


Рисунок 5

При надходженні на входи ДП парафазних напружень його робота $\left(U_{BX1} = \frac{U_{BX}}{2}, U_{BX2} = -\frac{U_{BX}}{2} \right)$ не відрізняється від роботи балансного підсилювача. При надходженні на входи ДП синфазних сигналів $U_{BX1} = U_{BX2} = U_{BX}$ зміни струмів i_1 і i_2 рівні за значенням і за знаком, а зміна напруги на R_e дорівнюватиме:

$$\Delta U_{\mathcal{E}} = (\Delta i_1 + \Delta i_2) R_{\mathcal{E}} = 2\Delta i R_{\mathcal{E}}$$

Таким чином, для синфазних сигналів резистор R_e є елементом НЗЗ.

В цьому випадку коефіцієнт підсилення одного плеча дорівнює

$$K_{uc} = \frac{K_U}{1 + K_{U\beta}}, \quad \text{де} \quad K_U = \frac{h_{21}}{h_{11}} R, \quad \beta = \frac{U_{oc}}{U_{ввix}} = \frac{2R_{\mathcal{E}}}{R} .$$

Підставивши K_U і β у вираз для $K_{U_{СНФ}}$ одного плеча, отримаємо

$$K_{U_{СНФ}} = \frac{R}{2R_3} .$$

При вхідних синфазних сигналах потенціали колекторів змінюються однаково, тому напруга на симетричному виході $U_{ВВХ} = 0$.

У більшості випадків вхідні сигнали не є чисто синфазними або протифазними, а містять однакову (синфазну $U_{ВХСФ}$) і відмінні диференційні ($U_{ВХ ДИФ} = U_{ВХ1} - U_{ВХ2}$) частини.

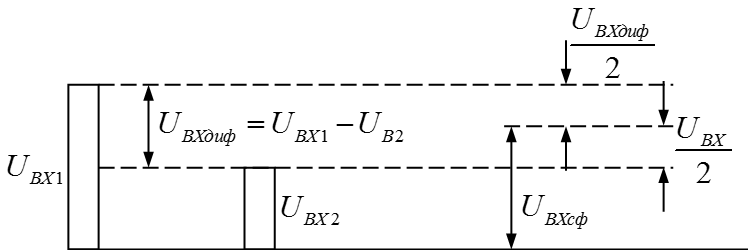


Рисунок 6

Сигнали, які діють на вході ДП, можна математично представити в наступній формі:

$$U_{BX1} = U_{вхсф} + \frac{U_{ВХ ДИФ}}{2}$$

$$U_{BX2} = U_{вхсф} + \frac{U_{ВХ ДИФ}}{2}$$

В кожному плечі синфазна складова буде підсилюватись з коефіцієнтом підсилення $K_{U_{СИФ}} = \frac{R_K}{2R_3}$, а диференційна з

коефіцієнтом $K_U = \frac{h_{21}}{h_{11}} R_K$, так що

$$(U_{ВЫХ} = U_{BX1} - U_{BX2}) = \frac{h_{21}}{h_{11}} R_K (U_{ВХ ДИФ}).$$

Останній вираз показує, що в ДП синфазні сигнали являють собою сигнали перешкоди, тому бажано мати $K_{U_{СФ}} = 0$;

Зменшення $K_{U_{СФ}}$ можна досягти збільшенням R_e .

Однак підвищення опору R_e супроводжується збільшенням падіння напруги на ньому і потребує значного збільшення напруги джерела живлення.

Тому замість R_e часто вмикають генератор стабільного струму (ГСС).

Диференціальні підсилювачі з генератором стабільного струму

Розглянемо інтегральну схему ДП типу К118УД1.

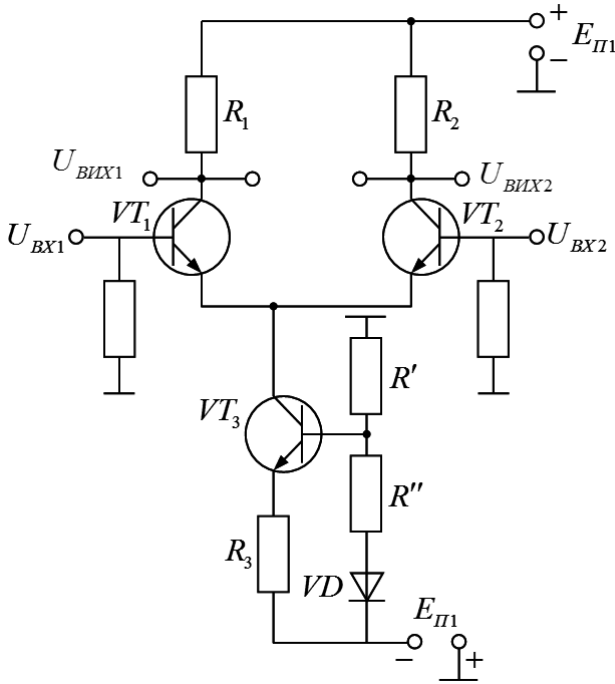


Рисунок 7

ГСС виконаний на біполярному тр-рі VT_3 . Режим роботи VT_3 , а отже і струм всього колекторного ланцюга визначаються дільником $R' R''$, опором R_3 і діодом VD .

Як діода використовується тр-р в діодному включенні

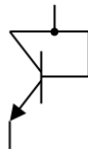


Рисунок 8

Великий динамічний і малий статичний опір ГСС обумовлені характером залежності $I_K = f(U_{KЭ})$;

$$r_{CT} = \frac{U_{KЭ0}}{I_{K0}};$$

$$R_{ДИН} = \frac{\Delta U_{KЭ}}{\Delta I_K};$$

$$R_{ДИН} \gg r_{CT}.$$

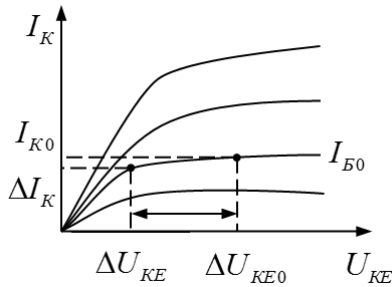


Рисунок 9

В інтегральних ДП і інтегральних ГСС широко використовується діод-транзисторні структури, звані відбивачами струму або струмовими дзеркалами.

Найпростіша схема струмового дзеркала має вигляд.

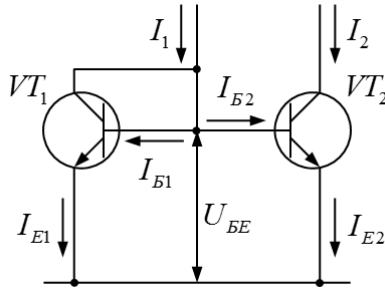


Рисунок 10

Схема містить два ідентичних БТ. У яких з'єднані емітерні переходи.

При однакових площях емітерний перехід тр-ів емітерні струми рівні між собою, внаслідок чого струм I_2 виявляється рівним струму I_1 .

Якщо 1^{ий} каскад вважати входним, а 2^{ий} вихідним, то I_2 повторює I_1 .

Відбивач має малий входний і велике вихідний опір. Емітерні струми відрізняються один від одного якщо емітерні переходи тр-ів знаходяться під різними напругами або площі емітерів різні.

Щоб створити різні напруги, в емітерні ланцюги включають опір.

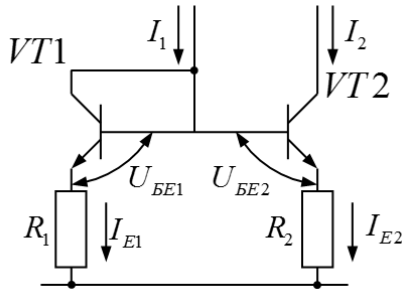


Рисунок 11

Підбираючи ці з опору можна отримати коефіцієнт передачі струму відбивача в межах $0,1 \dots 0,9$.

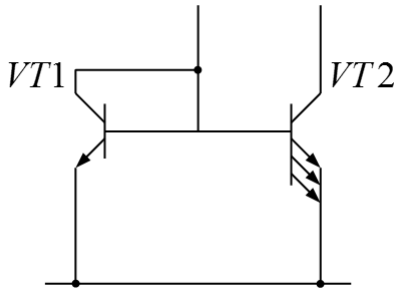


Рисунок 12

Збільшення площі емітерного переходу транзистора VT_2 дозволяє отримати коефіцієнт передачі струму відбивача в межах $1 \dots 10$.

Лекція № 8

Структура і основні параметри інтегральних операційних підсилювачів

Операційними підсилювачами (ОП) називають широкий клас підсилювачів з гальванічним зв'язками, що працює при наявності будь-якої негативного зворотного зв'язку.

Цей зворотний зв'язок настільки велика, що параметри і характеристики пристрою на ОП повністю визначаються елементами ланцюга НЗЗ.

Реалізувати ОП на дискретних елементах - завдання важке. Тому широкого поширення набули лише інтегральні ОП. Структурна схема ОП складається з 2^x входів, каскадів підсилення, каскаду зсуву рівня напружень, вихідного каскаду.

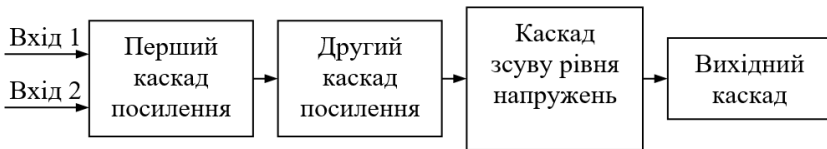


Рисунок 1

Каскади підсилення служать для забезпечення заданого коефіцієнта підсилення. Коефіцієнт підсилення може становити десятки тисяч.

Каскад зсуву рівня напруги призначений для виключення постійної складової напруги. Завдяки цьому каскаду на виході ОП встановлюється нульова напруга при відсутності вхідних сигналів.

Вихідний каскад служить для отримання малого вихідного опору ОП з метою кращого узгодження з навантаженням. Він частіше виконується за схемою двотактної.

Живлення ОП здійснюється від різнополярних джерел, завдяки чому полегшується завдання компенсації нуля на виході

підсилювача. Шумові властивості забезпечуються, зменшенням площі контакту р-п переходів, застосуванням польових транзисторів.

По відношенню до виходу один з входів є інвертуючим, інший неінвертуючим. Наявність двох входів полегшує введення різних ОП і з їх допомогою реалізацію різних функцій.

Параметри і характеристики ОП

Умовне позначення мікросхеми, наприклад К140УД1Б

К - показник широкого застосування;

1 - конструктивно-технологічне виконання;

40 - порядковий номер розробленої серії;

УД - функціональне призначення;

1 - порядковий номер розробки за функціональними ознаками;

Б - відміну за параметрами всередині одного функціонального варіанта.

Крім статичних параметрів, ОП характеризується і динамічними параметрами.

1) Верхня гранична частота смуги пропускання f_B , на якій коефіцієнт підсилення зменшується в рази у порівнянні з його величиною на $f_H = 0$.

2) Час час протягом якого вихідна напруга підсилювача змінюється від 0,1 до 0,9 значення в сталому режимі (на вході діє ступенева напруга).

Схемотехніка операційних підсилювачів

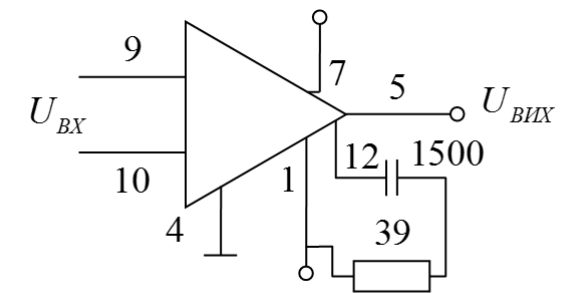


Рисунок 2

Висока точність виконання функції пристроєм на ОП визначається високим входним опором, великим коефіцієнтом підсилення, малим рівнем шумів, високим ступенем придушення синфазного сигналу, широкою смугою пропускання.

Підвищення входного опору досягається зменшенням входних струмів, до одиниць мікроампер. Для підвищення коефіцієнта підсилення застосовують каскадні схеми і складові транзистори.

При цьому вдається зменшити входний струм ОП до 1...2 мА.

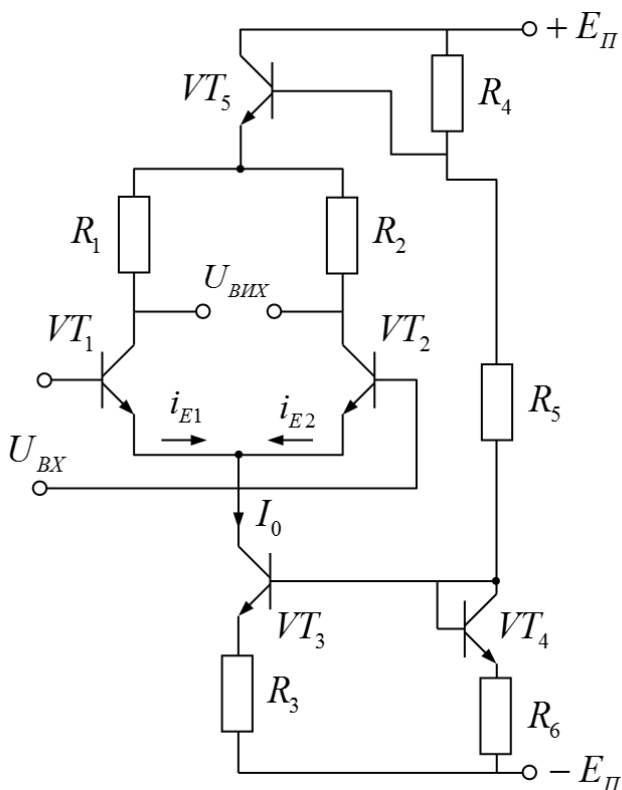


Рисунок 3

Коефіцієнт підсилення такого каскаду становить $K_{vV} = 30 \dots 100$.

Для збільшення підсилення і створення несиметричного виходу в дану схему вводять два додаткових інвертуючих підсилювача. Додаткові інвертують підсилювачі виконані на тр-ах з навантаженнями.

