

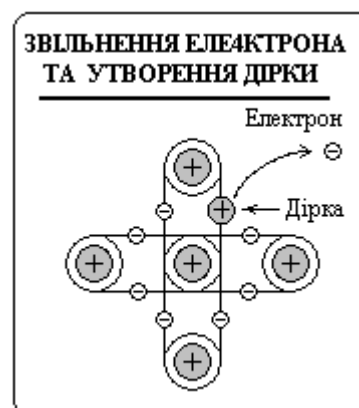
СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

1. Механізм власної провідності чистих напівпровідників

Напівпровідники – це речовини, що отримали свою назву в зв'язку зі неможливістю віднесення їх за характером, величиною і поведінкою провідності ні до провідників, ні до діелектриків. Опір напівпровідників суттєво залежить від зовнішніх умов, зокрема від температури та опромінення (освітлення), а також домішок. За певним винятком, при збільшенні температури, опір напівпровідників помітно зменшується в той час як у провідників він лінійно зростає. Характер провідності напівпровідників пояснюється природою зв'язків між атомами. До часто вживаних класичних напівпровідників відносяться елементи IV групи таблиці Менделєєва, такі як вуглець, германій та кремній. Однак вони лише починають список напівпровідників, до якого належать і сполуки, зокрема окисли, сульфіді, селеніді, телуриди багатьох металів.

Особливий характер провідності напівпровідників можна проілюструвати на прикладі кристалу кремнію, будова кристалічної ґратки якого визначається тим, що його атоми на зовнішньому електронному шарі мають чотири валентні електрони, завдяки, яким кожен атом здійснює ковалентний зв'язок з чотирма сусідніми атомами, шляхом взаємообміну електронами. Схематично це виглядає так, ніби утворюється чотири електронні пари, кожна з яких має орбіталь, що охоплює ядро даного атома і одного зі сусідніх. Атоми кремнію утворюють кубічну кристалічну ґратку алмазоподібного типу. Кожний атом знаходиться в центрі тетраедра, вершинами якого слугують чотири сусідні атоми.

При низьких температурах вільних електронів немає, так як всі електрони задіяні в електронних зв'язках. Проте це не означає, що валентні електрони «прив'язані» до своєї пари атомів. Навпаки, вони можуть переходити від атома до атома в хаотичному порядку. Виходить, що кожен валентний електрон належить всьому кристалу в цілому. При підвищенні температури, а з нею середньої кінетичної енергії частинок кристалу, деяка кількість електронів набуває такої кінетичної енергії, яка перевищує енергію зв'язку з атомами кристалу, і ці електрони стають вільними, здатними виконувати роль носіїв струму. Розірваний і незаповнений ковалентний зв'язок – вакантне місце електрона поводить себе, як *позитивно заряджена квазічастинка – дірка*, що за принципом мінімуму енергії притягує електрони зі сусідніх атомів. Хаотичне заповнення дірки приводить до хаотичного її блукання по об'єму кристала. Якщо в кристалі створити електричне поле, приєднавши його до джерела напруги, то до хаотичного руху вільних електронів і дірок додається напрямлений рух електронів проти напруженості поля і дірок за цією напруженістю. Виникає струм зумовлений напрямленим переміщенням електронів, тобто *електронною, або n- провідністю* (negative – негативний) та дірок, тобто *дірковою, або p- провідністю* (positive – позитивний). Отже *чисті (власні) напівпровідники, елементи*



четвертої групи таблиці Менделєєва, мають змішану електронно-діркову провідність при рівній концентрації електронів та дірок ($n_e = n_p$).

2. Різні типи провідності напівпровідників

Розглянута провідність чистих напівпровідників називається *власною*. Домішкова провідність виникає при додаванні до чистого напівпровідника домішок.

Домішок атомів елементу п'ятої групи до четвертої називається *донорним*. Атоми елементів п'ятої групи на зовнішньому електронному шарі мають 5 валентних електронів. Четверо з них мають здійснювати зв'язки з сусідніми чотирма атомами кристалу, а п'ятий легко звільняється від свого атома навіть при кімнатній температурі. Така ситуація має місце, при додаванні до атомів кремнію домішку атомів миш'яку. Концентрація звільнених електронів значно перевищує концентрацію електронно-діркових пар, які утворюються з попередньо названих причин. Основними носіями струму стають електрони. Подібна провідність називається *n-провідністю* інакше кажучи – *електронною*.