Напряга знімається з колектора VT_1 , інвертується першим підсилювачем і через R_2 подається на базу VT_6 в фазі з напругою, що знімається з колектора VT_2 .

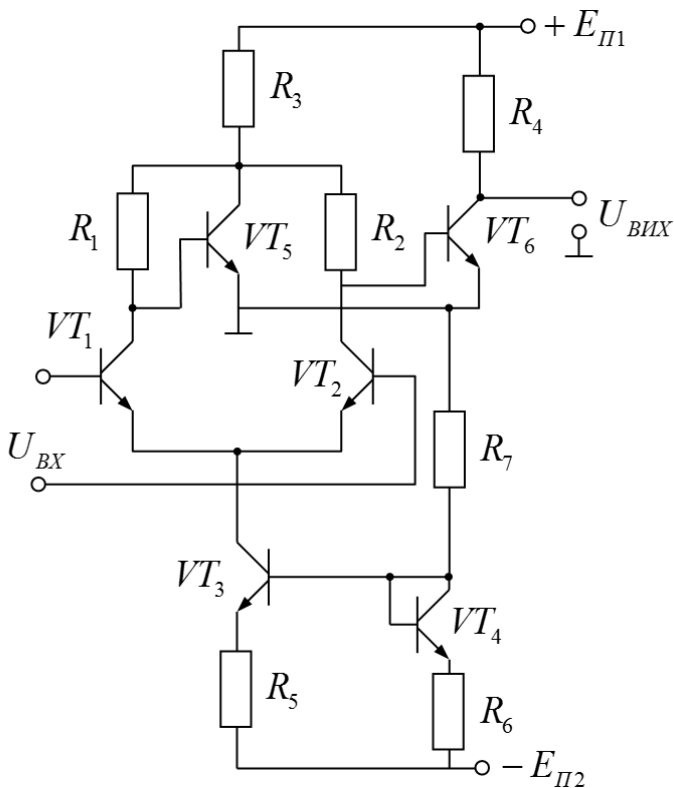


Рисунок 4

Так як через резистор R_3 протікають струми трьох транзисторів, то його опір невеликий, що знижує загальний коефіцієнт підсилення. На практиці для усунення зазначеного недоліку R_3 включають в колекторний ланцюг VT_5 , а резистори підключаються до виходу емітерного повторювача на тр-рі VT_7 .

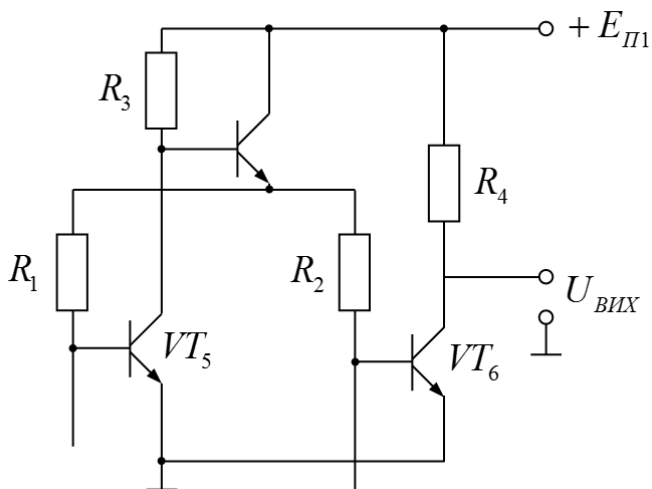


Рисунок 5

Як каскаду зсуву рівня часто застосовують емітерний повторювач з ГСС в ланцюзі емітера.

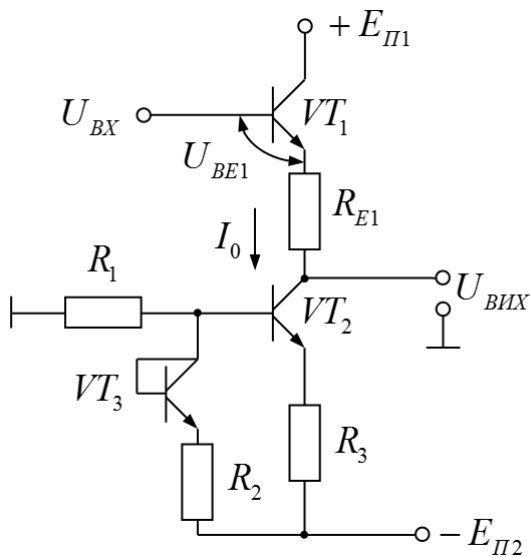


Рисунок 6

Вихідний каскад не повинен знижувати підсилення і в зв'язку з цим повинен володіти високим вхідним опором.

Для зменшення споживаної і розсіюється в більшості ОП застосовуються 2^x тактні каскади, що працюють в режимі В.

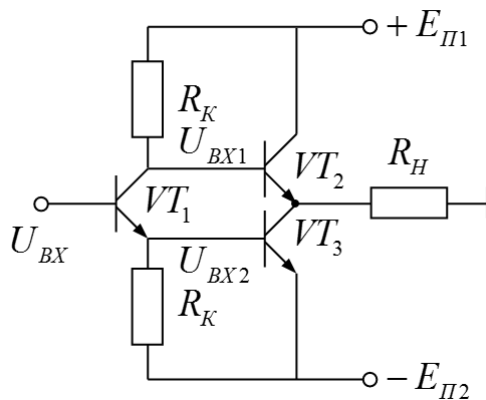


Рисунок 7

З фазоінверсним каскадом. Останнім часом широко застосовують вихідні каскади в інтегральному виконанні, побудовані на різношипних транзисторах.

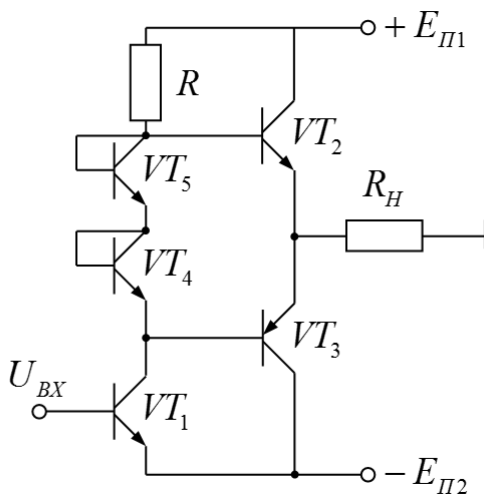


Рисунок 8

Характерною особливістю такої схеми є відсутність фазоінверсного каскаду.

При рознесенні потенціалів без транзисторів за допомогою в діодному включенні схема працює в режимі АВ або А. В цьому випадку на бази подається напруга зміщення які виділяються на за рахунок протікання струму.

Застосування інтегральних операційних підсилювачів

Залежно від подачі на вхід ОП сигналу, а також підключення зовнішніх компонентів можна отримати інвертують, неінвертуючий і диференціальне включення підсилювача.

При розрахунку схем на основі ОП, охоплених ланцюгом ОС, будемо вважати, що задовольняється дві основні умови: нескінченно великі коефіцієнт підсилення і вхідний опір. З огляду на потенціали інвертуючого і неінвертуючого входів виявляються однаковими. Нескінченно великий вхідний опір ОП дозволяє знехтувати його вхідними струмами.

Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП має вигляд (Рисунок 9).

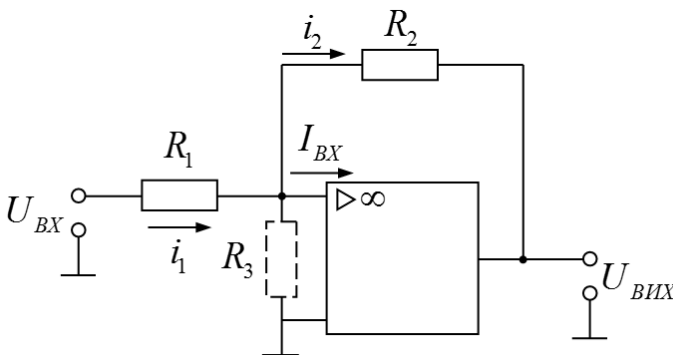


Рисунок 9

Вважаючи, що $i_{BX} = 0$, *т.е.* $R_3 \gg R_2$ отримаємо $i_1 = i_2$.

У схемі даного підсилювача проводиться множення напруги вхідного сигналу на постійний коефіцієнт.

Так як потенціал точки інвертуючого входу дорівнює 0, то вхідний опір.

У схемі множення, операційний підсилювач дозволяє виробляти множення на постійний коефіцієнт, величина якого може бути обрана в широких межах, і забезпечує можливість зміни знака вхідного сигналу.

В реальній схемі ОП.

Щоб напруга між інвертує і інвертується входами залишилося рівним нулю, неінвертуючий вхід підключають до спільної точки через опір R_3 (Рисунок 10).

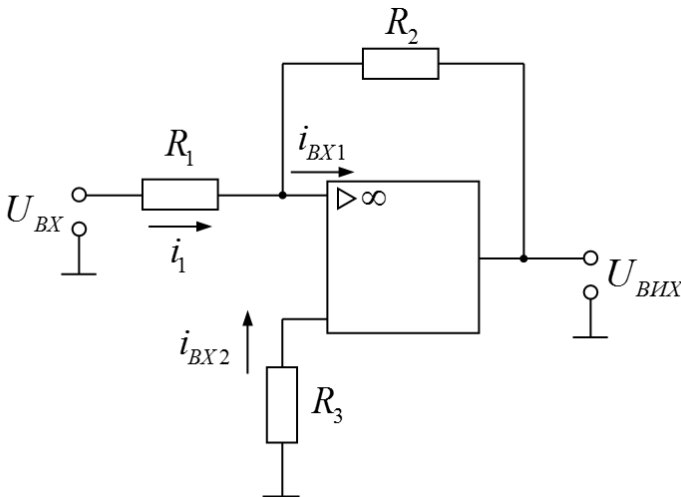


Рисунок 10

Опір R_3 вибирається так, щоб виконувалася рівність

При $i_{BX1} = i_{BX2}$, $R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$: в разі коли $R_2 \gg R_1$, $R_3 = R_1$.

Якщо до інвертується входу підключити декілька сигналів, то можна здійснити їх підсумовування з масштабними множниками (Рисунок 11).

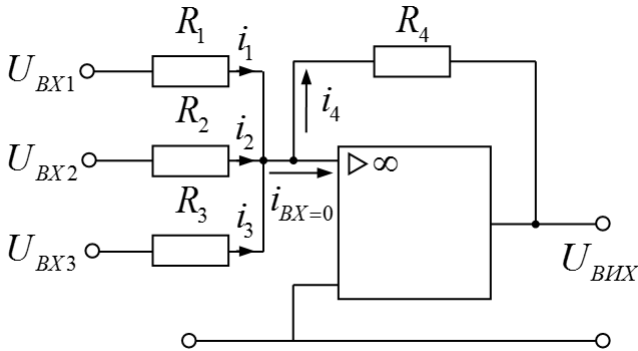


Рисунок 11

Неінвертуючі операційні підсилювачі

У цій схемі (12) сигнал подається на інвертується вхід, а не на його інвертується вихід за допомогою дільника подається сигнал ООС.

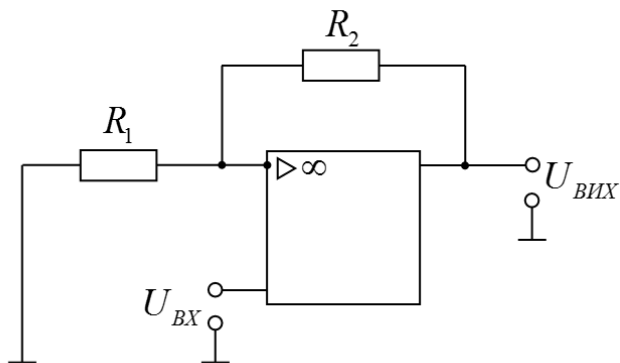


Рисунок 12

При $R_2 = 0$, а $R_1 = \infty$ коефіцієнт підсилення $K_{U_{OOC}} = 1$, тобто операційний підсилювач виконує функцію повторювача напруги.

Диференціальний операційний підсилювач

У цій схемі підсилювач працює в лінійному режимі і являє собою поєднання інвертуючого і неінвертуючого включення ОП.

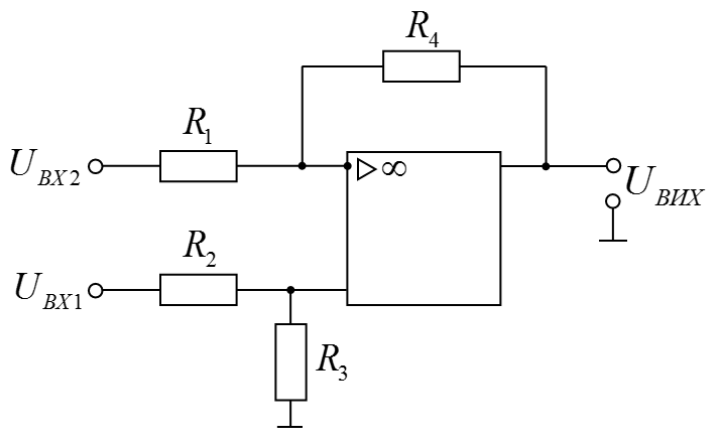


Рисунок 13

Лекція № 9

Equation Chapter 1 Section 1 Генератори синусоїдних коливань

Електронний генератор - це пристрій, що перетворює електричну енергію постійного струму в енергію незатухаючих електричних коливань необхідної форми, частоти і потужності. Будучи першоджерелом електричних коливань, генератори знайшли застосування в радіопередавальних, прийомних, в телеінформаційних вимірювальних системах, в електронно-обчислювальній апаратурі.

Генератори діляться за діапазоном частот:

НЧ від 0,01 Гц до 100 кГц,

ВЧ від 100 кГц до 100 МГц,

НВЧ від 100 МГц и вище.

Для побудови генераторів синусоїдальних коливань використовуються два типи підсилювальних схем - резонансні підсилювачі (LC - генератори) і підсилювачі на резисторах (RC - генератори).

Таким чином, схему будь-якого автогенератора можна представити у вигляді підсилювача охопленого позитивного

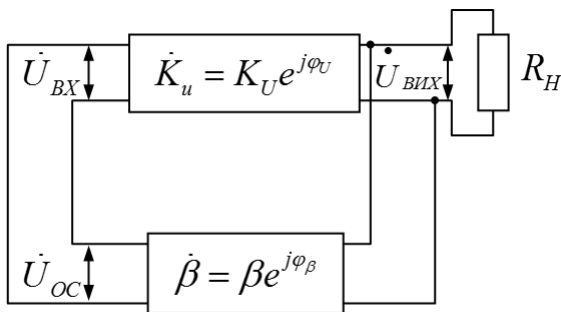


Рисунок 1

Щоб амплітуда вихідної напруги не змінювалася повинна бути виконана умова:

$$\dot{U}_{oc} = \dot{U}_{ex}.$$

Так як то з рівності $\dot{U}_{oc} = \dot{U}_{ex}$ слід $\frac{1}{K_U} = \dot{\beta}$ або $K\dot{\beta} = 1$.

Рівняння $K\dot{\beta} = 1$ є основною умовою існування в генераторі незатухаючих електричних коливань.

Йому відповідають два рівняння:

1) $K_u\beta = 1$ і

2) $\varphi_u + \varphi_\beta = 2\pi n$, де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Рівняння (1) балансу амплітуд вимагає від підсилювача такого коефіцієнта підсилення, при якому повністю компенсуються втрати напруги, що надходить через ланцюг ПОС.

Рівняння (2) балансу фаз визначає умову, за якої забезпечується ПОС.

Ці рівняння справедливі для стаціонарного режиму автогенератора.

Для отримання синусоїдальної вихідної напруги необхідно, щоб баланси фаз і амплітуд виконувалися тільки на одній частоті.

Процес виникнення, наростання і встановлення коливального режиму автогенератора можна пояснити за допомогою, так званої коливальної характеристики автогенератора.

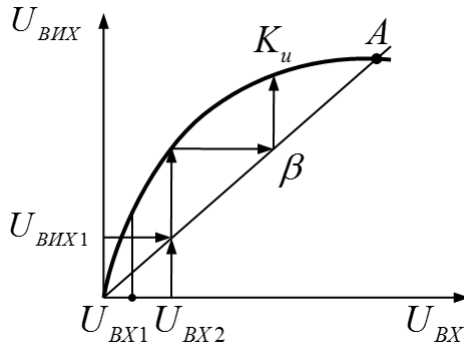


Рисунок 2

Принцип роботи транзисторного генератора типу – LC

Будь-який генератор типу - LC повинен містити:

- коливальну систему, в якій порушуються незгасаючі коливання;
- джерело електричної енергії;
- активний елемент (транзистор);
- елемент зворотного зв'язку.

В результаті обміну енергією між конденсатором і котушкою в контурі виникають вільні затухаючі коливання з частотою

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_k}}$$

Змінний струм контуру, проходячи через котушку L_k , створює навколо неї змінну напругу тієї ж частоти.

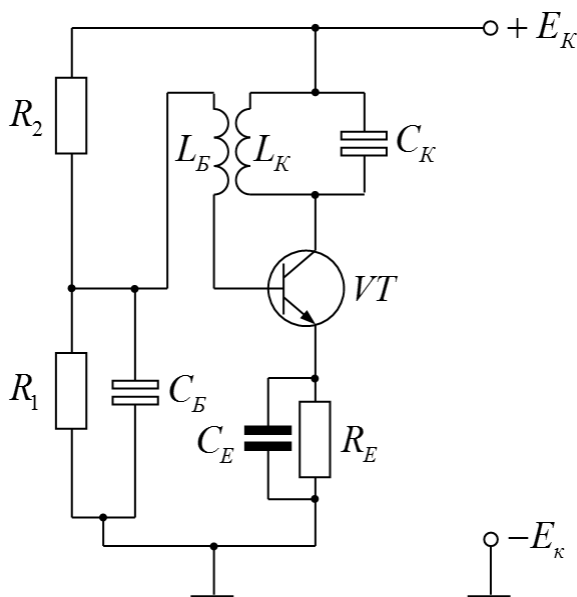


Рисунок 3

Ця напруга викликає пульсацію струму колектора, в якому з'являється змінна складова. Змінна складова струму заповнює втрати в контурі, створюючи на ньому підсилене транзистором змінну напругу, зростання колекторного струму обмежений режимом насичення, а зростання напруги обмежений опором втрат в контурі.

Оскільки резонансний опір контуру носить чисто активний характер

$$R_{oc} = \frac{\rho^2}{r}, \text{ де } \rho = \sqrt{L/C} - \text{характеристичний опір контуру,}$$

то зрушення фаз між напругою на вході і виході становитиме 180° , напруга наводима на $L_{\sigma} \sqrt{U_B} = -j\omega_0 M I_K$, має дорівнювати і тільки в цьому випадку $\varphi_K + \varphi_B = 0$;

Для даної схеми коефіцієнт підсилення становить:

$$K_{cv} = \frac{K}{1 - \beta K}, \text{ де } \beta = \frac{U_B}{U_K} = \frac{I_{kt} \omega_0 M}{I_{kt} \omega_0 L_K} = \frac{M}{L_K}.$$

З огляду на, що підсилювач охопленої ПОС входить в режим генерації за умови

$$\beta \geq \frac{1}{K}, \text{ де } K = \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot R_{pez}, \text{ тому } \beta = \frac{h_{11}}{h_{21} R_{pez}}.$$

Енергетичні показники ЛС автогенератора

Для характеристики режиму роботи служить коефіцієнт використання колекторного напруги ξ .

$$\text{Цей коефіцієнт дорівнює } \xi = \frac{U_{kt}}{E_K}.$$

Розрізняють такі режими:

$\xi < 1$ - недонапружений;

$\xi > 1$ - перенапружений;

$\xi = 1$ - критичний.

При критичному режимі автогенератор забезпечує задану потужність в навантаженні при високому К.К.Д.

Залежно від форми струму в колекторної ланцюга розрізняють режими 1^{го} і 2^{го} роду. Режим 1го роду без відсічення кількості струму, а режим 2^{го} роду з відсіченням.

Змінна напруга на контурі визначається за формулою $U_{kt} = I_{kt} \cdot R_{oc}$.

Схеми LC автогенератор

Замість трансформаторної схеми в автогенераторі може бути використана автотрансформаторний зв'язок, такі схеми називаються триточковими.

Характер елементів x_1, x_2, x_3 коливального контуру визначається з умов балансу фаз і амплітуд. При цьому можливі 2 випадки:

- 1) $x_1 > 0$, а $x_2 + x_3 < 0$.
- 2) $x_1 < 0$, а $x_2 + x_3 > 0$.

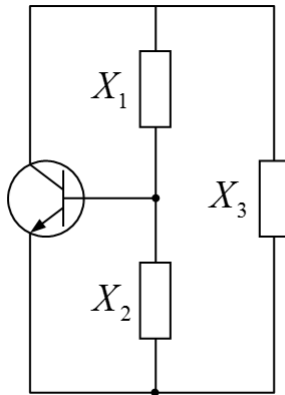


Рисунок 4

В обох випадках $x_2 + x_3 = x_1$.

Характер реактивності x_2 повинен бути таким як і x_1 . Тільки в цьому випадку ОС буде позитивною. Схеми індуктивної трьохточки у якій x_1 і x_2 індуктивні котушки, а x_3 - конденсатор над схемою (картки).

Схема ємнісної трьохточки називається схемою Колпітца.

У всіх розглянутих схемах:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_K}}$$

$$C_K = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

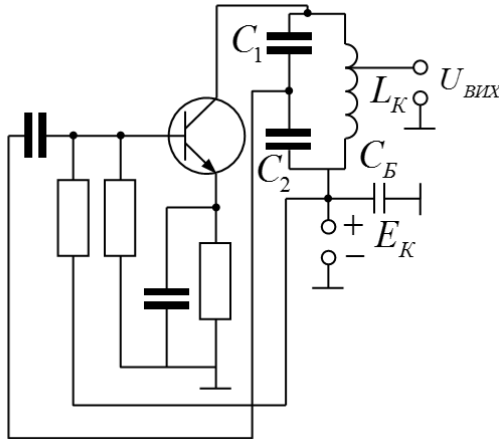


Рисунок 5

Для побудови LC - генераторів зручно використовувати операційні підсилювачі.

У ланцюг зворотного зв'язку включений терморезистор для стабілізації амплітуди вихідної напруги. Збільшення амплітуди коливань на виході викликає зменшення опору терморезистора R . При цьому збільшується глибина ООС.

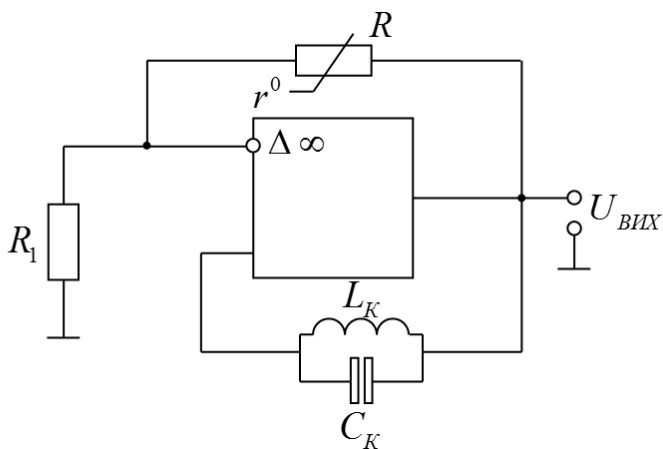


Рисунок 6

RC-автогенератори

На низьких частотах і замість LC - автогенераторів зазвичай використовуються RC - автогенератори. Частотно-залежними 4^x - полюсник, використовуваними в RC - генераторах, є Γ - образні RC - ланцюги, міст Вина, T - образні мости RC .

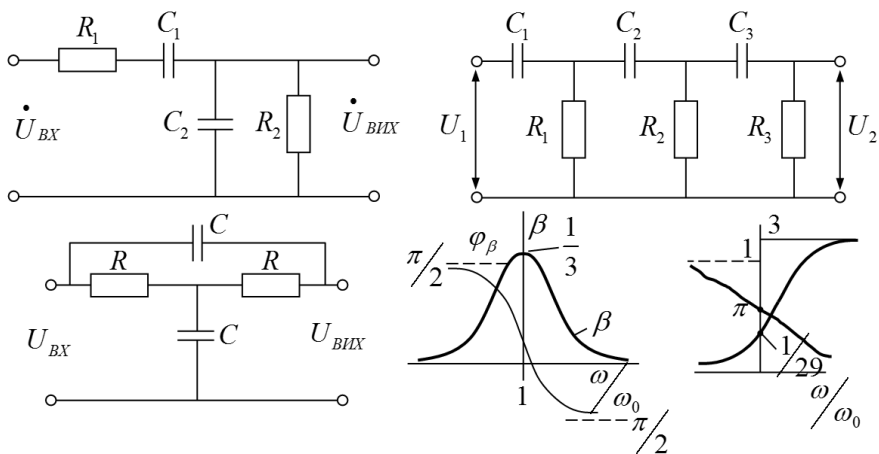


Рисунок 7

Для отримання синусоїдальних коливань необхідно, щоб умови виконувалися на одній частоті. Це завдання вирішується за допомогою кількох ланок RC .

У зв'язку з тим, що одна ланка RC змінює фазу на кут $\varphi < 90^\circ$, мінімальне число ланок має бути $n = 3$.

Фазорезонансна частота Γ - образного ланцюжка при $R_1 = R_2 = R_3$ і $C_1 = C_2 = C_3$ дорівнює $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}}$.

Розрахунки показують, що β для Γ - образної ланцюжка $\beta = \frac{1}{29}$, отже $K = 29$.

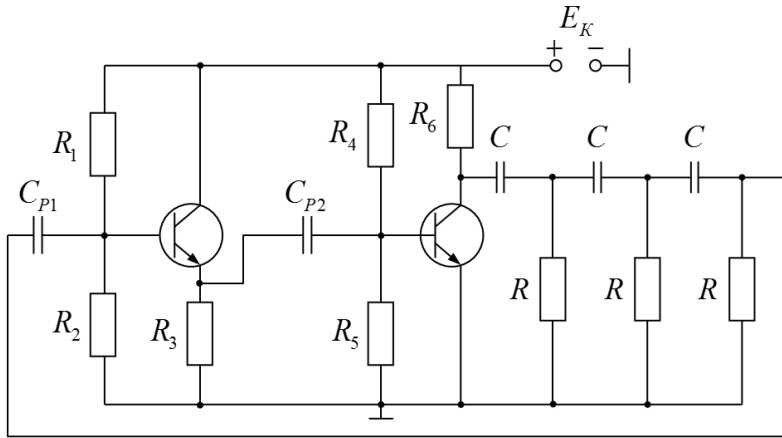


Рисунок 8

Для моста Вина при; $R_1 = R_2 = R$ частота генеруючих коливань дорівнює.

RC - генератор з мостом Вина легко виконати на інтегральному ОП, включивши його між виходом і неінвертуючого входом. Опором домагаються найменших нелінійних спотворень на виході генератора.