Домішок утворений атомами елементу третьої групи називається *акцепторним*. Атоми цього домішку мають три валентні електрони, і для утворення чотирьох валентних зв'язків зі значно переважаючими за кількістю атомами елементу четвертою групи їм не вистачає одного електрона. Виникає дірка у вигляді незаповненого валентного зв'язку – вакантного місця електрона. Такі вільні дірки стають основними носіями струму. Виникає *p-провідність* тобто *діркова*.

Слід підкреслити, що діркова провідність має естафетний характер, тобто виникає завдяки руху електронів, які заповнюють свої вакантні місця – дірки.

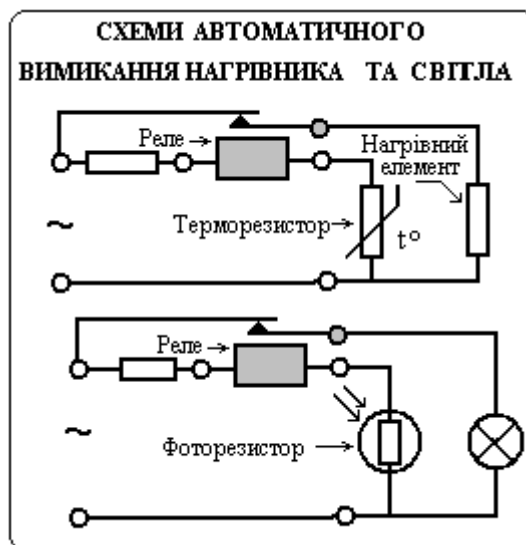
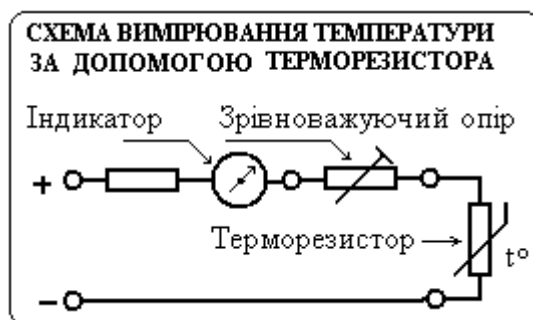
3. Терморезистор. Фоторезистор

Германій і кремній, подібно до інших напівпровідників мають від'ємний температурний коефіцієнт опору. Так опір кремнію падає вдвічі при підвищенні температури на 6 К, германію – на 10 К. Германій є більш температурно інертним, однак для звільнення електронів вимагає меншої температури ніж кремній. При кімнатній температурі опір германію приблизно в тисячу разів менший ніж опір кремнію.

В поданій релейній схемі зміна температури терморезистора (термістора) приводить до зміни його опору і струму в колі, на що відповідно реагує вимірювальний прилад (індикатор), роль якого в найпростішому випадку може відігравати амперметр, проградуирований в одиницях температури.

В наступній схемі збільшення струму приводить до спрацювання реле, яке розмикає коло з нагрівним елементом.

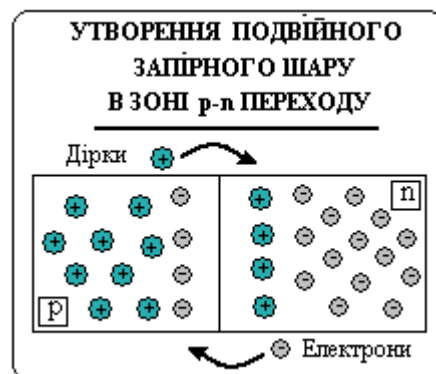
Значне зменшення опору напівпровідників від температури використовується в *терморезисторах* (*термісторах*), які застосовується для вимірювання температури, автоматичного регулювання струму, різноманітних датчиках.



Властивість напівпровідників зменшувати опір при освітленні використовується в *фоторезисторах*, які застосовуються при вимірюванні інтенсивності світла, лічильниках об'єктів в конвеєрних потоках, пристроях сигналізації.