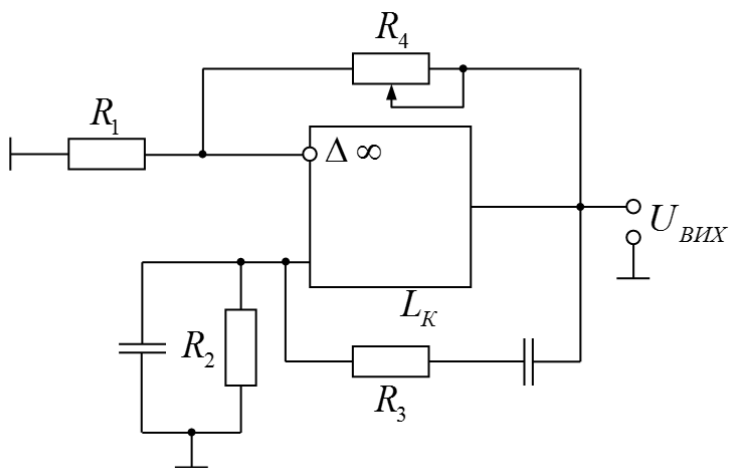


Рисунок 9

Стабілізація частоти генератора

Частота генерованих коливань визначається не тільки параметрами коливального контуру і фазує ланцюга, але і параметрами інших активних і пасивних елементів схеми.

Зміна будь-якого з них, викликане дестабілізуючими факторами призводить до відтоку частоти генерації.

Стабільність частоти оцінюється абсолютної нестабільністю Δf , представляє собою різницю між номінальною частотою $f_{Г.ном}$ і її новим значенням, отриманим після впливу дестабілізуючого чинника, або відносною нестабільністю

$$\frac{\Delta f}{f_{Г.ном}}.$$

Стабільність частоти, тим вище, чим більше добротність виборчого ланцюга.

Високою стабільністю частоти мають автогенератори з кварцовою стабілізацією. У таких генераторах використовують кварцові резонатори з добротністю $(2 \dots 6) \cdot 10^6$, володіють п'єзоелектричними властивостями.

При підведенні до кварцової пластинки змінної напруги вона робить механічні коливання, частота яких залежить від розмірів і виду зрізу пластинки. Оскільки розміри пластинки постійні, то і частота коливань постійна.

Механічні коливання в свою чергу викликають електричні коливання. Коли власна частота коливань кварцу збігається з частотою прикладеної напруги, настає явище резонансу і механічні коливання досягають максимального значення.

Еквівалентна схема кварцового резонатора складається з і C_0 - ємності кварцетримача.

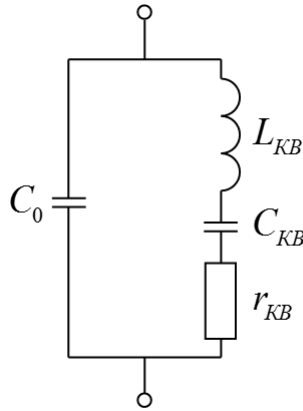


Рисунок 10

Конструкція кварцового резонатора складається з пластинки штучного кварцу. Кварцовий елемент з електродами у вигляді металізованих плівок і кварцетримача поміщають в герметизований скляний балон.

$$\omega_{\text{носл}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{кв}} C_{\text{кв}}}}, \quad \omega_{\text{нар}} = \frac{1}{\sqrt{C_{\text{об}} \cdot L_{\text{кв}}}}.$$

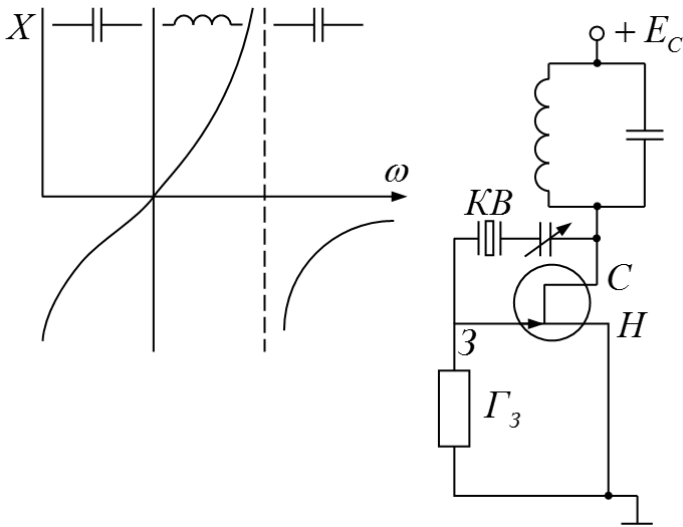


Рисунок 11-12

При кварцовою стабілізація можливі два типи автогенераторів: з CLC -контуром і без нього.

Для виконання умов самозбудження необхідно щоб резонансна частота LC - контуру дорівнювала частоті кварцового резонатора або була кратна їй.

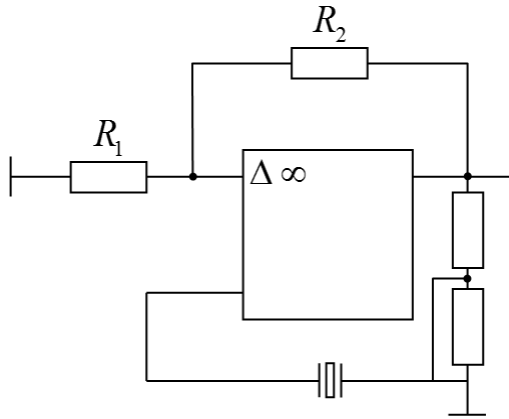


Рисунок 13

Кварцовий генератор в схемі на кварцовий резонатор виконує роль коливального контуру.

Лекція № 10

Види і параметри імпульсних сигналів

Короткочасне зміна струмів і напруги від деякого рівня називають електричними імпульсами. Вони визначають форму імпульсів: прямокутну, трикутну колоноподібні, пилкоподібну ступінчаста і ін. Такі імпульси називаються відеоімпульсами.

В імпульсних пристроях найчастіше застосовуються прямокутні відеоімпульси. Вони характеризуються фронтом 1, вершиною 2 і спадом або зрізом 3.

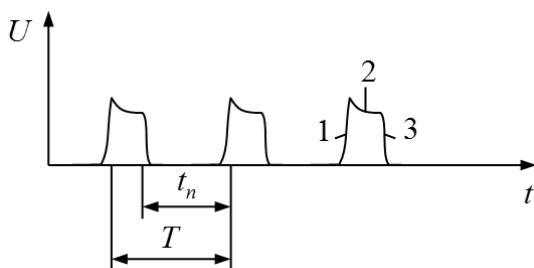


Рисунок 1

Розрізняють поодинокі, неперіодичні і періодичні імпульси. У періодичних імпульсів інтервал часу між двома будь-якими сусідніми імпульсами, називається періодом повторення T , якщо величина постійна. Частота повторення обернено пропорційна періоду $f = \frac{1}{T}$.

Інтервал часу від моменту появи імпульсу і до моменту його зникнення - це тривалість імпульсу t_u , а інтервал між двома сусідніми імпульсами - його пауза t_{II} .

Ставлення $q = \frac{T}{t_u}$ називають скважністю імпульсу. Вона може скласти від одиниць до декількох тисяч. Величина зворотна шпаруватості, $K = \frac{1}{q} = \frac{t_u}{T}$ називається коефіцієнтом заповнення.

Генератори електричних імпульсів

Генератори електричних імпульсів застосовуються в радіолокації, радіозв'язку, телебаченні, обчислювальній техніці і т.д.

Тривалість генеруючих імпульсів може становити від одиниць наносекунд до сотень мілісекунд при шпаруватості від двох до сотень тисяч.

За способом збудження розрізняють автоколивальні генератори, генератори із зовнішнім збудженням і генератори працюють в режимі або загальмованому режимі.

Відмінною особливістю більшості генераторів імпульсів є наявність двох стійких станів рівноваги. Перехід з одного стану в інший відбувається стрибкоподібно і носить лавиноподібний характер. Такий процес називається регенеративним. Все регенеративні генератори можна поділити на дві групи:

Спускові пристрої, або тригери, які не містять реактивних елементів, а перехід з одного стану в інший відбувається під дією вхідної напруги.

Релаксаційні генератори імпульсів, що містять не менше одного реактивного елемента. У таких генераторах регенеративні (лавиноподібні) процеси чергуються з релаксаційним, тобто повільними змінами енергії накопичення.

Різновиди релаксаційних генераторів є мультівібратори, одновібратори, блокінг-генератори і ін.

Мультивібратори

Мультивібратори застосовуються, коли немає жорстких вимог вироблених імпульсів тривалості і частоти повторення.

Схема найпростішого мультивібратора на дискретних елементах має вигляд:

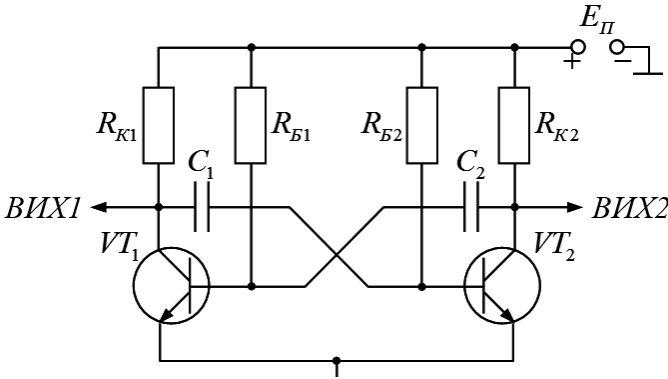


Рисунок 2

Схема являє собою двохкаскадний підсилювач з ПОС, замкнутий в кільцеву схему.

Якщо $R_{K1} = R_{K2}$, $R_{B1} = R_{B2}$, $C_1 = C_2$, то мультивібратор називають симетричним.

При включенні джерела харчування і внаслідок асиметрії плечей мультивібратора, колекторний струм одного транзистора виявиться більше в порівнянні з колекторним струмом іншого тр-ра.

При $\beta K > 1$ це призведе до виникнення регенеративного процесу.

Розглянутий процес можна представити у вигляді символічного запису:

Процес збільшення колекторного струму I_{K1} і зменшення.

Внаслідок дії ПОС процес носить лавиноподібний характер і закінчується переходом VT_1 в режим насичення, а VT_2 - в режимі відсічення.

При відкритому транзисторі VT_1 , конденсатор підключений між базою і емітером VT_2 і підтримує його в закритому стані. Закритий стан VT_2 буде визначатися часом перезаряду конденсатора C_1 по ланцюгу: $+E_{II} \rightarrow R_{B2} \rightarrow C_1 \rightarrow$ колектор-емітер $VT_1 \rightarrow -E_{II}$.

У той же час відбувається зарядка конденсатора C_2 по ланцюгу:

Зазвичай елементи R_{K2} і R_B вибирають так, щоб процес зарядки конденсатора протікав швидше, ніж процес їх перезарядки.

У міру перезарядки конденсатора C_1 напруга на ньому U_{C1} збільшується і в певний момент досягає нульового значення. З цього моменту VT_2 відкривається, його $U_{KЭ2}$ зменшується і в мультивібраторі замикається ПОС:

Цей процес закінчується замиканням VT_1 і насиченням VT_2 .

Мультивібратор приходить під 2^о квазістійкий стан рівноваги, в якому починається зарядка конденсатора C_1 по ланцюгу і перезарядка конденсатора C_2 по ланцюгу.

Графіки змін колекторних і базових напруг мультивібратора матимуть вигляд: (Рисунок 3)

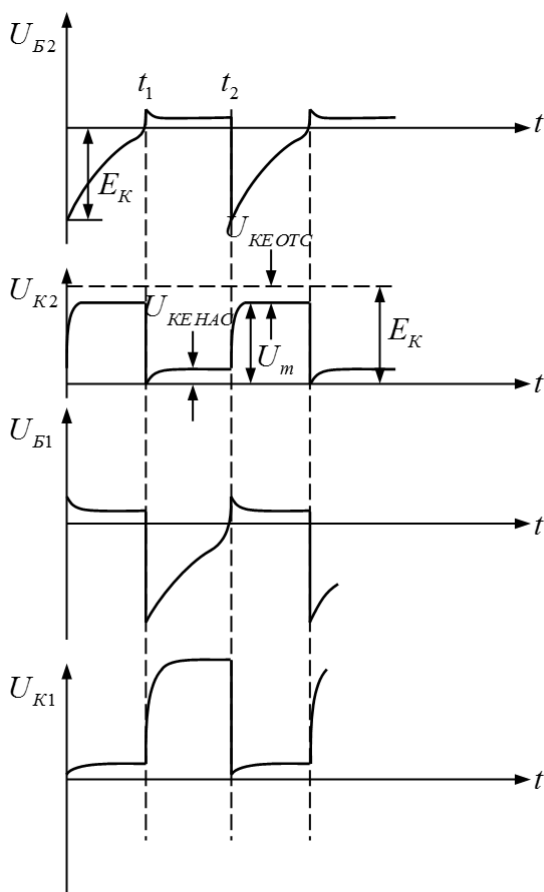


Рисунок 3

Час закритого стану тр-ра VT_1 або тривалість позитивного імпульсу, що знімається з виходу 1, визначається перезарядженням конденсатора C_2 і розраховується за наближеною формулою:

$$t_{u1} \approx C_2 R_{B1} \ln 2 \approx 0,7 C_2 R_{B1}$$

Аналогічно $t_{u2} \approx C_1 R_{B2} \ln 2 \approx 0,7 C_1 R_{B2}$

Період повторення

Мультивібратори на ІМС

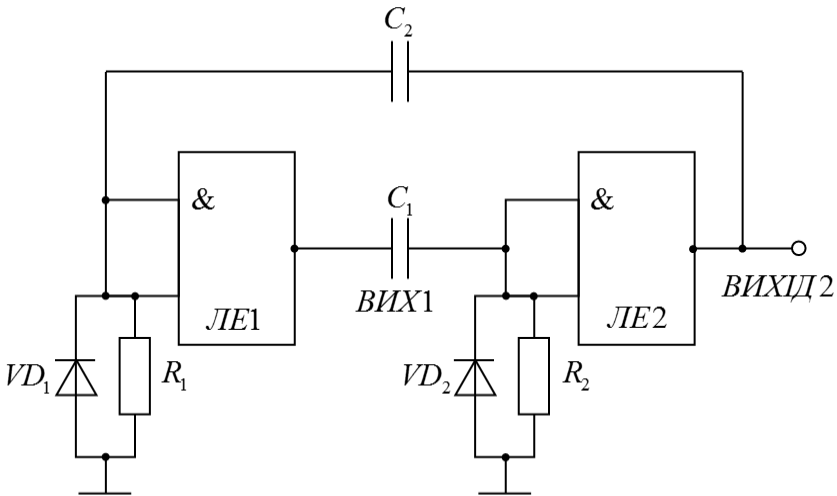


Рисунок 4

Кожне плече мультивібратора слід розглядати як транзисторний ключ або логічний елемент І-НЕ.

Припустимо, що LE1 закритий, а LE2 відкритий. Тоді на виході1 високий рівень напруги і конденсатор C_1 заряджається через резистор R_2 .

Напруга UR_2 , створюване на резисторі R_2 , підтримує LE2 у відкритому стані до тих пір, поки $U_{R2} > U_{ПОР}$. Поки йде зарядка конденсатора C_1 , C_2 встигає повністю розрядитися через вихідний опір відкритого LE2 і діод VD_1 . Коли напруга досягає порогового значення, LE2 почне закриватися. Збільшення

напруги на Вих. 2 через C_2 буде передано на вхід ЛЕ1 і викличе його відмикання.

При цьому відбудеться зменшення напруги на Вих.1, яке через конденсатор C_1 буде передано на вхід ЛЕ2 і призведе до подальшого зменшення протікає через нього струм, то замикається петля ПОС.

Схема мультивібратора на ОП

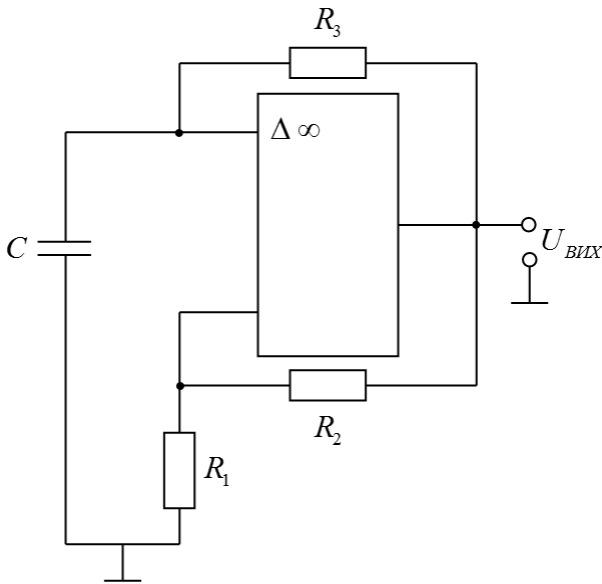


Рисунок 5

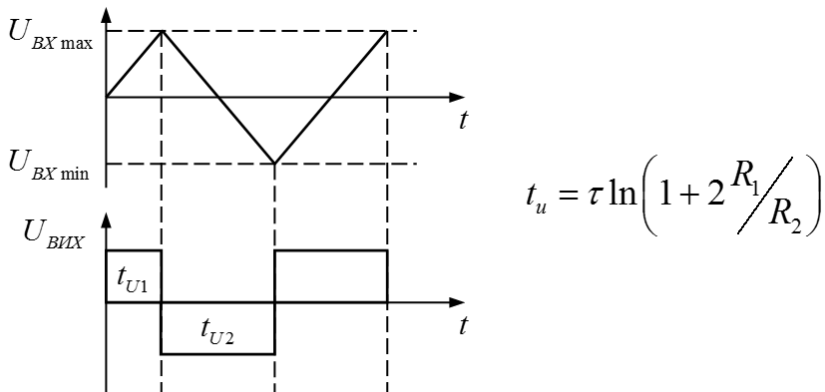


Рисунок 6

Генератори лінійно змінючої напруги

Лінійно-мінливих або пилкоподібною напругою називається електричні коливання, що містять ділянки, на яких напруга змінюється за лінійним законом, а потім повертається до початкового рівня.

Таке напруження використовується для розгортки ЕПТ, отримання тимчасових затримок імпульсних сигналів, модуляції імпульсів по тривалості в системах автоматичного регулювання, вимірювальних приладів, ЕМВ і т.д.

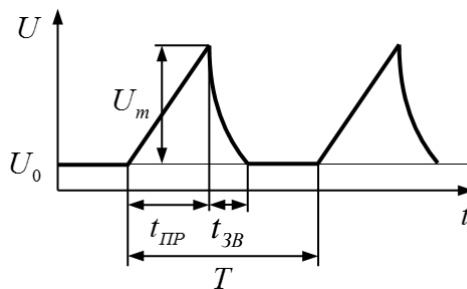


Рисунок 7

Параметри:

- тривалість робочого ходу $t_{\text{ПР}}$;
- тривалість зворотного ходу;
- амплітуда U_m ;
- період повторення T ;
- початковий рівень U_0 ;
- коефіцієнт нелінійності ε , характеризує ступінь відхилення реального пилкоподібної напруги від напруги, що змінюється за лінійним законом;

где $V_{\text{max}} = \frac{du}{dt}$ при $t = 0$; $V_{\text{min}} = \frac{du}{dt}$ при $t = t_{\text{ПР}}$.

Якість роботи генератора характеризується коефіцієнтом використання напруги джерела живлення:

Незалежно від практичної реалізації всі ДПН можна представити у вигляді єдиної схеми

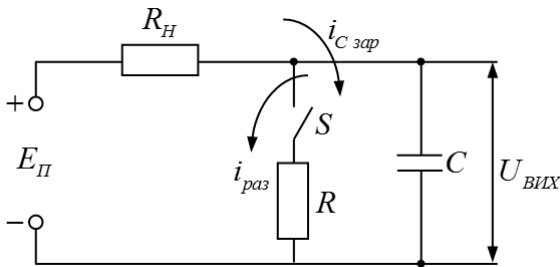


Рисунок 8

У початковому стані ключ замкнутий і на C встановлюється початковий рівень напруги.

При розмиканні ключа конденсатор починає заряджатися струмом $i_{C\text{зар}}$ і напруга на ньому змінюється за експоненціальним законом:

$$U_C = U_0 + (E_{II} - U_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau^3}} \right),$$

Через час t_{III} напруга на конденсаторі досягає величини U_m і стає рівним

$$U_m + U_0 = U_0 + (E_{II} - U_0) \left(1 - e^{-\frac{t_{III}}{\tau^3}} \right).$$

Через час $t = t_{III}$ ключ замикається, і конденсатор розряджається.

Напруга при цьому на конденсаторі змінюється за законом

$$U_C = (U_m + U_0) e^{-\frac{t}{t_p}} \text{ де } t_p = RC.$$

Схема на біполярному транзисторі

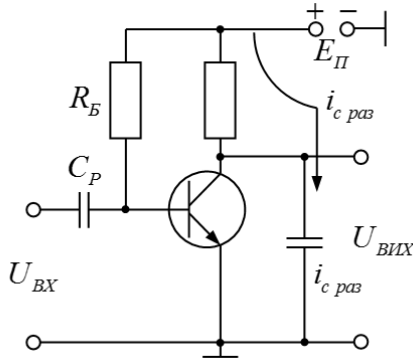


Рисунок 9

Схема надійна в роботі але має малі значення ε і ξ .
Дійсно

$$V = \frac{dU_c}{dt} = \frac{E_{\Pi} - U_0}{\tau_3} e^{-t/\tau_3}$$

$$V_{\max} = \frac{E_{\Pi} - U_0}{\tau_3},$$

$$V_{\min} = \frac{E_{\Pi} - U_0}{\tau_3} e^{-t_{\text{ПР}}/\tau_3}$$

$\varepsilon = \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ПР}}}{\tau_3}} \right) \cdot 100\%$. Зазвичай $t_{\text{ПР}} \ll \tau_3$ і розкладаючи в

ряд $e^{-\frac{t_{\text{ПР}}}{\tau_3}}$ отримаємо $\varepsilon = 1 - \left(1 - \frac{t_{\text{ПР}}}{\tau_3} \right) \approx \frac{t_{\text{ПР}}}{\tau_3}$.

Лекція № 11

Тригерні структури

Тригером називають регенеративний пристрій з гальванічними зв'язками, має два стану стійкої рівноваги. Кожне з цих станів може зберегтися як завгодно тривалий час. Перехід з одного стану в інший здійснюючи під впливом зовнішньої керуючої напруги.

Перепад вихідної напруги можна прийняти як жорсткий диск, який зберігати один розряд числа, представлено в двійковому коді.

Тригери поділяються на статичні і динамічні. Статичні характеризуються незмінним рівнем вихідної напруги. У динамічних тригерах один зі станів характеризується наявністю на виході безперервної послідовності імпульсів певної частоти, а інше відсутністю імпульсів.

Симетричний тригер на біполярних транзисторах з колекторно-базовими зв'язками

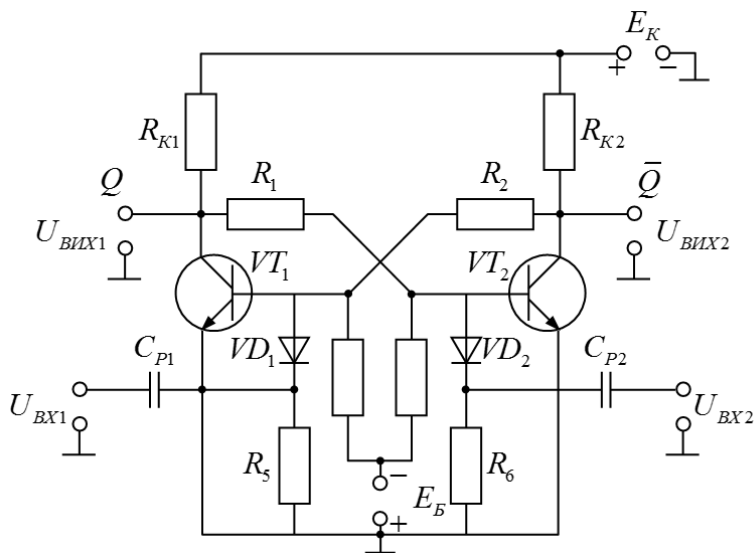


Рисунок 1

З графіків видно, що рівні сигналу є взаємно інверсними.

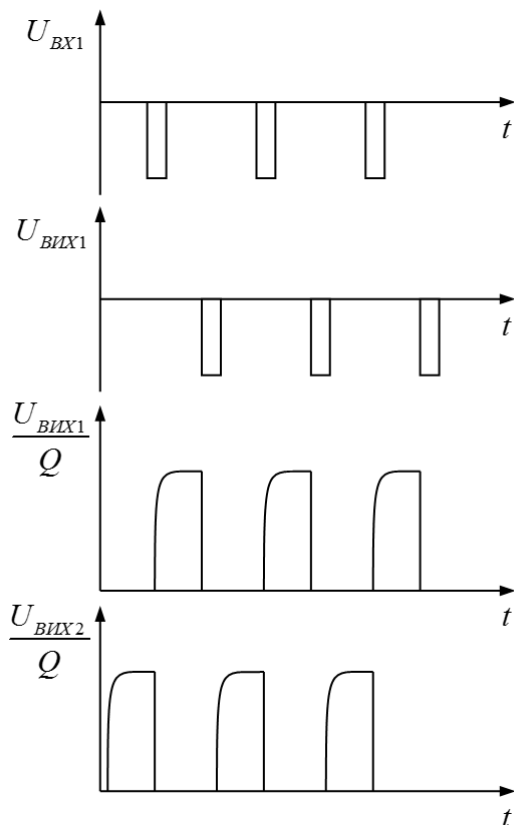


Рисунок 2

Один з виходів тригера називається прямим і позначається. Стан тригера називається одиничним, якщо на прямому виході $Q = 1$, а на інверсному $\bar{Q} = 0$.

Вхід на який подається сигнал, що встановлює тригер в стан $Q = 1$, позначається S .

Вхід на який подається сигнал встановлює тригер в стан $Q = 0$ позначають. Такий тригер отримав назву RS -тригера.

Несимметричний тригер з емітерної зв'язкою

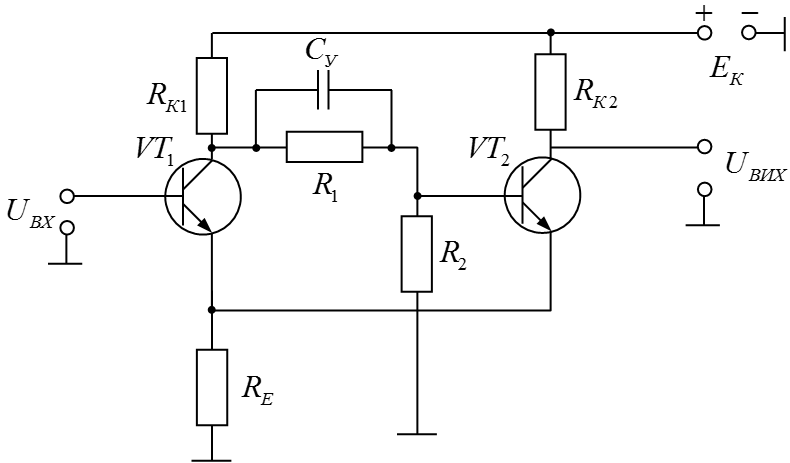


Рисунок 3

Даний тригер має два стійких стани. У початковому стані VT_1 закритий, а VT_2 – відкритий і насичений.

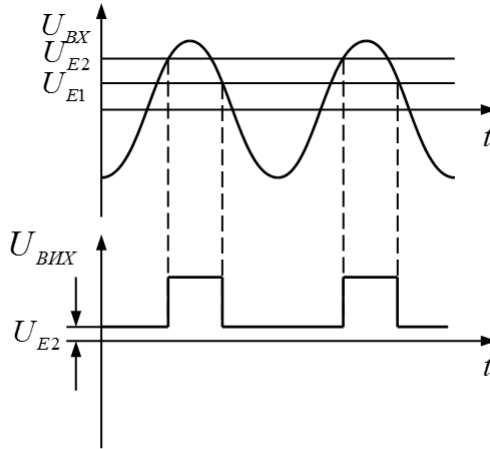


Рисунок 4

Структура і класифікація інтегральних тригерів

Інтегральні тригери використовуються як самостійні пристрої і, крім того, входять до складу різних функціональних пристроїв: лічильників, регістрів, запам'ятовуючих пристроїв.