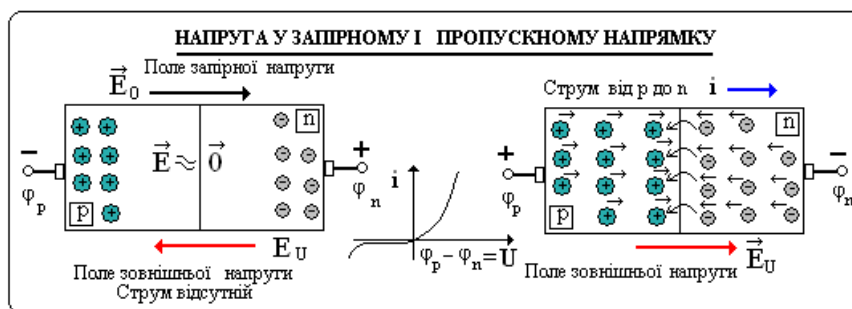
4. Властивості дірково-електронного (p-n) переходу

Дірково-електронний перехід (p-n перехід) виникає в зоні контакту напівпровідників двох типів p та n. При такому контакті відбувається взаємодифузія основних носіїв струму через поверхню розділу. Дірки дифундують в n-напівпровідник, а електрони в p-напівпровідник до тих пір, поки між різноманітними зарядженими дифузійними шарами не виникне різниця потенціалів, що перешкоджатиме подальшому зростанню концентрації носіїв в утвореному *подвійному запірному шарі*.



Прикладання напруги в *запірному напрямку*, якому відповідає *напруженість поля від n-напівпровідника до p-напівпровідника*, не викликає значного струму, а приводить лише до зсуву дірок і електронів в протилежних напрямках так, що утворяться шари протилежного заряду

розділені зоною, де практично відсутні носії струму. Виникає напруга з полярністю протилежною до зовнішньої і рівною останній за величиною. Протилежно напрямлені електричні поля практично компенсуються. Може існувати лише незначний, так званий *зворотний, струм*. Напруга в зворотному напрямку лише ще розширює запірний шар і підвищує запірну напругу – своєрідний *потенціальний бар'єр* для руху носіїв.



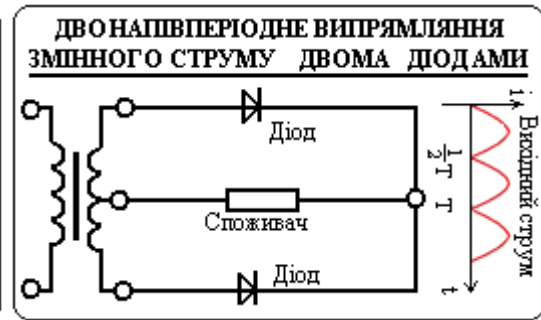
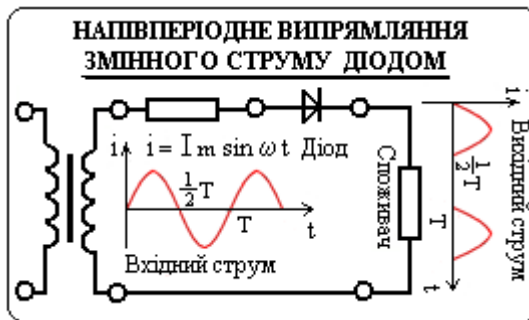
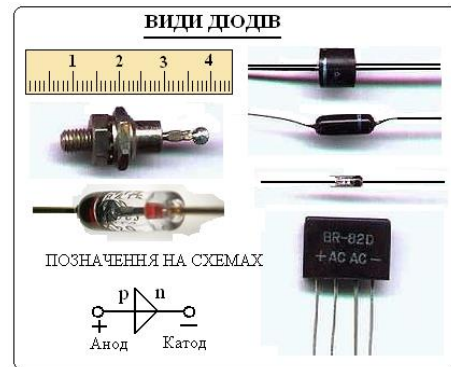
Напруга в прямому, пропускному напрямку якому відповідає *напруженість поля від p-напівпровідника до n-напівпровідника*, створює значний струм, створений зустрічним рухом електронів та дірок, який швидко зростає зі збільшенням напруги. Лінійної залежності струму від напруги (закону Ома), як у класичних провідників, не спостерігається.

Таким чином *основною властивістю p – n (або n – p) переходу є його одностороння провідність*, яка полягає в тому, що при зміні полярності даної напруги струм в прямому, пропускному напрямку (p – n) значно перевищує струм в зворотному, запірному (n – p).