Для перетворення вхідної інформації в необхідну комбінацію керуючих сигналів в тригері є пристрій керування.

Узагальнена структурна схема тригера з пристроєм управління показана на малюнку.

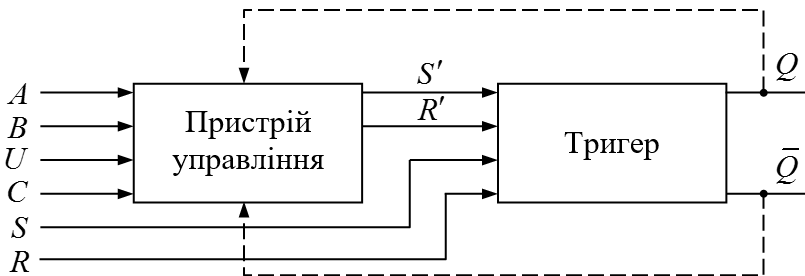


Рисунок 5

A, B – інформаційні (логічні) входи; U – підготовчий вхід; C – тактовий (синхронизуючий) вхід; S' і R' – внутрішні входи; S і R – зовнішні входи; Q і \bar{Q} – зовнішні виходи.

Залежних від призначення тригера предустановочной и тактові входи можуть бути відсутні в тій годину як інформаційні входи є в кожному тригері. В залежності від керуючого пристрою тригери діляться на синхронні и асинхронні.

Асинхронні тригери мають лише логічні входи, і в них інформація здійснюється в момент її надходження. У синхронних тригерах запис інформації відбувається тільки під час вступу на синхронизуючий (тактуючий вхід) додаткового командного імпульсу.

Асинхронні тригери використовуються в якості комутаторів, ключів, лічильників імпульсів, дільників частоти проходження імпульсів.

Синхронні тригери застосовуються в обчислювальній техніці.

Роботою тригерів можна управляти шляхом зміни рівнів вхідних сигналів, а також фронтами і зрізами виникають при зміні цих рівнів.

Тригери, перемикаються за рівнем вхідних сигналів, називають тригерами зі статичним керуванням, а по фронтах і зрізах - тригерами з динамічним керуванням.

На схемах тригер зображують прямокутником, розділеним вертикальною лінією на дві частини: права частина - основне поле, ліва - додаткове. В основному полі поміщаються буква T а в додатковому у кожного входу є буква, яка вказує на його функціональне призначення. Статичні прямі входи і виходи відображають прямими лініями, а інверсні мають додатковий індикатор у вигляді маленького гуртка.

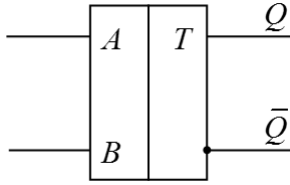


Рисунок 6

Динамічні входи позначають невеликими трикутниками. У прямих динамічних входів, що викликають перекидання тригера при зміні рівня сигналу від 0 до 1, вістря трикутника направлено всередину поля, а у інверсних, що викликають перекидання тригера при зміні сигналу від 1 до 0 - назовні.

Група входів, пов'язана операцією I в додатковому полі зазначається символом логічного множення.

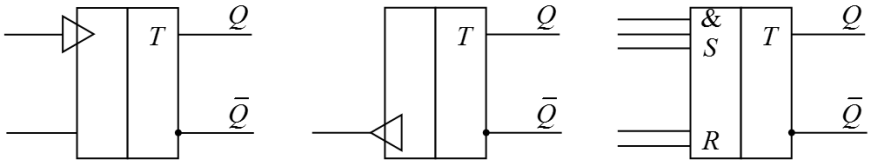


Рисунок 7

Лекція № 12 Електронні ключі

Електронний ключ - це пристрій, який може знаходитися в одному з двох стійких станів: замкнутому або розімкнутому. Перехід з одного стану в інший в електронному ключі відбувається стрибком під впливом вхідної напруги або струму.

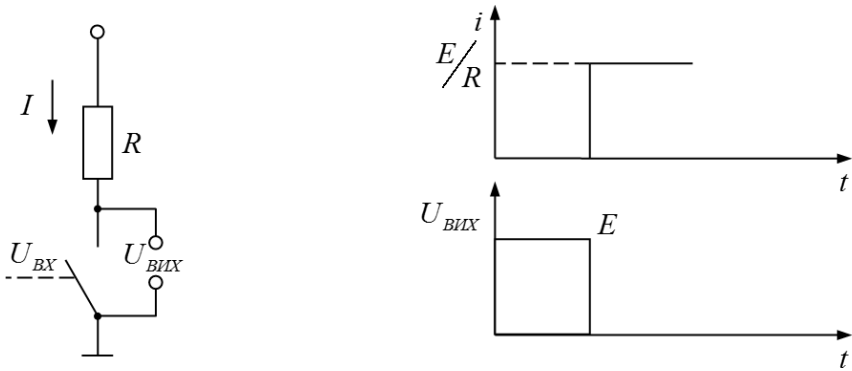


Рисунок 1

У реальних схемах перемикування відбувається не миттєво, а протягом деякого часу. Основу електронного ключа становить нелінійний активний елемент.

Найпростіша схема транзисторного ключа подібна до схеми підсилювача, проте вона відрізняється режимом роботи транзистора. При роботі в ключовому режимі робоча точка транзистора може знаходитися тільки в двох положеннях: в області відсічення та в області насичення. В режимі насичення транзистор можна привести імпульсом позитивної полярності.

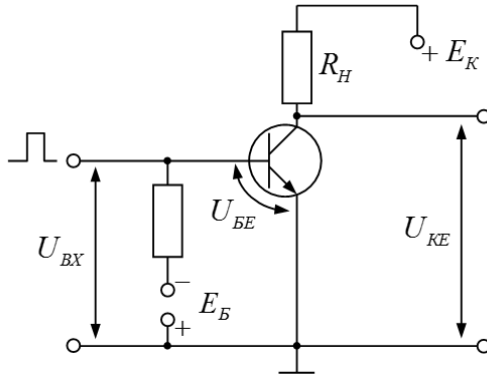


Рисунок 2

Струм колектора в режимі насичення $I_{кнас} = \frac{E_K}{R_H}$. Швидкодія

електронного ключа залежить від часу включення і виключення чим вище частотні властивості транзистора, тим вище його швидкодія.

Ключі на МДП-транзисторах

У ключах на польових транзистора відсутні такий недолік, як накопичення і розсмоктування неосновних носіїв, тому час перемикання визначення зарядкою і перезарядженням міжелектродних ємностей. Роль резистора R_e може виконувати польовий транзистор.

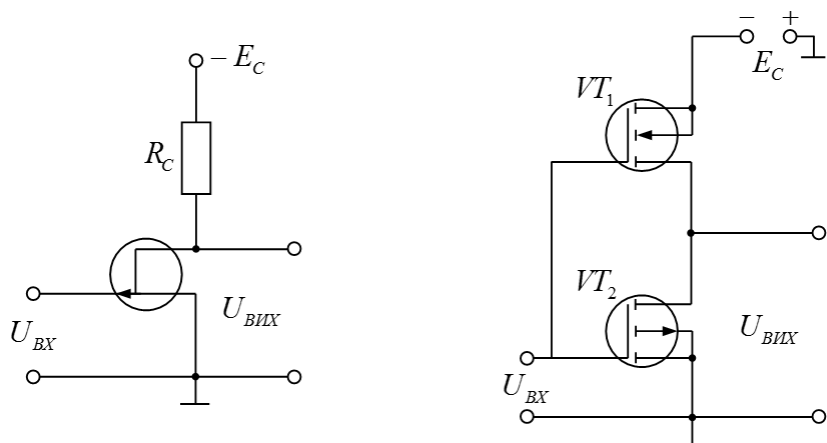


Рисунок 3

У ключах на МДП-транзисторах з індукованим каналом роль R_e виконує $VT1$, а роль активного елементу $VT2$. Транзистор $VT1$ при подачі на вхід позитивної напруги відкритий, а транзистор $VT2$ закритий і тому. При подачі негативної напруги $-E_c < -U_{зипор}$ транзистор $VT2$ відкривається, а транзистор $VT1$ закривається. Майже всю напругу E_c падає на великому опорі каналу транзистора $VT1$, і.

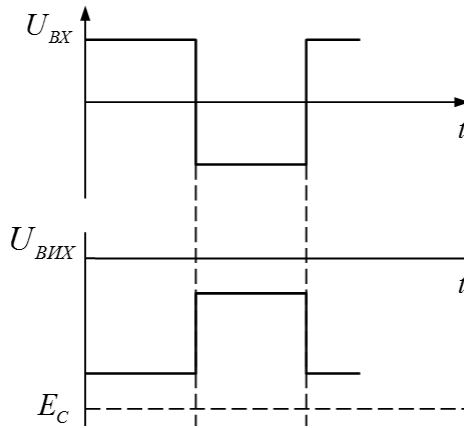


Рисунок 4

Компаратори напруг

Компаратори, або порівнюючі пристрої, призначені для порівняння двох напруг, що надходять на його входи. Одна з порівнюваних напруг називається опорною, може бути постійною або повільно мінливою, інша має відносно велику швидкість зміни. Залежно від знака різниці вхідних напруг на виході компаратора встановлюється або. Як компаратор широко використовується оперативний пристрій. Найпростіша схема на ОП показана на рисунку 5.

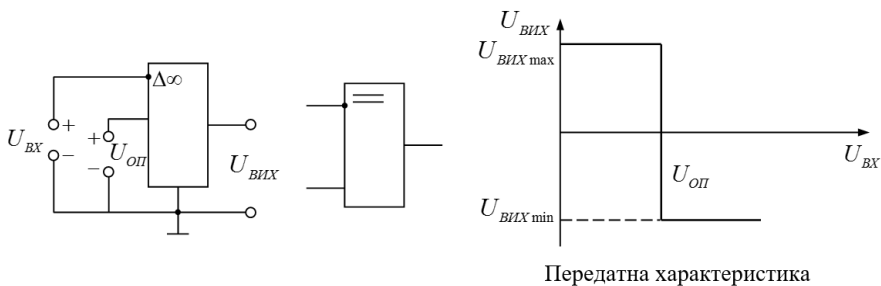


Рисунок 5

Компаратори часто використовують для отримання прямокутних імпульсів з синусоїдальної або пульсуючої напруги. Ці пристрої отримали назву тригерів Шмідта.

У тригері Шмідта порогові рівні перемикачів з одного стану в інший, звання рівнями спрацьовування і відпускання не збігаються, як у звичайного компаратора. Вони розрізняються на величину, яка називається гістерезисом перемикачів

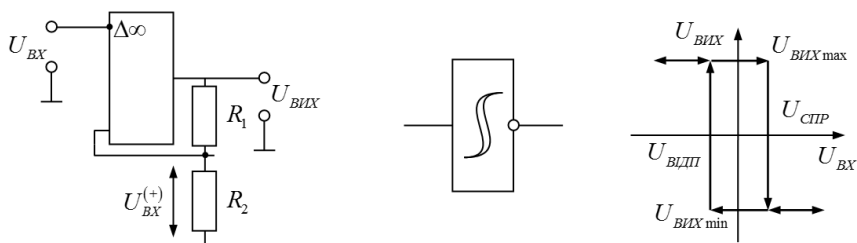


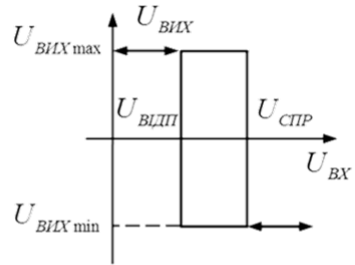
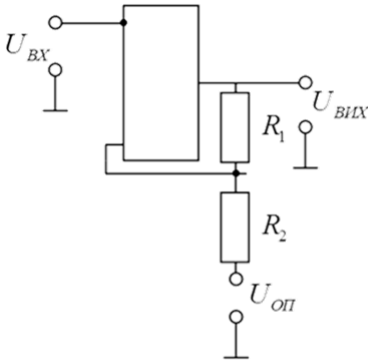
Рисунок 6

Якщо $U_{ex} < 0$, то на неінвертуючий вхід з дільника $R_1 R_2$ подається напруга.

Поки $U_{ex} < U_{ex}^{(t)}$, збільшення вхідної напруги бракує зміни вихідного. При досягненні вхідною напругою значення $U_{ex}^{(t)}$ і

подальшим його збільшенні змінюється полярність напруги U_1 між входами, і на виході встановлюється напруга. Напруга U_{ex} при якому відбувається стрибкоподібні зміни вихідного називається напругою спрацьовування. Після перемикання на інвертуючому вході встановивши негативні напруги

Значення можна змінити включивши в ланцюг неінвертуючого входу джерело опорної напруги.



Вид передавальної характеристики

Рисунок 7

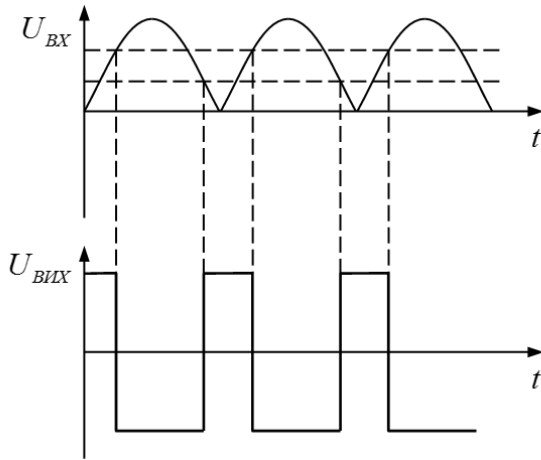


Рисунок 8

Порівнявши рівняння для пасивного RC -ланцюга і для електронної схеми можна зробити висновок, що електронна схема еквівалентна такому RC -ланцюгу у якій постійна тобто в $(1 + \kappa)$ раз менше ніж постійна часу ланцюга, безпосередньо утвореної C і R .

Інтегруючі ланцюги

Інтегруючим ланцюгом (І.Ц.) називають чотирьополіусник, сигнал на виході якого пропорційний інтегралу від вхідного сигналу

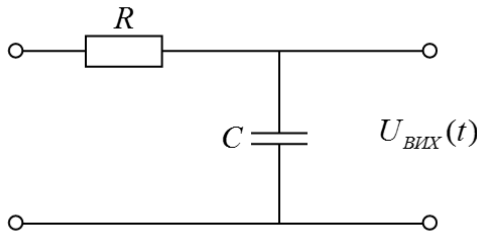


Рисунок 9

Для отримання точного інтегрування необхідно:

Збільшення постійної часу обмежена технічними можливостями і тому застосовують електронні інтегратори. Для пасивної ланцюга: будемо вважати, що на вході ланцюга діє стрибок напруги: $U_{\text{вх}}(t) = E \cdot 1(t)$.

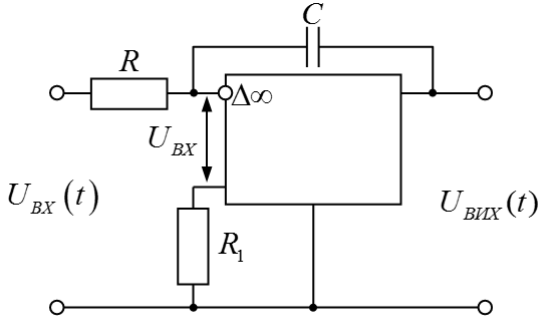


Рисунок 10

За другим законом Кірхгофа для $t \geq 0$ рівняння заряду конденсатора має: $E = R_c \frac{dU_c}{dt} + U_c(t)$.

Складемо аналогічне рівняння для електронного генератора.

Напруга на конденсаторі C можна знайти як різниця напруги на обкатку щодо корпусу:

Враховуючи що $i = i_R = i_c = C \frac{du_c}{dt}$ отримаємо

$$E = CR \frac{du_c}{dt} + \frac{U_c}{1+K}; \quad E(1+K) = CR(1+K) \frac{du_c}{dt} + u_c.$$

Диференціюючі ланцюги

Диференціюючим ланцюгом (Д. Л.) називають пристрій сигнал на виході якого має значення, пропорційні в кожен момент часу похідною від вхідного сигналу.

Ідеальним диференціальним пристроєм можна вважати конденсатор або індуктивну котушку L . Для того, щоб отримати вихідний сигнал у формі зручній для спостереження або реєстрації, в ланцюг послідовно з конденсатором C включають опір R .

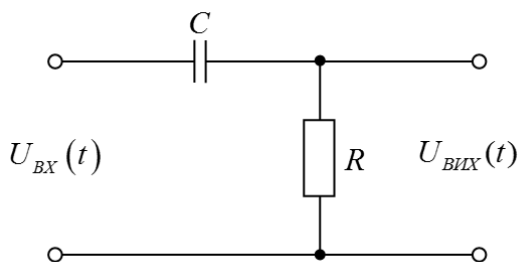


Рисунок 11

Для того щоб диференціювання було точним необхідно виконати умову

$$R \ll X_c.$$

Умова $R \ll X_c$ еквівалентно умові;

$R_c \ll T$ – для гармонійного сигналу;

$R_c \ll \tau_u$ – для імпульсного сигналу.

Де T – період гармонійного сигналу, а τ_u – тривалість імпульсного сигналу. Для підвищення точності диференціювання, необхідно зменшувати постійну часу, яке обмежене технічними можливостями.

У зв'язку з цим, для підвищення точності диференціювання застосовують електронні пристрої диференціювання.

$$U_{ex}(t) = E \cdot 1(t)$$

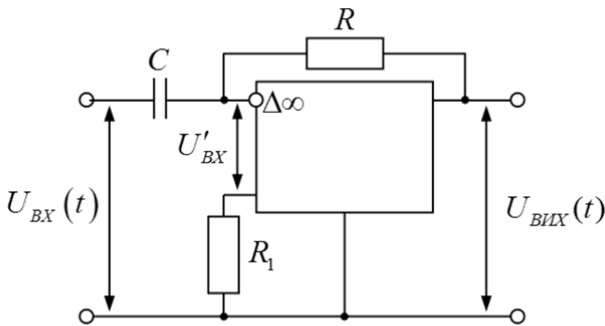


Рисунок 12

Лекція № 13

Випрямні пристрої

Найбільш поширеними джерелами струму є випрямляч-пристрій, що перетворює змінний струм в постійний.

Випрямляч складається з наступних елементів:

- силового трансформатора, що служить для зниження або підвищення напруги мережі до потрібної величини;
- одного або декількох вентилів, що володіють односторонньою провідністю;
- фільтра, що згладжує, що зменшує пульсацію випрямленого струму. (Рисунок 1)



Рисунок 1

Однопівперіодні випрямлячі

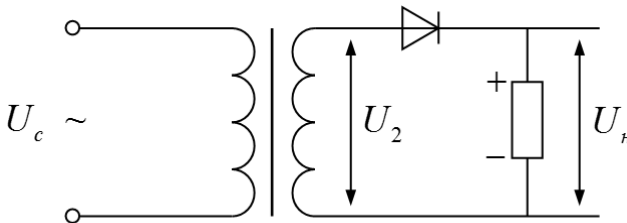


Рисунок 2

Велика величина K_D є великим недоліком однополуперіодної схеми. Крім цього, постійна I_0 менше

діючого значення I_2 струму у вторинній обмотці трансформатора. Це призводить до недостатнього використання обмоток трансформатора по струму.

Двонапівперіодна схема випрямлення

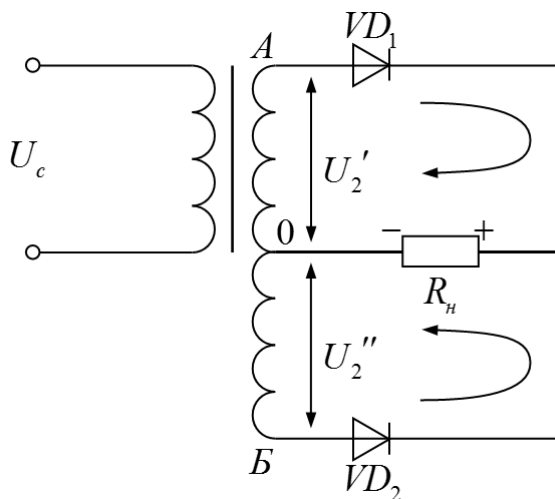


Рисунок 3

Схема з виводом від середньої точки вторинної обмотки силового трансформатора наведена на рисунку 3.

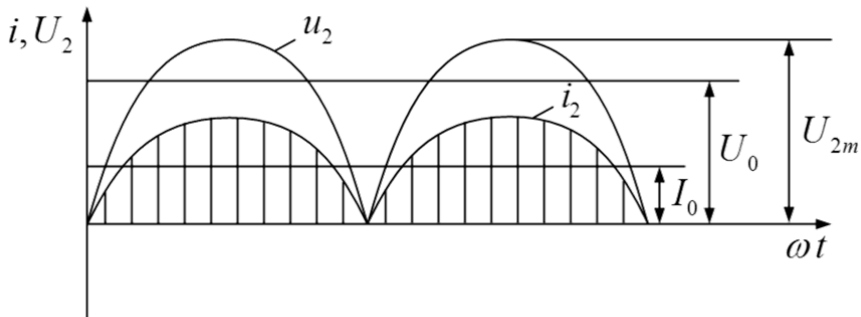


Рисунок 4

У двонапівперіодній схемі величина струму, що проходить через кожен діод, в два рази менше, ніж в однопівперіодній схемі.

Двонапівперіодна схема дає більш згладжену напругу, ніж однонапівперіодна.

У двонапівперіодною схемою максимальна зворотна напруга на діоді більш ніж в 3 рази перевищує випрямлену напругу, що є недоліком схеми. До недоліків слід віднести і ускладнену конструкцію трансформатора.

Двонапівперіодна мостова схема

У схему входять силовий трансформатор і чотири діода, включених по схемі моста (Рисунок 5).

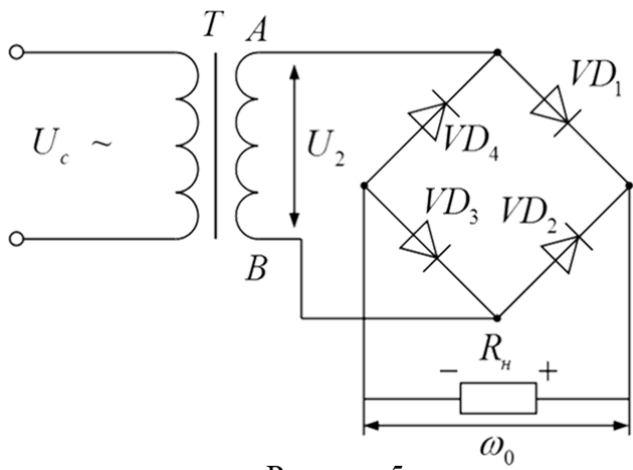


Рисунок 5

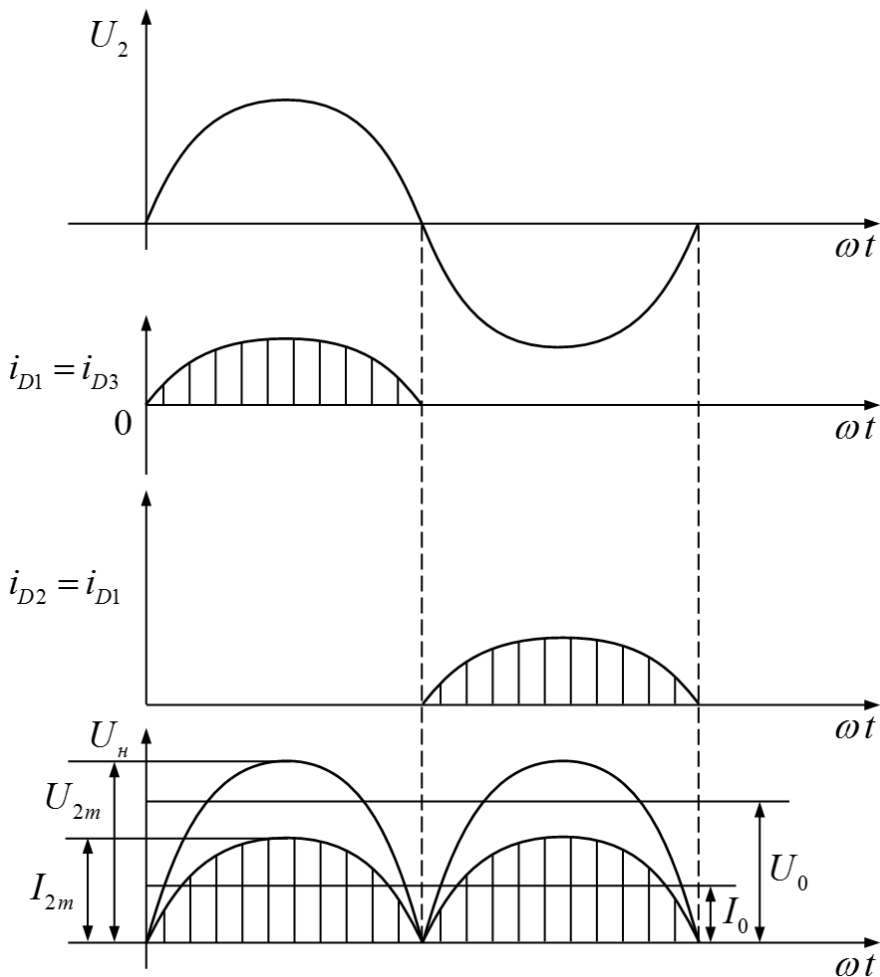


Рисунок 6

В один з напівперіодів, коли потенціал точки А позитивний, а потенціал точки В негативний, струм проходить від точки А діод D_1 , опір R_H і діод D_3 до точки В. Наступний напівперіод струм проходить від точки В через діод D_2 , R_H і діод D_4 до

точки А. Напрямок струму через R_H в обидва напівперіоду залишається незмінним. Тому в даній схемі має місце двухперіодне випрямлення.

Постійна складова випрямленого струму I_0 являє собою середнє значення струму протікаючого за період через опір R_H .

$$I_0 = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_2 dt$$

Оскільки струм $i_2 = I_{2m} \sin \omega t$, запишемо

$$I_0 = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t dt = 2 \frac{I_{2m}}{\pi} = 0,636 I_{2m}$$

Постійну складову випрямленої напруги можна визначити за законом Ома якщо знехтувати втратами на діодах.

Замінивши амплітудне значення напруги його чинним отримаємо

$$U_0 \approx 0,9 U_2$$

Зазвичай значення напруги і струму I_0 задається при розрахунку випрямляча.

Знаючи U_0 , визначимо U_2 на вторинних затискачах тр-ра.

$$n = \frac{U_2}{U_c}$$

Мостова схема набула широкого поширення в електроніці тому:

1. Розміри і маса трансформатора менше внаслідок кращого використання обмоток по струму;
2. Конструкція трансформатора виконана без спеціального виведення від середньої точки;
3. Зворотна напруга, що припадає на один діод, вдвічі менше, ніж в схемі з середньою точкою.

Схема випрямлення з множенням напруги

Для підвищення випрямленої напруги на навантаженні при заданій напрузі на вторинній обмотці тр-ра або при відсутності підвищує тр-ра застосовують схеми випрямлення з множенням напруги.

В якості додаткових джерел е.р.с. призначених для збільшення вихідної напруги в цих схемах використовують конденсатори, які періодично заряджають через діоди.