5. Напівпровідниковий діод. Випрямлячі струму на діодах

Одностороння провідність електронно-діркового переходу використовується в діодах – пристроях, які в основному застосовуються для випрямлення змінного струму. Напівпровідниковий діод складається з монокристалічної пластинки германію з

електронною провідністю створеною незначною кількістю донорної домішки. Електронно-дірковий перехід не створюється механічним контактом напівпровідників різного типу провідності, оскільки при цьому неможливо забезпечити достатньо щільний та тонкий контакт. Проблема вирішується вплавленням в одну з поверхонь пластинки германію краплини індію. При цьому процесі атоми індію дифундують у германій і створюють область діркової провідності. Кристал вміщують в герметичний металевий корпус, форма



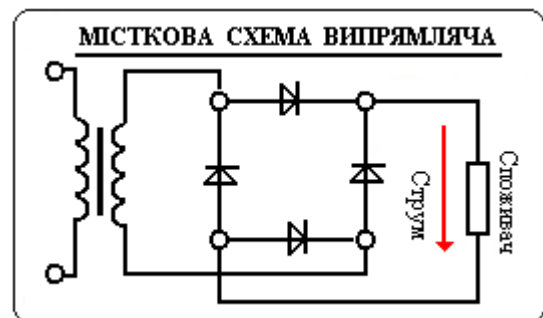
якого сприяє кращому тепловідводу.

Дія діода полягає в тому, що при зміні напрямку струму в підвідному провіднику діод пропускає струм одного, пропускнуго напрямку.

Однонапівперіодний випрямляч перетворює змінний струм в струму розділені напівперіодичними часовими перервами.

Схема з двома діодами в двонапівперіодному випрямлячеві дозволяє безперервні напівперіодичні імпульси, які можна згладити паралельним підключенням до споживача конденсатора. На малюнку подана схема такого випрямляча зі середньою точкою.

Широке застосування в джерелах живлення електронних пристроїв має місткова схема двонапівперіодного випрямляча Греца з чотирма діодами.



6. Транзистори

Найбільш широкого застосування в електронній техніці набув конструктив, що містить два електронно діркові переходи – транзистор.

Транзистор (від англ. слів *transfer* – перенос та *resistor* – опір) трьохелектродний електронний напівпровідниковий прилад здатний підсилювати електричні сигнали. Винайдений вченими США Джоном БАРДІНИМ (J. BARDEEN, н.27.V.1908), Уолтером БРАТТЕЙНОМ (W.BRATTEIN, н.10.11.1902) та Уільямом Бредфордом ШОКЛІ (W.SHOKLEY, н. 12.11.1910) в 1948р. (Нобелівська премія з фізики, 1956р.).

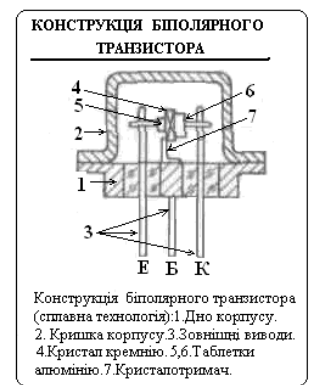
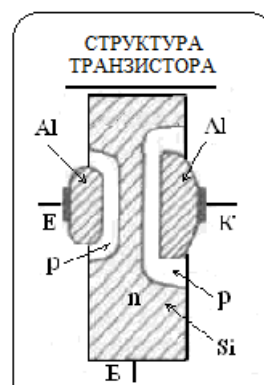
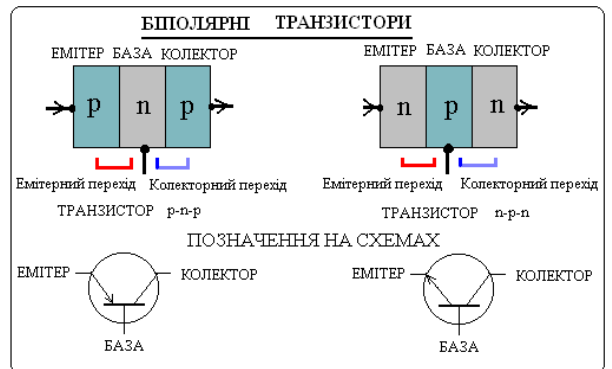
В сучасний момент крім початково винайдених транзисторів, які називаються

біполярними, існують ще й уніполярні (польові), в основі роботи яких лежать інші фізичні принципи.

Біполярний площинний транзистор являє собою тришарову напівпровідникову структуру, в якій чергуються шари діркової (р -типу) та електронної n-типу) провідності. Існують біполярні транзистори типу р-п-р та п-р-п. Середній шар транзисторної структури називають базою. Крайні шари іменуються емітером і колектором. Технологія виготовлення п-р-п транзисторів складніша, проте ці транзистори мають перевагу у випадку роботи на високих частотах струму, так як рухливість електронів більша ніж дірок. При сплавній технології виготовлення найпоширенішого р-п-р транзистора, на емітерний шар елемента четвертої групи з невеликою домішкою елемента п'ятої групи наплаваються з двох боків таблетки елементів третьої групи: для германію – індій, для кремнію – алюміній.