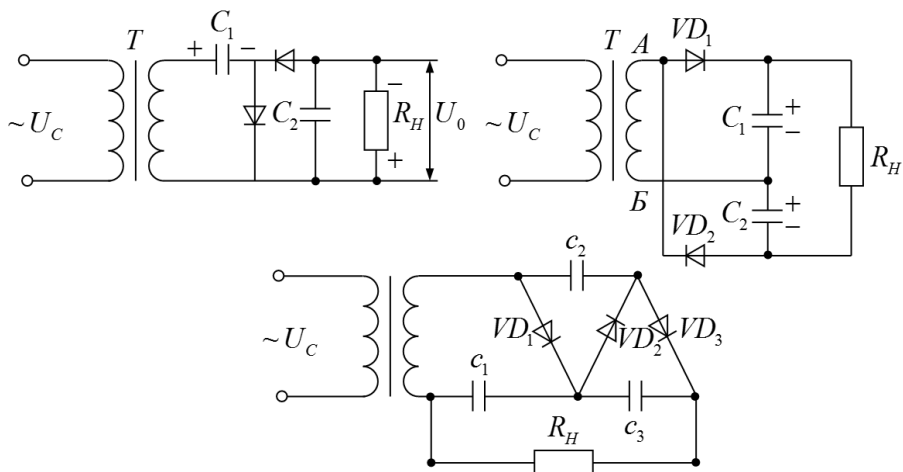


Рисунок 7

За аналогією можуть бути побудовані схеми з більшою кратністю множення. Однак чим вище кратність множення, тим більше діодів і конденсаторів повинно бути в схемі і тим більше високу напругу вони повинні витримувати.

Ці схеми застосовуються головним чином для отримання високих напруг при малому струмі навантаження.

Це пояснюється тим, що при великих токах навантаження, конденсатори повинні мати дуже велику ємність. При малій місткості вони будуть швидко розряджатися і пульсації напруги на навантаженні стануть неприпустимо великими.

Згладжуючі фільтри

При живленні електронної апаратури допускається мала (порядку десятих, сотих і навіть тисячних часток відсотка) пульсація випрямленої напруги. Для зменшення пульсації випрямленої напруги застосовуються згладжуючі фільтри.

Будь-який згладжуючий фільтр повинен володіти необхідним коефіцієнтом згладжування q , величина якого визначається відношенням.

Для того, щоб на виході випрямляча отримати напругу з меншими пульсаціями, досить паралельно опору навантаження підключити конденсатор, (Рисунок 8).

У ті проміжки, коли діод пропускає струм, конденсатор запасе енергію. Коли діод замкнений, конденсатор розряджається через навантаження.

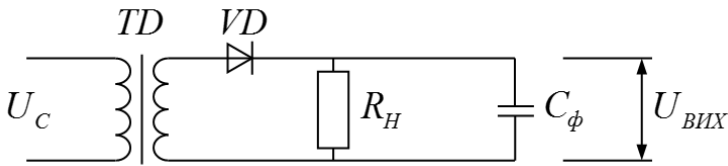


Рисунок 8

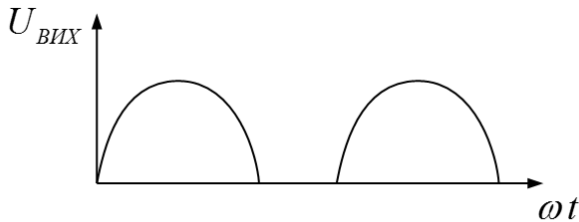


Рисунок 9 - Напруга на навантаженні без конденсатора

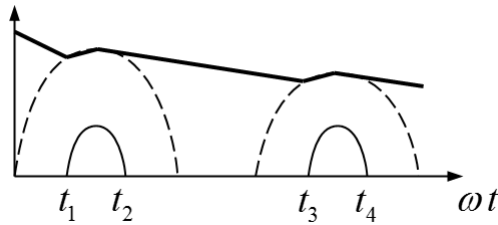


Рисунок 10

Величину ємності фільтра, що згладжує, при якій пульсація випрямленого струму становить не більше 10%, при частоті мережі $f_c = 50 \text{ Гц}$, розраховуємо за формулами: для однополуперіодної схеми.

Вибір тієї чи іншої схеми визначається величиною випрямленого струму і допустимим значенням коефіцієнта пульсації випрямленої напруги на виході фільтра.

Як послідовні елементи фільтрів найчастіше використовують індуктивності (дроселі) (Рисунок 11) і активні опори-резистори (Рисунок 12). Паралельними елементами фільтра зазвичай служать конденсатори.

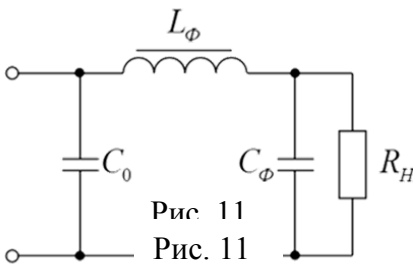


Рис. 11
Рис. 11

Рисунок 11

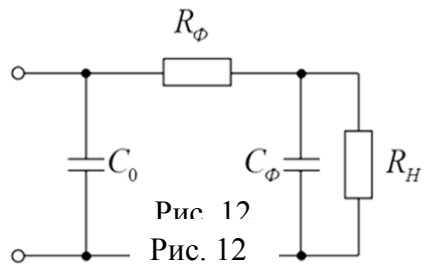


Рис. 12
Рис. 12

Рисунок 12

Для постійного струму опір $X_{C\phi}$ нескінченно великий, а опір $X_{L\phi} = \omega L_{\phi}$ малий.

Для опору $X_{L\phi} = \omega L_{\phi}$ прагнуть вибрати значно більше навантажувального опору R_H .

Для найбільш поширених схем с $f_c = 50 \text{ Гц}$;

$$L_{\phi} C_{\phi} = 2,5(q + 1).$$

Величини L_{ϕ} і C_{ϕ} повинні бути обрані так, щоб виконувалася умова

$$m\omega_c L_{\phi} > \frac{1}{m\omega_c C_{\phi}}$$

Зазвичай в якості конденсаторів фільтра використовують електролітичні конденсатори, що мають велику ємність.

Для збільшення коефіцієнта згладжування застосовуються кілька Г-образних фільтрів, при цьому сумарний коефіцієнт згладжування дорівнює

$$q = q_1 \cdot q_2$$

Істотним недоліком дросельних фільтрів є їх велика маса, а так само створення магнітних полів.

Трифазні випрямлячі

Застосовуються для живлення споживачів великої потужності. Вони рівномірно навантажують мережу трифазного

струму і відрізняються високим коефіцієнтом використання трифазного трансформатора.

Найбільш типовою схемою є трифазна схема з нульовим виводом.

Трифазна схема з нульовим виводом складається з трифазного трансформатора, трьох вентилів і навантажувального опору R_H .

Первинна обмотка тр-ра може бути з'єднана трикутником або зіркою, вторинна тільки зіркою.

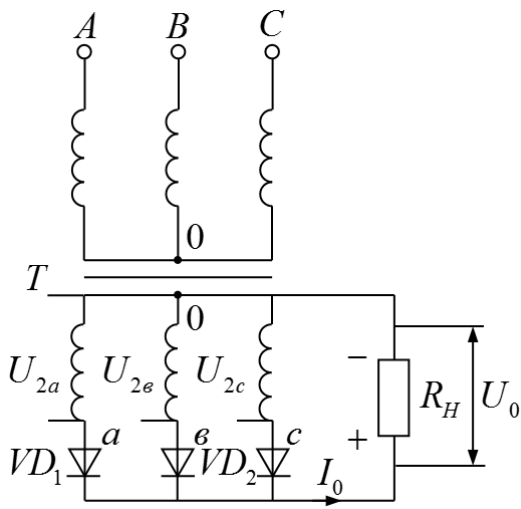


Рисунок 13

В даній схемі через кожен вентиль проходить струм протягом однієї третьої частини періоду, коли напруга на фазі трансформатора, в яку включений вентиль, вище напруги двох інших фаз.

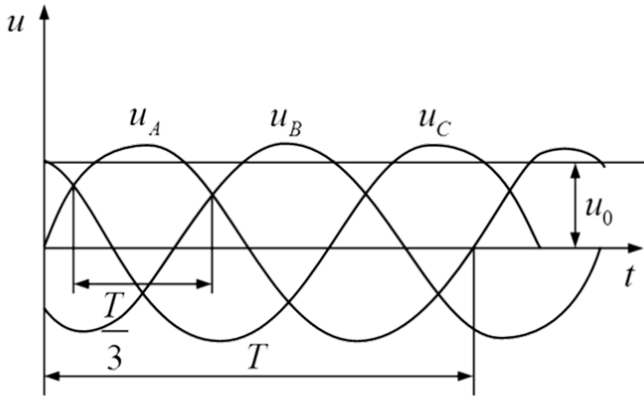


Рисунок 14

Максимальне значення струму у вторинних обмотках рівне:

$$I_{2m} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} I_0 = 1,21 I_0;$$

Максимальне значення зворотної напруги рівне амплітуді лінійної.

Ці схеми найбільш економічно працюють при потужностях, що не перевищують десятків кіловат.

Однофазні керовані випрямлячі

На практиці в більшості випадків випрямні установки повинні забезпечувати можливість плавного регулювання випрямленої напруги в широких межах (наприклад, для керування швидкістю електродвигунів постійного струму).

У таких випрямлячах застосовують керовані випрямні елементи, в якості яких в даний час зазвичай використовують тиристори. Управління випрямленої напруги зводиться до затримки в часі включення тиристора по відношенню до моменту природного включення за рахунок напруги, прикладеного між "анодом" і "катодом".

На катоді приведена схема двухполуперіодного випрямляча, що працює на активне навантаження.

Моменти відмикання тиристорів визначаються моментами надходження на їх керуючі електроди імпульсів струму і, затриманих щодо моменту переходу через нуль вторинних напруг на деякий час, яке відповідає фазовому куті, званого кутом управління.

В результаті форма і тривалість імпульсів струму в протікають через відкритий тиристор і навантаження, виявляються іншими, ніж в аналогічному випрямлячі на випрямних діодах, а середнє значення випрямленої напруги залежить від кута управління і визначаються виразом.

При цьому збільшується пульсації випрямленої напруги і зменшення К.К.Д. Це є основним недоліком керованих випрямлячів. Для роботи таких схем необхідні спеціальні пристрої управління для створення керуючих імпульсів прямокутної форми і малої тривалості. Для створення таких керуючих імпульсів, що надходять на тиристор із заданою послідовністю, використовуються різноманітні схеми генераторів імпульсів і фазосдвигаючих пристроїв, які отримали назву імпульсно-фазових систем управління.

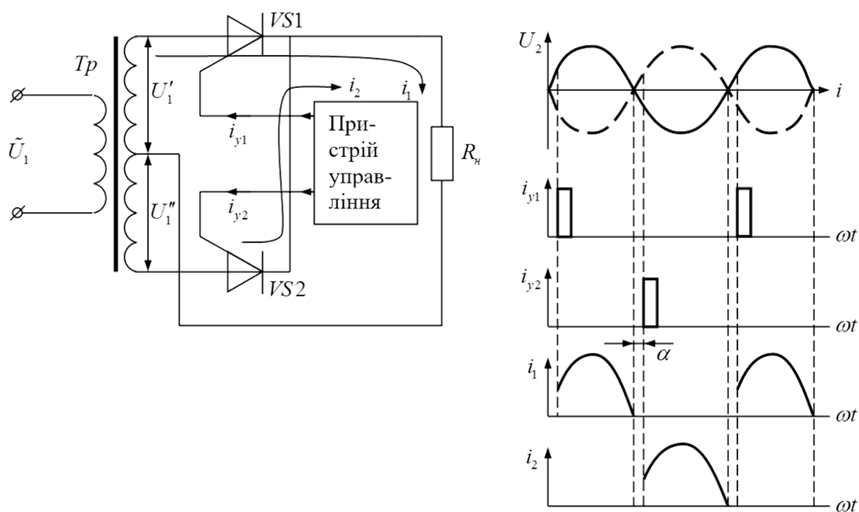


Рисунок 15

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, ОЭП. Справочник под редакцией Горюнова Н. Н. – М.: «Энергоиздат», 1987. – 744 с.
2. Новаченко И. В. Микросхемы для бытовой аппаратуры. Справочник / Новаченко И. В. и др. – М.: «Радио и связь», 1989. – 384 с.
3. Замятин В. Я. Тиристоры. Справочник / Замятин В. Я и др. – М.: "Радио и связь", 1987. – 576 с.
4. Терещук Р. М. Справочник радиолюбителя / Терещук Р. М. – Киев.: "Наукова думка", 1981. – 671 с.
5. Андреев Ю. Н. Резисторы. Справочник / Андреев Ю. Н. – М.: "Энергоиздат", 1981. – 352 с.
6. Нефедов А. В. Отечественные полупроводниковые приборы и их зарубежные аналоги. Справочник / Нефедов А. В., Гордеева В. И. – М.: "Радио и связь", 1990. – 401 с.
7. Забродин Ю. С. Промышленная электроника, учебник для ВУЗов. / Забродин Ю. С. – М.: "Высшая школа", 1982.
8. Транзисторы. Справочник под общей редакцией И. Ф. Николаевского. – М.: "Связь", 1969. – 624 с.

Зміст

Лекція № 1. Електрофізичні властивості напівпровідників.....	3
Лекція № 2. Напівпровідникові діоди.....	13
Лекція № 3. Пристрій біполярного транзистора.....	22
Лекція № 4. Польові транзистори.....	32
Лекція № 5. Електронні підсилювачі.....	43
Лекція № 6. Підсилювачі змінної напруги.....	56
Лекція № 7. Підсилювачі постійного струму.....	65
Лекція № 8. Структура і основні параметри інтегральних операційних підсилювачів.....	74
Лекція № 9. Генератори синусоїдальних коливань.....	86
Лекція № 10. Види і параметри імпульсних сигналів.....	101
Лекція № 11. Тригерні структури.....	112
Лекція № 12. Електронні ключі.....	119
Лекція № 13. Випрямні пристрої.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	143

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Конспект лекцій

ЧЕРЕНКОВ Олександр Данилович
ЧОРНА Марія Олександрівна

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 6,42

Наклад 50 пр.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44