Транзистор може працювати в трьох режимах в залежності від напруги на його переходах.

Активний режим досягається подачею на емітерний перехід (від емітера до бази) прямої напруги, а на колекторний перехід (від емітера до колектора) зворотної. Режим відсічки (замикання) характеризується зворотною напругою на обох переходах. Режим насичення визначається прямою напругою на обох переходах. Активний режим є основним в схемах підсилювачів і генераторів. В більшості випадків ввімкнення розрізняють два кола: вхідне, або керуюче та вихідне, або кероване. Коло, що замикає базу і сусідній з нею електрод, є вхідним, а коло, що сполучає емітер і колектор, є вихідним.



7. Підсилення електричних сигналів за допомогою транзистора

Принцип підсилення ґрунтується на тому, що на емітерний перехід подається напруга в пропускному (прямому) напрямку, а на колекторний - в запірному (зворотному).

а) Схеми з незалежними джерелами живлення

На початку розглянемо ідеалізовані схеми ввімкнення вхідного і вихідного струмів.

1. Схема з спільним емітером (СЕ).

Схема називається так в зв'язку з тим, що емітер є спільною точкою прикладання вхідної та вихідної напруги.

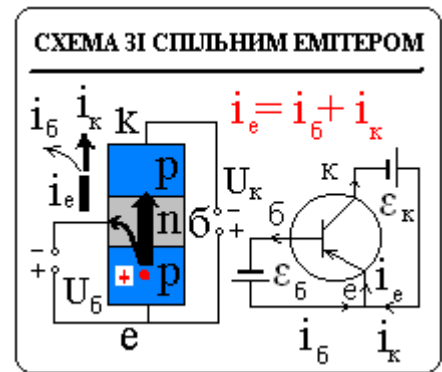
Базова напруга (напруга між емітером та базою) в пропускному напрямку створює потік основних емітерних носіїв, який перехоплюється колекторною напругою (напругою між колектором та емітером) прикладеною в запірному напрямку.

Для ефективного здійснення цього товщина бази робиться значно меншою довжини вільного пробігу неосновних носіїв струму, які здатні попасти в базу з емітера. В зв'язку з цим, та завдяки тому, що концентрація основних носіїв струму в базі створюється значно

меншою ніж в емітері, рекомбінація (зникнення) основних носіїв, що надходять з емітера, зводиться до мінімуму. Крім цього площа переходу база –колектор робиться значно більшою ніж база – емітер. Завдяки цьому струм бази (емітер-база) значно менший за струм колектора (база-колектор) $i_b \ll i_k$.

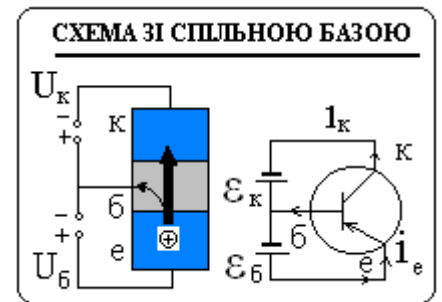
В типовому транзисторі до 100 разів. Тому коефіцієнт підсилення цієї схеми по струму $\kappa_i = \frac{i_k}{i_b} \approx 20 - 100$.

Коефіцієнт підсилення за напругою $\kappa_u = 10-200$.



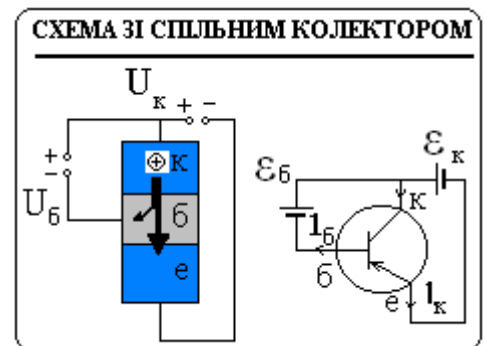
2. Схема з спільною базою (СБ)

В цій схемі спільною точкою прикладання вхідної та вихідної напруги є база. Ця схема дає значно менше підсилення потужності ніж схема із спільним емітером (СЕ) і, в порівнянні з останньою, має менший вхідний опір (десятки, а в потужних транзисторів навіть одиниці Ом), проте має переваги за температурними та частотними властивостями. Коефіцієнт підсилення по струму тут завжди дещо менший одиниці. Коефіцієнт підсилення по напрузі приблизно такий же, як і схеми СЕ.



3. Схема з спільним колектором (СК)

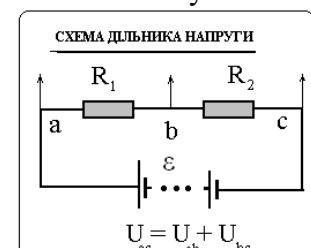
Спільною точкою прикладання вхідної та вихідної напруги є колектор. Коефіцієнт підсилення по струму цієї схеми майже такий же, як схеми СЕ (декілька десятків), а по напрузі дещо менший одиниці. Проте корисною особливістю цієї схеми є те, що змінна сигнальна напруга, яка подається на вхід схеми (база - колектор), накладаючись на постійну напругу живлення спричиняє синхронні зміни напруги у вихідному колекторному колі (колектор-емітер). Зміни вихідної напруги повторюють зміни вхідної, тобто між ними не існує зсуву за фазою. З цієї причини ця схема називається емітерним повторювачем. До переваг схеми СК належить її великий вхідний опір (декілька кілоом).



б) Схеми з спільним джерелом живлення

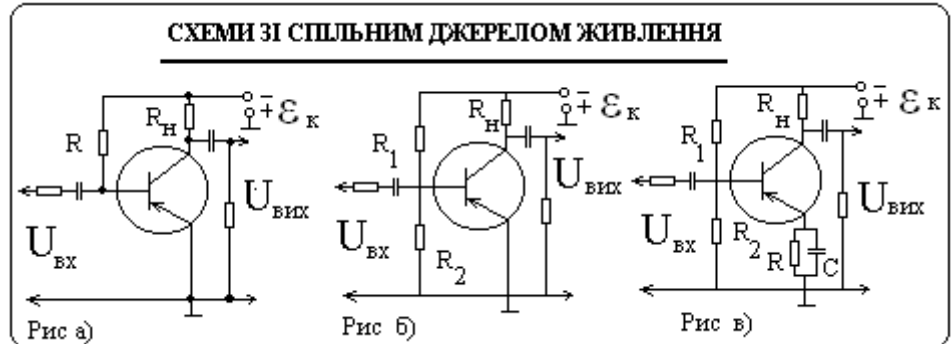
Розглянуті схеми відрізняються від реальних тим, що на практиці використовується спільне джерело живлення вхідного та вихідного кола, вводяться навантажувальні опори та конденсатори, які дозволяють відділити постійну складову струму та напруги від змінної.

Для живлення обох транзисторних кіл використовується схема дільника напруги на опорах. Розглянемо варіанти схеми з спільним емітером. Тут враховано, що струм емітера при проходженні дільниці емітер база створює на ній спад напруги недостатній для роботи транзистори без спотворень. Потрібно подати додаткову напругу, яка за термінологією прийнятою



для електровакуумних ламп називається напругою зміщення. Такою напругою може служити частинна напруга колекторного джерела, яка отримується з допомогою резистора або дільника напруги. При цьому один з спільних потенціалів можна подати на контур схеми. В схемі а) з цією метою введений резистор R , при проходженні через який струму бази, колекторна напруга поділяється між напругою на цьому резисторі та напругою на переході емітер - база так, що на перехід припадає лише невелика частка всієї напруги.

В схемі б) напруга зміщення подається за допомогою дільника напруги R_1, R_2 . Тут основна частина колекторної напруги припадає на резистор R_1 , а невелика частина



напруги (що служить напругою зміщення) припадає на резистор R_2 , який ввімкнено паралельно входу транзистора. Для запобігання змін режиму роботи транзистора в результаті нагрівання в схему вводять елементи, або ланцюги стабілізації. Такий ланцюг, що складається з паралельних резистора та конденсатора ввімкнено в емітерний провід в схемі в).

3. Логічні елементи на транзисторах.

До логічних належать елементи, що призначені для виконання найпростіших логічних операцій

Логічні операції можуть реалізуватись механічними, перемикачевими (контактними), резисторними, діодними та тріодними (транзисторними) схемами.

1) Схема для виконання диз'юнкції (логічного АБО, логічного додавання).

Диз'юнкція це поєднання (композиція) висловлювань, яке є істинним при істинності одного з складових.

2) Схема для виконання кон'юнкції (логічного І, логічного множення)

Кон'юнкція – це поєднання (композиція) двох висловлювань, яке є істинним при істинності кожного з складових (обох разом) .